

**МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО  
СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РЕСПУБЛИКИ УЗБЕКИСТАН**

**ЦЕНТР СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО,  
ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ**

**Т. М. ОПЛАЧКО, К. А. ТУРСУНМЕТОВ**

# **Ф И З И К А**

**ЧАСТЬ II**

**ЭЛЕКТРОДИНАМИКА  
ОПТИКА  
АТОМНАЯ ФИЗИКА**

*Учебное пособие  
для академических лицеев и  
профессиональных колледжей*

Издание четвертое

«ILM ZIYO»  
ТАШКЕНТ — 2016

УДК 340 (075)

ББК 22.3я722

*Рекомендовано к изданию советом Научно-методического  
центра среднего специального, профессионального  
образования*

*Рецензенты: У. Абдурахманов* — заведующий кафедрой общей физики НУУз. им. М. Улугбека, доктор физико-математических наук, профессор;  
*Н. Зикриллаев* — профессор ТГТУ им. А. Беруни, доктор физико-математических наук;  
*А. Нигманходжаев* — директор академического лицея при ТАСИ, кандидат физико-математических наук, доцент.

Данное пособие соответствует учебной программе для учебных заведений среднего и среднеспециального профессионального образования Республики Узбекистан. Пособие содержит всю необходимую теоретическую базу в соответствии с требованиями, вытекающими из тестовых заданий ГЦТ, и окажет существенную помощь при работе с тестами. Данное учебное пособие отличается лаконичностью, информативностью, структурированностью, наглядностью, многоуровневостью, доходчивостью и современным дизайном. «Физика» в двух частях содержит около 600 контрольных вопросов, 900 тестов с ответами и более 500 иллюстраций.

Рекомендуется для учащихся лицеев и колледжей при изучении, повторении, а также при самостоятельном изучении курса элементарной физики.

Предложения и пожелания просим направлять по электронному адресу: oplachko@bcc.com.uz.

ISBN 978-9943-16-297-6

© Издательство «ILM ZIYO», 2007

© Издательство «ILM ZIYO», 2016

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Данное пособие содержит конспекты лекций по физике по всем разделам и темам в соответствии с программой для академических лицеев и профессиональных колледжей.

Пособие содержит всю необходимую теоретическую базу по элементарной физике в соответствии с требованиями, вытекающими из тестовых заданий, разработанных ГЦТ Республики Узбекистан.

Книга «Физика» не дублирует существующие ныне учебники физики и не исключает работу с ними. Предлагаемый вариант конспектов позволяет творчески его развивать как в сторону расширения любой темы, так и в сторону сокращения, создавая собственные сигналы и компакты.

Данное пособие составлено по структуре опорных конспектов и принципу «наглядной конструкции». Текст намеренно разделяется на отдельные части, располагающиеся так, что способствует эффективному восприятию информации.

Учебное пособие не содержит громоздких повествовательных изложений, тем не менее все необходимые выводы формул приводятся полностью, логически завершенной цепочкой.

Создатели пособия стремились придать ему следующие качества: лаконичность, структурность, образность, многоуровневость, динамичность, доходчивость, а также привлекательный вид, соответствующий требованиям современного дизайна.

Большой эффект в обучении даст наличие данного пособия у всех учащихся группы. Это позволит преподавателю экономить время при проведении лекции, объяснении темы и организации самостоятельной работы. Не требуя от учащихся составления конспекта, преподаватель может добиться понимания учебного материала на уроке. Сэкономленное время целесообразнее использовать для решения задач и закрепления знаний. В конце каждой главы приведены контрольные вопросы и тестовые задания с ответами, которые позволяют осуществлять оперативный контроль усвоения изучаемого материала в любых формах, а также окажут помощь при самостоятельном изучении курса физики.

## ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОДИНАМИКИ

О существовании электромагнитных сил знали еще древние греки. Но систематическое, количественное изучение физических явлений, в которых проявляется электромагнитное взаимодействие тел, началось только в конце XVIII века. Труды многих ученых в XIX веке завершилось создание стройной науки, изучающей электрические и магнитные явления. Эта наука, которая является одним из важнейших разделов физики, получила название *электродинамики*.

*Основными объектами изучения в электродинамике являются электрические и магнитные поля, создаваемые электрическими зарядами и токами, а также явления, возникающие под действием электрических и магнитных полей.*

### Глава I. ЭЛЕКТРОСТАТИКА

#### § 1. Электрический заряд. Электризация тел

*Электрический заряд* — это физическая величина, характеризующая электромагнитные силовые взаимодействия частиц или тел.

Совокупность экспериментальных фактов позволяет сделать следующие выводы:

- существует два рода электрических зарядов, условно названных положительными и отрицательными;
- заряды могут передаваться от одного тела к другому. Электрический заряд не является неотъемлемой характеристикой данного тела, одно и то же тело в разных условиях может иметь разный заряд;
- одноименные заряды отталкиваются, разноименные — притягиваются.

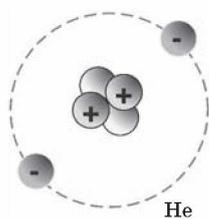


Рис. 1.1

**Элементарные частицы.** Все тела состоят из атомов, в состав которых входят положительно заряженные *протоны*, отрицательно заряженные *электроны* и нейтральные частицы — *нейтроны*. (рис. 1.1). Протоны и нейтроны входят в состав атомных ядер, электроны образуют электронную оболочку атомов.

Элементарные частицы протоны и электроны являются *носителями зарядов*.

Электрические заряды протона и электрона по модулю одинаковы и равны элементарному заряду:

$$e = 1,602177 \cdot 10^{-19} \text{ Кл} \approx 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл.}$$

Масса электрона равна  $m_e = 9,11 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$ .

Масса протона равна  $m_p = 1,67 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$ .

В нейтральном атоме число протонов в ядре равно числу электронов в оболочке. Это число называется *атомным номером*. Атом данного вещества может потерять один или несколько электронов или приобрести лишние электроны. В этих случаях нейтральный атом превращается в положительный или отрицательный ион.

**Электризация тел.** В результате трения или соприкосновения макроскопических тел друг с другом электроны переходят с одного тела на другое. Тело, потерявшее электроны, становится заряженным положительно, а тело, приобретшее электроны, — отрицательно. Такие тела называются наэлектризованными, или заряженными. Тело, заряженное отрицательно, строго говоря, увеличивает свою массу на суммарную массу приобретенных электронов  $\Delta m = n \cdot m_e$ , где  $n$  — количество электронов. Тело, заряженное положительно, строго говоря, уменьшает свою массу на массу потерянных электронов.

Заряженные тела взаимодействуют друг с другом. Одноименно заряженные тела отталкиваются, а разноименные — притягиваются.

Заряд может передаваться от одного тела к другому только порциями, содержащими целое число  $n$  элементарных зарядов. Электрический заряд тела — дискретная величина:

$$q = \pm ne \quad (n = 0, 1, 2, \dots).$$

Элементарный заряд  $e$  является квантом (наименьшей порцией) электрического заряда.

Единица электрического заряда в СИ — кулон. *Один кулон (1Кл) — это заряд, проходящий за 1с через поперечное сечение проводника при силе тока 1А: 1Кл = 1 А × 1 с.*

**Закон сохранения электрического заряда:** алгебраическая сумма электрических зарядов любой замкнутой системы (не обменивается зарядами с внешними телами) остается неизменной, какие бы процессы ни происходили внутри этой системы:

$$q_1 + q_2 + \dots + q_n = \text{const}, \text{ или } \sum_{i=1}^n q_i = \text{const}.$$

Электрические заряды возникают и исчезают только парами «+» и «-».

**Электрометр** — прибор для обнаружения и измерения электрических зарядов, состоящий из металлического стержня и стрелки, которая может вращаться вокруг горизонтальной оси, проходящей выше центра тяжести стрелки (рис. 1.2)

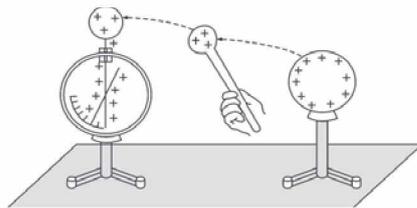


Рис. 1.2

Стержень со стрелкой изолирован от металлического корпуса. При соприкосновении заряженного тела со стержнем электрометра, электрические заряды одного знака распределяются по стержню и стрелке.

Силы электрического отталкивания вызывают поворот стрелки. Стрелка останавливается при таком угле, когда составляющая силы тяжести стрелки уравновесит силу электрического отталкивания.

По углу отклонения можно судить о величине заряда, переданного стержню электрометра.

## § 2. Взаимодействие точечных зарядов. Закон Кулона

Закон взаимодействия неподвижных зарядов был установлен французским физиком Ш. Кулоном (1785 г.).

Кулон измерял силы притяжения и отталкивания заряженных шариков с помощью сконструированного им прибора — крутильных весов, отличавшихся чрезвычайно высокой чувствительностью (рис. 1.3). Коромысло поворачивалось на  $1^\circ$  под действием силы порядка  $10^{-9}$  Н.

Если заряженный шарик привести в контакт с таким же незаряженным, то заряд первого разделится между ними поровну, таким образом можно изменять заряд шарика в два, три и т. д. раз.

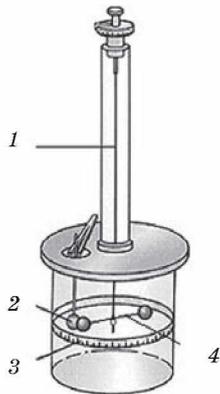


Рис. 1.3:

- 1 — тонкая кварцевая нить;
- 2 — заряженный шарик;
- 3 — шкала; 4 — коромысло

В опытах Кулона измерялось взаимодействие между шариками, размеры которых много меньше расстояния между ними. Такие заряженные тела принято называть *точечными зарядами* (рис. 1.4–1.5).

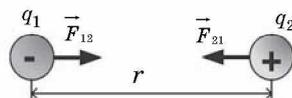


Рис. 1.4

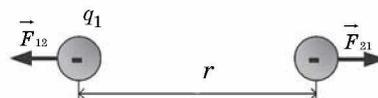


Рис. 1.5

*Точечным зарядом* называют заряженное тело, размерами которого в условиях данной задачи можно пренебречь.

**Закон Кулона:** *силы взаимодействия неподвижных зарядов прямо пропорциональны произведению модулей зарядов и обратно пропорциональны квадрату расстояния между ними:*

$$F = k \frac{|q_1||q_2|}{r^2},$$

где  $q_1$  и  $q_2$  — величины взаимодействующих точечных зарядов,  $r$  — расстояние между ними;  $k$  — коэффициент пропорциональности.

$$k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} = 9 \times 10^9 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{Кл}^2}; \quad \epsilon_0 = 8,85 \times 10^{-12} \frac{\text{Кл}^2}{\text{Н} \cdot \text{м}^2},$$

где  $\epsilon_0$  — электрическая постоянная.

Сила  $\vec{F}$  направлена вдоль прямой, соединяющей заряды, то есть является центральной силой. Она является силой отталкивания при одинаковых знаках заряда ( $F > 0$ ) (рис. 1.5) и силой притяжения при разных знаках ( $F < 0$ ) (рис. 1.4). В соответствии с третьим законом Ньютона сила, действующая на первый заряд со стороны второго,  $\vec{F}_{12}$  равна силе  $\vec{F}_{21}$ , действующей на второй заряд со стороны первого:  $\vec{F}_{12} = -\vec{F}_{21}$ .

Взаимодействие неподвижных электрических зарядов называется *электростатическим*.

**Принцип суперпозиции электростатических сил:** *если заряженное тело взаимодействует одновременно с несколькими заряженными телами, то результирующая сила, дей-*

ствующая на данное тело, равна векторной сумме сил, действующих на это тело со стороны всех других заряженных тел:  $\vec{F}_{\text{рез}} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \dots + \vec{F}_n$ , или  $\vec{F}_{\text{рез}} = \sum_{i=1}^n \vec{F}_i$ .

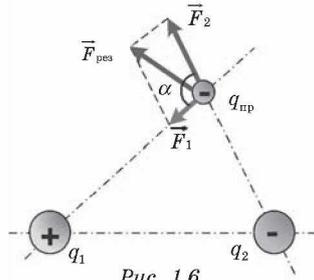


Рис. 1.6

Пример. Если некоторый пробный заряд  $q_{\text{пр}}$  одновременно взаимодействует с зарядами  $q_1$  и  $q_2$ , то результирующая сила  $F_{\text{рез}}$ , действующая на данный заряд, является векторной суммой сил  $\vec{F}_1$  и  $\vec{F}_2$ , действующих на заряд  $q_{\text{пр}}$  со стороны зарядов  $q_1$  и  $q_2$ :  $\vec{F}_{\text{рез}} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2$  (рис. 1.6).

Модуль определяется теоремой косинусов:

$$F_{\text{рез}} = \sqrt{F_1^2 + F_2^2 + 2F_1F_2 \cos \alpha}.$$

### § 3. Электрическое поле точечных зарядов

По современным представлениям в пространстве, окружающем электрические заряды, возникает электрическое поле. Поле неподвижных зарядов называется *электростатическим*.

На заряды, помещенные в электрическое поле, действует сила. Отношение силы, действующей на пробный заряд, помещенный в данную точку поля, к величине этого заряда называется *напряженностью электрического поля*:

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q_{\text{пр}}} \left( \frac{\text{Н}}{\text{Кл}} \right).$$

Напряженность — силовая характеристика поля. Напряженность поля — векторная величина. Направление вектора совпадает с направлением силы, действующей на положительный пробный заряд. Напряженность поля, создаваемого в вакууме точечным зарядом  $q$  на расстоянии  $r$  от него, в соответствии с законом Кулона, равна по модулю  $E = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 r^2}$ . Такое поле называется *кулоновским*.

Напряженность поля бесконечно протяженной **заряженной плоскости**:

$$E = 2\pi k\sigma = \frac{\sigma}{2\epsilon_0},$$

где  $\sigma = \frac{q}{S}$  — поверхностная плотность зарядов,  $\sigma \left( \frac{\text{Кл}}{\text{м}^2} \right)$ .

Электрическое поле длинной однородно **заряженной нити** на расстоянии  $R$  от нее:  $E = \frac{\tau}{2\pi\epsilon_0 R}$ , где  $\tau \left( \frac{\text{Кл}}{\text{м}} \right)$  — линейная плотность заряда.

**Принцип суперпозиции электрических полей:** напряженность электрического поля, создаваемого системой зарядов в данной точке пространства, равна векторной сумме напряженностей электрических полей, создаваемых в той же точке зарядами в отдельности:

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \dots + \vec{E}_n,$$

где  $\vec{E}_1, \vec{E}_2, \dots, \vec{E}_n$  — электрические поля, создаваемые в данной точке независимо каждым из зарядов системы (рис. 1.7).

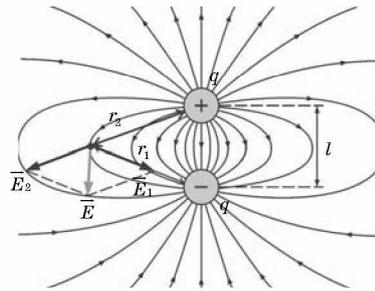
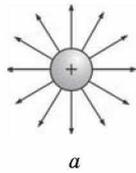


Рис. 1.7

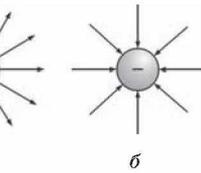
**Силовые линии** используются для графического представления электрического поля. Они проводятся так, что касательная к силовой линии в каждой точке совпадает с направлением вектора  $\vec{E}$  и «густота» силовых линий пропорциональна величине напряженности поля в данном месте пространства.

Силовые линии электрического поля не замкнуты, они начинаются на положительных зарядах и оканчиваются на отрицательных или в бесконечности, либо начинаются в бесконечности и оканчиваются на отрицательных зарядах. Силовые линии непрерывны и не пересекаются.

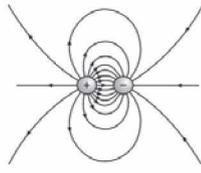
Картины силовых линий некоторых электрических полей показаны на рисунках 1.8–1.10.



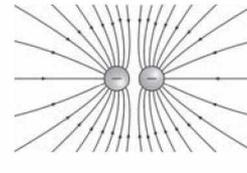
*a*



*б*



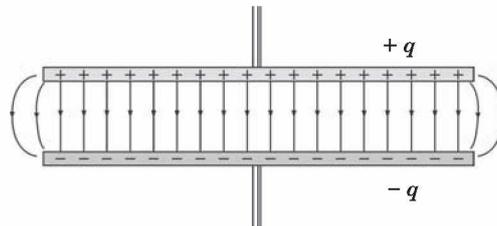
*Рис. 1.9*



*Рис. 1.10*

*Рис. 1.8*

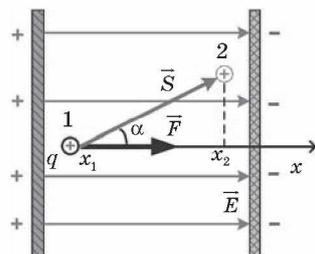
**Однородное поле.** Поле является однородным, если напряженность  $\vec{E}$  во всех точках поля одинакова (рис.1.11)



*Рис. 1.11*

Силовые линии таких полей параллельны друг другу и имеют одинаковую густоту во всем пространстве. Такое поле возникает между двумя параллельными пластинами, заряженными разноименными зарядами.

#### § 4. Работа поля. Потенциальная энергия



*Рис. 1.12*

**Работа при перемещении заряда в однородном электростатическом поле.** Однородное поле действует на заряд с постоянной силой  $\vec{F} = q\vec{E}$ .

Работа, совершаемая однородным полем, при перемещении положительного заряда  $q$  из точки 1 с координатой  $x_1$  в точку 2 с координатой  $x_2$  вдоль вектора перемещения  $\vec{S}$  равна:

$$A = FS \cos \alpha = qES \cos \alpha = qE(x_2 - x_1) = qE\Delta x,$$

где  $\alpha$  — угол между направлением действия силы  $\vec{F}$  (или  $\vec{E}$ ) и вектором перемещения  $\vec{S}$  (рис. 1.12).

Работа не зависит от формы траектории, зависит только от положения начальной и конечной точек. Работа на замкнутой траектории равна нулю.

**Работа при перемещении заряда в центральном (неоднородном) электростатическом поле.** Определим работу по перенесению заряда  $q_0$  в поле, созданное зарядом  $q$  из точки на расстоянии  $r_1$  в точку на расстоянии  $r_2$  от заряда  $q$  по произвольной траектории (рис. 1.13):

$$A = \int_{r_1}^{r_2} F(r) dr.$$

Интегрирование можно произвести, задав вид функции  $F(r)$ . В данном случае она является силой Кулона, поэтому работа равна:

$$A = \int_{r_1}^{r_2} kqq_0 \frac{dr}{r^2} = \frac{kqq_0}{r_1} - \frac{kqq_0}{r_2}. \quad (1)$$

Формула показывает, что работа не зависит от формы траектории, а зависит только от положения начальной и конечной точек ( $r_1, r_2$ ). Такие поля являются потенциальными, а силы — центральными и консервативными. Работа таких сил на замкнутой траектории равна нулю. Электростатическая сила является такой силой.

Тела в потенциальных полях обладают потенциальной энергией, а работа равна изменению потенциальной энергии со знаком минус (убыли):

$$A = -\Delta W_p = W_{p1} - W_{p2}. \quad (2)$$

Сравнивая формулы (1) и (2), получим выражение для потенциальной энергии:  $W_p = \frac{kqq_0}{r}$ .

Потенциальная энергия не может служить характеристикой поля, так как зависит от величины пробного заряда  $q_0$ .

## § 5. Потенциал

Величина, равная  $\frac{W_p}{q_0}$ , не зависит от величины пробного заряда  $q_0$  и является энергетической характеристикой поля, называемой **потенциалом**:  $\varphi = \frac{W_p}{q_0}$ .

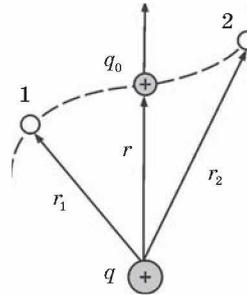


Рис. 1.13

Потенциал  $\varphi$  в какой-либо точке электростатического поля есть физическая величина, определяемая потенциальной энергией единичного положительного заряда, помещенного в эту точку.

Потенциал поля, создаваемого точечным зарядом  $q$ , равен:  $\varphi = \frac{kq}{r}$ , или  $\varphi = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{q}{r}$ .

Из формул  $W_p = q\varphi$  и  $A = W_{p1} - W_{p2}$  получим формулу работы в виде:  $A = q(\varphi_1 - \varphi_2)$ .

Пусть одна из точек находится в бесконечности  $r \rightarrow \infty$ . Тогда ее потенциал равен нулю  $\left(\varphi = \frac{kq}{r} \rightarrow \frac{kq}{\infty} \rightarrow 0\right)$ , а другой потенциал  $\varphi = \frac{A}{q}$ .

Потенциал поля в данной точке численно равен работе, которую совершает электрическое поле при удалении единичного положительного заряда из данной точки в бесконечность.

Потенциал является скалярной величиной. В системе СИ за единицу потенциала принимается один вольт (1В).

Потенциал равен одному вольту, если для удаления заряда 1Кл в бесконечность затрачивается работа в 1Дж:

$$1\text{В} = \frac{1\text{Дж}}{1\text{Кл}}.$$

## § 6. Эквипотенциальные поверхности

Поверхность, во всех точках которой потенциал электрического поля имеет одинаковые значения, называется **эквипотенциальной поверхностью**.

Силловые линии электрического поля (1) всегда перпендикулярны эквипотенциальным поверхностям (2) (рис. 1.14)

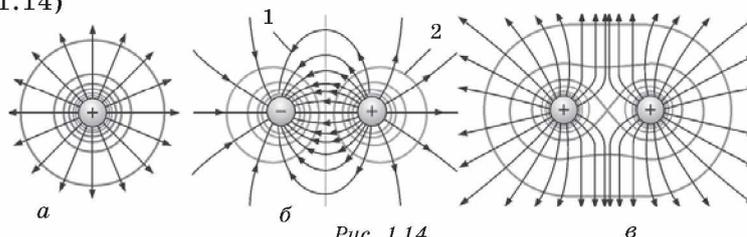


Рис. 1.14

Для точечного заряда эквипотенциальные поверхности будут иметь форму сферы. При пересечении этих поверхностей с плоскостью получаются эквипотенциальные линии. Поверхность заряженного проводника имеет одинаковый потенциал. Эквипотенциальные поверхности вблизи проводника напоминают по форме поверхность самого проводника.

На рисунке 1.14 *a* изображены эквипотенциальные линии поля, образованного положительным точечным зарядом, и линия напряженности  $\vec{E}$ .

Работа по перемещению заряда вдоль эквипотенциальной поверхности равна нулю:  $A = q_0(\varphi_1 - \varphi_2) = 0$  (так как  $\varphi_1 = \varphi_2$ ).

Докажем, что силовые линии электрического поля перпендикулярны эквипотенциальным поверхностям (рис. 1.15).

Если пробный заряд  $q_0$  перемещать по эквипотенциальной линии на  $\Delta l$ , работа на участке  $\Delta l$  равна нулю:

$$A = q_0(\varphi_1 - \varphi_2) = q_0 E \Delta l \cos \alpha = 0.$$

Следовательно,  $\cos \alpha = 0$  и  $\alpha = 90^\circ$ , линии напряженности перпендикулярны к эквипотенциальным поверхностям.

**Связь между напряженностью и разностью потенциалов** (рис. 1.16). Если перемещение  $\Delta l$  пробного заряда  $q_0$  происходит вдоль линии напряженности  $\vec{E}$ , то  $\alpha = 0$  и  $\cos \alpha = 1$ , тогда  $A = q_0(\varphi_1 - \varphi_2) = q_0 E \Delta l$ , откуда

$$E = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{\Delta l}.$$

Если перемещение происходит вдоль оси  $X$ , тогда заменим  $\Delta l = dx$  и учтем, что  $\varphi_1 - \varphi_2 = -d\varphi$ , тогда вы-

ражение  $E = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{\Delta l}$  примет вид

$$E_x = -\frac{d\varphi}{dx}.$$

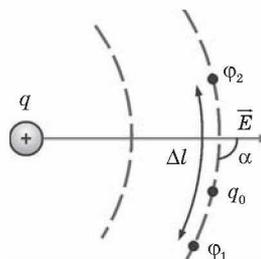


Рис. 1.15

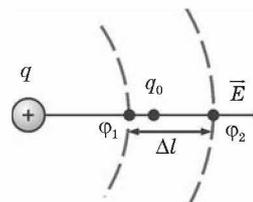


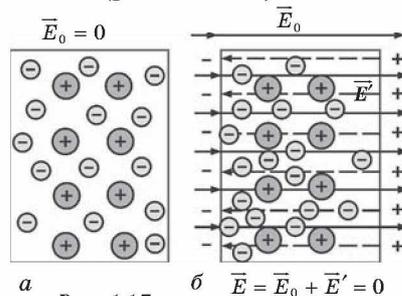
Рис. 1.16

Напряженность электростатического поля  $E$  численно равна изменению потенциала  $d\phi$  на единице расстояния, взятой со знаком минус.

Вектор  $\vec{E}$  направлен в сторону убывания потенциала.

## § 7. Проводники и диэлектрики в электрическом поле

**Проводники в электрическом поле.** Основная особенность проводников — наличие *свободных* зарядов (электронов), которые участвуют в тепловом движении и могут перемещаться по всему объему проводника. Типичные проводники — металлы. В отсутствие внешнего поля в любом элементе объема проводника отрицательный свободный заряд компенсируется положительным зарядом ионной решетки (рис. 1.17, а).



а Рис. 1.17

б  $\vec{E} = \vec{E}_0 + \vec{E}' = 0$

В проводнике, внесенном в электрическое поле, происходит перераспределение свободных зарядов, в результате чего на поверхности проводника возникают нескомпенсированные положительные и отрицательные заряды.

Этот процесс называют *электростатической индукцией*, а появившиеся на поверхности проводника заряды — *индукционными зарядами*.

Индукционные заряды создают свое собственное поле  $\vec{E}'$ , которое компенсирует внешнее поле  $\vec{E}_0$  во всем объеме проводника:  $\vec{E} = \vec{E}_0 + \vec{E}' = 0$  (рис. 1.17, б).

Полное электростатическое поле внутри проводника равно нулю, а потенциалы во всех точках одинаковы и равны потенциалу на поверхности проводника.

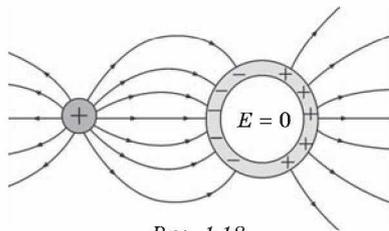


Рис. 1.18

Все внутренние области проводника, внесенного в электрическое поле, остаются электронейтральными (рис. 1.18).

Если удалить некоторый объем внутри про-

водника и образовать полость, то электрическое поле внутри полости будет равно нулю. На этом основана *электростатическая защита* — чувствительные к электрическому полю приборы для исключения влияния поля помещают в металлические ящики.

Так как поверхность проводника является эквипотенциальной, силовые линии у поверхности должны быть перпендикулярны к ней.

**Поле шара.** Напряженность  $E$  и потенциал  $\phi$  проводящего заряженного шара (или сферы) внутри и вне его (рис. 1.19) определяются по формулам:

$$E = 0, \text{ если } r < R; \quad \phi = \frac{kq}{R}, \text{ если } r \leq R;$$

$$E = \frac{kq}{r^2}, \text{ если } r \geq R; \quad \phi = \frac{kq}{r}, \text{ если } r > R,$$

где  $R$  — радиус шара;  $r$  — расстояние от данной точки до центра шара.

То есть *внутри* сферы напряженность поля равна нулю, а потенциал во всех точках внутри одинаков и такой же как на поверхности.

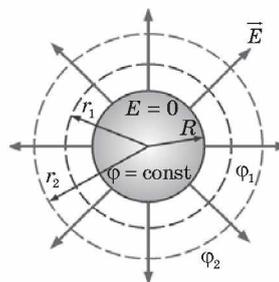


Рис. 1.19

*Снаружи* сферы напряженность и потенциал определяются как для точечного заряда, помещенного в центре сферы.

**Диэлектрики в электрическом поле.** В отличие от проводников, в диэлектриках (изоляторах) нет свободных электрических зарядов. Они состоят из нейтральных атомов или молекул. Заряженные частицы в нейтральном атоме связаны друг с другом и не могут перемещаться под действием электрического поля по всему объему диэлектрика.

При внесении диэлектрика во внешнее электрическое поле  $\vec{E}_0$  в нем возникает некоторое перераспределение зарядов, входящих в состав атомов или молекул. В результате такого перераспределения на поверхности диэлектрического образца появляются избыточные нескомпенсированные связанные заряды. Этот процесс называется *поляризацией диэлектрика*. Все заряженные частицы, образующие связанные заряды, по-прежнему входят в состав своих атомов.

Связанные заряды создают электрическое поле  $\vec{E}'$ , которое внутри диэлектрика направлено противоположно вектору напряженности  $\vec{E}_0$  внешнего поля. Результирующее

электрическое поле  $\vec{E}_{\text{рез}} = \vec{E}_0 + \vec{E}'$  внутри диэлектрика оказывается по модулю меньше внешнего поля  $\vec{E}_0$ .

Физическая величина, равная отношению модуля напряженности внешнего электрического поля в вакууме  $\vec{E}_0$  к модулю напряженности результирующего поля  $\vec{E}_{\text{рез}}$  в однородном диэлектрике, называется **диэлектрической проницаемостью вещества**:  $\varepsilon = \frac{E_0}{E_{\text{рез}}}$ .

Существует несколько механизмов поляризации диэлектриков.

**Ориентационная, или дипольная, поляризация** возникает в случае полярных диэлектриков, состоящих из молекул, у которых центры распределения положительных и отрицательных зарядов не совпадают. Такие молекулы представляют собой электрические диполи (рис. 1.20).

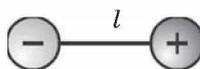
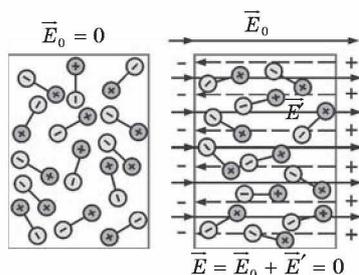


Рис. 1.20

**Электрический диполь** — это нейтральная совокупность двух точечных зарядов, равных по модулю и противоположных по знаку.

Дипольным моментом обладает молекула воды  $\text{H}_2\text{O}$  и молекулы некоторых других веществ ( $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{NO}_2$ ).

При отсутствии внешнего электрического поля оси молекулярных диполей ориентированы хаотично из-за теплового движения, так что на поверхности диэлектрика и в любом элементе объема электрический заряд в среднем равен нулю (рис. 1.21, а). При внесении диэлектрика во внешнее поле  $\vec{E}_0$  возникает частичная ориентация молекулярных диполей (рис. 1.21, б). В результате на поверхности диэлектрика появляются нескомпенсированные макроскопические связанные заряды, создающие поле  $\vec{E}'$ , направленное против внешнего поля  $\vec{E}_0$ .



а б

Рис. 1.21

Поляризация полярных диэлектриков сильно зависит от температуры, так как тепловое движение молекул играет роль дезориентирующего фактора.

**Электронный механизм поляризации** проявляется при

поляризации неполярных диэлектриков, молекулы которых не обладают в отсутствие внешнего поля дипольным моментом (рис. 1.22, а).

Под действием электрического поля молекулы неполярных диэлектриков деформируются — положительные заряды смещаются в направлении вектора  $\vec{E}_0$ , а отрицательные — в противоположном направлении (рис. 1.22, б).

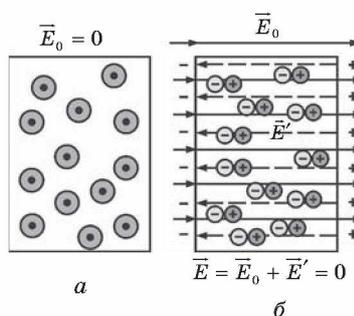


Рис. 1.22

В результате каждая молекула превращается в электрический диполь, ось которого направлена вдоль внешнего поля.

На поверхности диэлектрика появляются нескомпенсированные связанные заряды, создающие свое поле  $\vec{E}'$ , направленное против внешнего поля  $\vec{E}_0$ .

Деформация неполярных молекул под действием внешнего электрического поля не зависит от их теплового движения, поэтому поляризация неполярного диэлектрика не зависит от температуры.

Примером неполярной молекулы может служить молекула метана  $\text{CH}_4$ .

У многих неполярных молекул при поляризации деформируются электронные оболочки, поэтому этот механизм получил название *электронной поляризации*.

**Ионная поляризация.** В случае твердых кристаллических диэлектриков наблюдается *ионная поляризация*, при которой ионы разных знаков, составляющие кристаллическую решетку, при наложении внешнего поля смещаются в противоположных направлениях, вследствие чего на гранях кристалла появляются связанные (нескомпенсированные) заряды. Примером может служить поляризация кристалла  $\text{NaCl}$ , в котором ионы  $\text{Na}^+$  и  $\text{Cl}^-$  составляют две подрешетки, вложенные друг в друга. В отсутствие внешнего поля каждая *элементарная ячейка* кристалла  $\text{NaCl}$  электронейтральна и не обладает дипольным моментом. Во внешнем электрическом поле обе подрешетки смещаются в противоположных направлениях и кристалл поляризуется.

**Напряженность и потенциал электрического поля в диэлектрической среде.** Если в однородном диэлектрике с

диэлектрической проницаемостью  $\varepsilon$  находится точечный заряд  $q$ , то напряженность поля  $\vec{E}$ , создаваемого этим зарядом в некоторой точке, и потенциал  $\varphi$  в  $\varepsilon$  раз меньше, чем в вакууме:  $E = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \cdot \frac{q}{\varepsilon r^2}$ ,  $\varphi = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \cdot \frac{q}{\varepsilon r}$ .

## § 8. Электроемкость. Конденсаторы

Опытом установлено, что при сообщении проводнику электрического заряда изменяется его потенциал  $\varphi$ . Для уединенного проводника эта зависимость имеет вид:  $q = C\varphi$ .

*Уединенным проводником* называют такой проводник, вблизи которого нет других тел, влияющих на распределение электрического заряда. Постоянная величина  $C$ , характерная для данного проводника, называется *электроемкостью* или просто *емкостью*:  $C = \frac{q}{\varphi}$ .

*Емкость проводника численно равна заряду, изменяющему потенциал проводника на единицу.*

За единицу емкости в системе СИ принимается фарада

$$(\Phi): 1\Phi = \frac{1\text{Кл}}{1\text{В}}.$$

*Фарада — это емкость такого проводника, для которого заряд в 1 Кл изменяет его потенциал на 1 В.*

Получим формулу емкости шара, используя формулу для потенциала уединенного шара радиуса  $R$  в среде с диэлектрической проницаемостью  $\varepsilon$ :

$$\varphi = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \frac{q}{\varepsilon R}$$

подставим в  $C = \frac{q}{\varphi}$ , получим  $C = 4\pi\varepsilon_0\varepsilon R$  — емкость шара.

Из этой формулы видно, что емкость в одну фараду в вакууме должен иметь шар размером  $R = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} = k = 9 \times 10^9$  м, что в 1400 раз больше радиуса Земли.

Фарада — очень крупная единица, поэтому пользуются дольными единицами емкости: микрофарада —  $1\text{мк}\Phi = 10^{-6}\Phi$ , пикофарада —  $1\text{п}\Phi = 10^{-12}\Phi$ .

Емкость проводника зависит от его формы, размеров его поверхности, от диэлектрической проницаемости окружающей среды и от расположения окружающих проводников.

Большая емкость проводника позволяет накапливать большие заряды при низком потенциале. Большими емкостями обладают системы проводников, разделенных диэлектриком. Такие системы называются конденсаторами. Широкое применение в технике имеют конденсаторы постоянной емкости. Такие конденсаторы изготавливаются из большого числа станиолевых пластин, проложенных тонким слоем диэлектрика.

**Плоский конденсатор** состоит из двух параллельных друг другу проводящих пластин (обкладок), расположенных на некотором расстоянии  $d$  друг от друга (рис. 1.23).

Это расстояние обычно выбирается достаточно малым по сравнению с линейными размерами пластин. В этом случае электрическое поле сосредоточено в основном между обкладками конденсатора. В этой области его можно считать приближенно однородным.

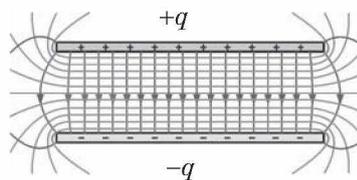


Рис. 1.23

Емкость конденсатора — это емкость одной пластины в присутствии другой. За счет заряда противоположного знака на второй пластине потенциал первой пластины уменьшается и, следовательно, емкость возрастает.

Под емкостью конденсатора понимают отношение заряда одной пластины к разности потенциалов между пластинами:

$$C = \frac{q}{\varphi_1 - \varphi_2}.$$

Каждая из заряженных пластин плоского конденсатора создает вблизи поверхности электрическое поле, модуль напряженности которого выражается соотношением:

$$E_1 = \frac{\sigma}{2\varepsilon_0}.$$

Согласно принципу суперпозиции, напряженность  $\vec{E}$  поля, создаваемого обеими пластинами, равна сумме напряженностей  $\vec{E}^+$  и  $\vec{E}^-$  полей каждой из пластин:  $\vec{E} = \vec{E}^+ + \vec{E}^-$ .

Внутри конденсатора векторы  $\vec{E}^+$  и  $\vec{E}^-$  параллельны и направлены в одну сторону, поэтому модуль напряженности суммарного поля равен  $E = 2E_1 = \frac{\sigma}{\varepsilon_0}$ .

Вне пластин векторы  $\vec{E}^+$  и  $\vec{E}^-$  направлены в разные стороны, и поэтому  $E = 0$ .

Заряд на одной из пластин  $q = 2\sigma S$ . Поверхностная плотность  $\sigma$  заряда пластин равна  $q/S$ , где  $q$  — заряд, а  $S$  — площадь каждой пластины.

Разность потенциалов  $\Delta\varphi$  между пластинами в однородном электрическом поле равна  $Ed$ , где  $d$  — расстояние между пластинами.

Из этих соотношений можно получить формулу для емкости плоского конденсатора:

$$C = \frac{q}{\Delta\varphi} = \frac{\sigma \cdot S}{E \cdot d} = \frac{\varepsilon_0 S}{d}.$$

*Емкость плоского конденсатора прямо пропорциональна площади пластин (обкладок) и обратно пропорциональна расстоянию между ними.*

Если пространство между обкладками заполнено диэлектриком, емкость конденсатора увеличивается в  $\varepsilon$  раз:

$$C = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 S}{d}.$$

**Сферический конденсатор** — это система из двух концентрических проводящих сфер радиусов  $R_1$  и  $R_2$  (рис. 1.24):

$$C = 4\pi\varepsilon_0\varepsilon \frac{R_1 R_2}{R_2 - R_1}.$$

**Цилиндрический конденсатор** — система из двух соосных проводящих цилиндров радиусов  $R_1$  и  $R_2$  и длины  $L$  (рис. 1.25):

$$C = 2\pi\varepsilon_0\varepsilon \frac{L}{\ln R_2 / R_1}.$$

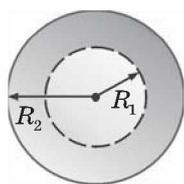


Рис. 1.24

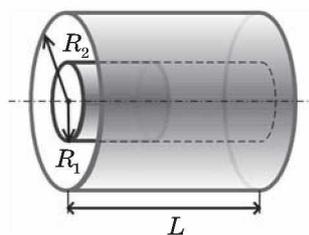


Рис. 1.25

## § 9. Соединение конденсаторов

Конденсаторы могут быть соединены в батареи последовательно и параллельно.

При **последовательном** соединении отрицательная обкладка одного конденсатора соединяется с положительной обкладкой следующего конденсатора (рис. 1.26).

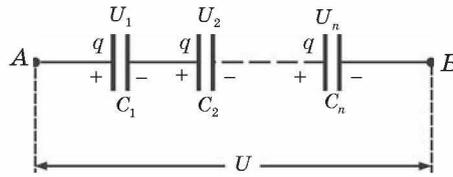


Рис. 1.26

Количество электричества (заряд) на пластинах будет численно одинаковым:  $q_1 = q_2 = \dots q_n = q = \text{const}$ .

Напряжение  $U$ , приложенное к системе, распределяется между отдельными конденсаторами, т.е.

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

Из определения емкости:

$$U_1 = \frac{q}{C_1}, \quad U_2 = \frac{q}{C_2}, \quad U_n = \frac{q}{C_n}, \quad U = \frac{q}{C}, \quad (2)$$

где  $C$  — результирующая емкость.

Подставляя формулы (2) в (1), получим:

$$\frac{q}{C} = \frac{q}{C_1} + \frac{q}{C_2} + \dots + \frac{q}{C_n} \Rightarrow \frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_n}, \text{ или } \frac{1}{C} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{C_i}.$$

При **параллельном** соединении положительные обкладки соединяются с положительными, а отрицательные — с отрицательными (рис. 1.27).

Напряжения между пластинами конденсаторов равны разности потенциалов точек  $A$  и  $B$ , поэтому равны между собой:

$$\begin{aligned} U_1 = U_2 = \dots U_n = U = \varphi_A - \varphi_B; \\ q_1 = C_1 U; \quad q_2 = C_2 U; \quad q_n = C_n U; \\ q = CU. \end{aligned} \quad (1)$$

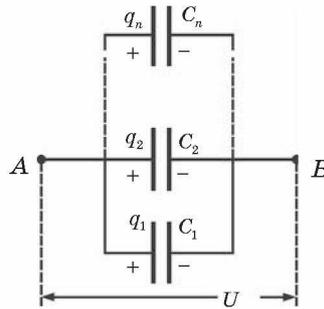


Рис. 1.27

Заряд системы параллельно соединенных конденсаторов равен сумме зарядов каждого конденсатора:

$$q = q_1 + q_2 + \dots + q_n. \quad (2)$$

Подставляя формулы (1) в (2), получим:

$$C = C_1 + C_2 + \dots + C_n, \text{ или } C = \sum_{i=1}^n C_i.$$

При параллельном соединении емкости складываются.

Поскольку в конденсаторе между обкладками находится слой диэлектрика, то постоянный ток через конденсатор не проходит.

Переменный ток может течь в цепи, содержащей конденсатор, и представляет собой многократную перезарядку конденсатора.

## § 10. Энергия электрического поля

Энергия заряженного конденсатора равна работе внешних сил, которую необходимо затратить, чтобы зарядить конденсатор.

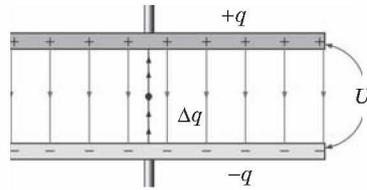


Рис. 1.28

Процесс зарядки конденсатора можно представить как последовательный перенос достаточно малых порций заряда  $\Delta q > 0$  с одной обкладки на другую (рис. 1.28).

При этом одна обкладка постепенно заряжается положительным зарядом, а другая — отрицательным. Поскольку каждая порция переносится в условиях, когда на обкладках уже имеется некоторый заряд  $q$ , а между ними существует некоторая разность потенциалов  $U = \frac{q}{C}$ , при переносе каждой порции  $\Delta q$  внешние силы должны совершить работу:  $\Delta A = U \Delta q = \frac{q \Delta q}{C}$ .

Энергия  $W_k$  конденсатора емкости  $C$ , заряженного зарядом  $Q$ , может быть найдена путем интегрирования этого выражения в пределах от 0 до  $Q$ :  $W_k = A = \frac{Q^2}{2C}$ .

Формулу энергии заряженного конденсатора можно также получить, используя график линейной зависимости  $q(U)$ , так как  $q = CU$ :

$$W_{\kappa} = A = q_{cp} U = \frac{(0 + Q) \cdot U}{2} = \frac{QU}{2}.$$

Работа численно равна площади выделенного треугольника на графике (рис. 1.29). Таким образом, если воспользоваться соотношением  $Q = CU$ , энергию заряженного конденсатора можно задать эквивалентными формулами:

$$W_{\kappa} = \frac{Q^2}{2C} = \frac{CU^2}{2} = \frac{QU}{2}.$$

Электрическую энергию  $W_{\kappa}$  следует рассматривать как потенциальную энергию, запасенную в заряженном конденсаторе.

Электрическая энергия конденсатора локализована в пространстве между обкладками конденсатора, то есть в электрическом поле. Поэтому ее называют энергией электрического поля.

**Объемная плотность электрической энергии.** Напряженность однородного поля в плоском конденсаторе равна  $E = U/d$ , а его емкость  $C = \frac{\epsilon \epsilon_0 S}{d}$ . Поэтому

$$W_{\kappa} = \frac{CU^2}{2} = \frac{\epsilon_0 \epsilon S E^2 d^2}{2d} = \frac{\epsilon_0 \epsilon E^2}{2} V,$$

где  $V = Sd$  — объем пространства между обкладками, занятый электрическим полем. Из этого соотношения следует, что физическая величина является электрической (потенциальной) энергией единицы объема пространства,

в котором создано электрическое поле:  $w = \frac{W_{\kappa}}{V} = \frac{\epsilon_0 \epsilon E^2}{2}$ , значит,  $w \sim \epsilon$ ,  $w \sim E^2$ .

$w$  называют *объемной плотностью электрической энергии*.

**Сила взаимодействия пластин конденсатора.** Используя выражение для энергии  $W_{\kappa} = \frac{Q^2}{2C} = \frac{Q^2}{2\epsilon_0 \epsilon S} x$ , можно най-

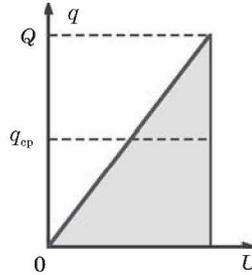


Рис. 1.29

ти механическую силу, с которой пластины конденсатора притягиваются друг к другу:

$$F = -\frac{dW}{dx} = -\frac{Q^2}{2\epsilon_0\epsilon S}.$$

Знак «-» указывает, что сила  $F$  стремится уменьшить расстояние между пластинами  $x$ , то есть является силой притяжения.

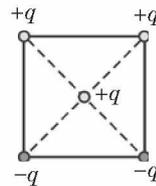
### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ К ГЛАВЕ I

1. Что такое элементарный заряд?
2. Сформулируйте закон сохранения электрического заряда.
3. Что значит «тело заряжено положительно»; «отрицательно»?
4. Сформулируйте закон Кулона. Сравните закон Кулона и закон всемирного тяготения.
5. Дайте определение напряженности электростатического поля. Как направлен вектор напряженности?
6. В чем заключается принцип суперпозиции полей?
7. Как определяется работа электростатического поля по перенесению заряда?
8. Дайте определение потенциала электростатического поля.
9. Напишите формулы напряженности и потенциала для точечных зарядов.
10. Как связаны между собой напряженность поля и потенциал?
11. Чему равна напряженность поля плоскости? Что такое поверхностная плотность зарядов?
12. Дайте определение силовых линий электростатического поля.
13. Нарисуйте картину силовых линий двух положительных зарядов.
14. Дайте определение эквипотенциальной поверхности. Чему равна работа по перенесению заряда вдоль эквипотенциальной поверхности?
15. Докажите, что силовые линии электростатического поля перпендикулярны к эквипотенциальным поверхностям.
16. В чем принцип электростатической защиты?
17. Чему равны напряженность и потенциал внутри и снаружи проводящей заряженной сферы?
18. Что называется диэлектрической проницаемостью среды?
19. Что называется емкостью и в каких единицах она измеряется?
20. Что называется конденсатором? Приведите типы конденсаторов.
21. От чего зависит емкость конденсатора? Выведите формулу емкости плоского конденсатора.

22. Чему равна емкость при последовательном и параллельном соединении конденсаторов?
23. Какой радиус  $R$  должен иметь проводящий шар, чтобы его емкость в вакууме равнялась одной фараде?
24. Имея два одинаковых конденсатора, как получить емкость в два раза большую и в два раза меньшую, чем у одного из них?
25. Как определяется энергия конденсатора?

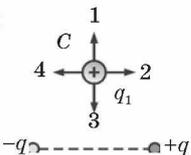
### ТЕСТОВЫЕ ЗАДАНИЯ К ГЛАВЕ I

1. (00/9-68). От капли с зарядом  $+2q$  отделилась капля с зарядом  $-q$ . Каков электрический заряд оставшейся капли?
- A)  $-3q$ .    B)  $-q$ .    C)  $+3q$ .    D)  $+2q$ .    E)  $+q$ .
2. (00/5-39). Тело имеет  $1,2 \cdot 10^4$  излишних электронов. Определите его заряд (в кулонах).
- A)  $4 \cdot 10^{-14}$ .    C)  $1,92 \cdot 10^{-15}$ .    E)  $1,6 \cdot 10^{-14}$ .  
 B)  $1,6 \cdot 10^{-19}$ .    D)  $1,2 \cdot 10^{-19}$ .
3. (03/4-15). Во сколько раз увеличится сила, действующая на каждый из двух одинаковых точечных зарядов, если посредине между ними расположить третий такой же заряд?
- A) 2.    B) 4.    C) 5.    D) 8.    E) 16.
4. (01/2-40). Сила кулоновского отталкивания между двумя телами, заряженными одинаковыми зарядами, при перенесении половины заряда с одного тела на другое ...
- A) не изменится.    D) увеличится в 1,33 раза.  
 B) уменьшится в 1,33 раза.    E) увеличится в 3/2 раза.  
 C) уменьшится в 3/2 раза.
5. (03/11-17). В вершинах квадрата расположены точечные заряды  $+q$ ,  $+q$ ,  $-q$ ,  $-q$ . Куда направлена сила  $\vec{F}$ , действующая на положительный заряд  $+q$ , расположенный в центре квадрата?
- A) вниз.    B) влево.    C) вправо.    D) вверх.  
 E)  $F = 0$ .
6. (00/10-43). Как изменится сила взаимодействия двух точечных зарядов при увеличении каждого из них и расстояния между ними в 4 раза?
- A) увеличится в 16 раз.    D) уменьшится в 16 раз.  
 B) уменьшится в 4 раза.    E) не изменится.  
 C) увеличится в 4 раза.



7. (98/3-33). В точку  $C$  поля, создаваемого двумя равными по модулю, но разноименными зарядами  $+q$  и  $-q$ , вносится положительный заряд  $q_1$ . Как направлена сила, действующая на заряд  $q_1$ ?

- А)  $F = 0$ .    В) 1.    С) 2.    D) 3.    E) 4.

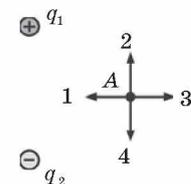


8. (99/6-5). Радиус орбиты электрона в атоме водорода  $0,5 \cdot 10^{-8}$  см. С какой силой (в нН) взаимодействует электрон с ядром атома водорода?

- А) 92,3.    В) 5,76.    С) 8.    D) 1,14.    E) 1.

9. (99/2-24). Какое направление в точке  $A$  имеет вектор напряженности электростатического поля двух разноименных, одинаковых по модулю точечных зарядов  $q_1$  и  $q_2$ , расположенных как показано на рисунке?

- А) 1.    В) 2.    С) 3.    D) 4.    E)  $E = 0$ .



10. (00/10-46). Как направлены линии напряженности электрического поля у поверхности заряженного проводника?

- А) нормально к поверхности.  
 В) касательно к поверхности.  
 С) под произвольным углом к поверхности.  
 D) никак, так как на поверхности  $E = 0$ .  
 E) ответ зависит от знака заряда.

11. (01/12-63). Вектор напряженности электрического поля точечного заряда в рассматриваемой точке задан с помощью проекций  $E_x = 40$  В/м и  $E_y = -30$  В/м. Найдите модуль напряженности поля в данной точке (В/м).

- А) 30.    В) 40.    С) 60.    D) 1200.    E) 50.

12. (00/9-71). Как располагаются линии напряженности электростатического поля по отношению к эквипотенциальным поверхностям?

- А) касательно к поверхности, в произвольном направлении.  
 В) нормально к поверхности, в сторону увеличения потенциала.  
 С) под произвольным углом к поверхности, в сторону уменьшения потенциала.  
 D) нормально к поверхности, в сторону уменьшения потенциала.  
 E) под произвольным углом к поверхности, в сторону увеличения потенциала.

13. (99/9-7). Как изменится напряженность электрического поля на внешней поверхности сферы при неизменной поверхностной плотности заряда, если увеличить радиус сферы в 6 раз?

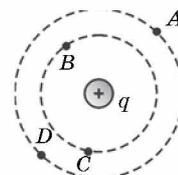
- А) увеличится в 36 раз.    D) уменьшится в 36 раз.  
 В) уменьшится в 6 раз.    E) не изменится.  
 С) увеличится в 6 раз.

14. (99/1-25). Внутри заземленной металлической сферы внесен заряженный шарик, который не касается стенок сферы. Какое утверждение о напряженности электрического поля внутри  $E_1$  и вне  $E_2$  сферы справедливо?

- А)  $E_1 \neq 0$ ,  $E_2 \neq 0$ .      С)  $E_1 = 0$ ,  $E_2 \neq 0$ .  
 В)  $E_1 = E_2 = 0$ .      Д)  $E_1 \neq 0$ ,  $E_2 = 0$ .

15. (98/5-26). На рисунке изображены две эквипотенциальные линии вокруг заряда  $q$ . Сравните работы по перемещению заряда  $q_1$  в поле заряда  $q$  из точки  $A$  в точки  $B(A_1)$ ,  $C(A_2)$ , и  $D(A_3)$ .

- А)  $A_1 = A_2 < A_3$ .      С)  $A_1 < A_2 < A_3$ .  
 В)  $A_1 = A_2$ ,  $A_3 = 0$ .      Д)  $A_1 < A_2 = A_3$ .



16. (03/5-53). Определите потенциал (В) шара радиусом 0,2 м и зарядом  $10^{-8}$  Кл, расположенного в керосине. Диэлектрическая проницаемость керосина равна 2.

- А) 300.      В) 225.      С) 210.      Д) 180.      Е) 200.

17. (03/9-49). Как изменятся кинетическая и потенциальная энергии положительно заряженной частицы, если она под действием сил поля переходит из точки с большим потенциалом в точку с меньшим потенциалом?

- А) кинетическая — уменьшится, потенциальная — увеличится.  
 В) уменьшатся.  
 С) кинетическая — увеличится, потенциальная — не изменится.  
 Д) увеличатся.  
 Е) кинетическая — увеличится, потенциальная — уменьшится.

18. (03/11-22). Каково соотношение между потенциалами  $\phi_1$  и  $\phi_2$  точек, расположенных на расстоянии 10 и 20 см от поверхности шара радиусом 10 см, заряженного положительно? Считать, что потенциал равен нулю в бесконечности.

- А)  $\phi_2 = 1,5 \phi_1$ .      С)  $\phi_1 = \phi_2$ .      Е)  $\phi_2 = 4 \phi_1$ .  
 В)  $\phi_1 = 4 \phi_2$ .      Д)  $\phi_1 = 1,5 \phi_2$ .

19. (03/8-31). Металлическая сфера радиусом 3 см имеет заряд  $-1$  нКл. Каков потенциал (В) в точке, расположенной на расстоянии 1,5 см от центра сферы? Считайте, что потенциал равен нулю в бесконечности.  $k = 9 \cdot 10^9$  Н·м<sup>2</sup>/Кл<sup>2</sup>.

- А) 0.      В) -30.      С) -300.      Д) +300.      Е) -150.

20. (03/5-52). Какую работу (Дж) совершает электростатическое поле при перемещении положительного заряда  $2 \cdot 10^{-7}$  Кл из точки с потенциалом 40 В в точку с потенциалом  $-10$  В?

- А)  $2 \cdot 10^{-5}$ .      С)  $1 \cdot 10^{-5}$ .      Е)  $1 \cdot 10^{-7}$ .  
 В)  $6 \cdot 10^{-6}$ .      Д)  $6 \cdot 10^{-7}$ .

21. (03/7-45). Определите заряд (Кл) металлического шарика радиусом 1 см, поверхностная плотность заряда которого равна  $5 \cdot 10^{-5}$  Кл/м<sup>2</sup>.

- А)  $6,28 \cdot 10^{-5}$ .      С)  $3,14 \cdot 10^{-5}$ .      Е)  $3,14 \cdot 10^{-7}$ .  
В)  $3,14 \cdot 10^{-8}$ .      D)  $6,28 \cdot 10^{-8}$ .

22. (03/11-19). Электрон влетает в однородное электрическое поле противоположно силовым линиям. Как изменится скорость электрона?

- А) уменьшится.  
В) не изменится.  
С) увеличится.  
D) ответ зависит от начальной скорости электрона.  
Е) ответ зависит от напряженности поля.

23. (01/12-66). Точечный заряд на расстоянии  $r_0$  создает поле с потенциалом  $\varphi_0$ . Определите потенциал на расстоянии  $4r_0$  от заряда.

- А)  $\varphi_0/4$ .      В)  $r_0 \varphi_0$ .      С)  $4r_0 \varphi_0$ .      D)  $4 \varphi_0$       Е) 0.

24. (99/6-8). Как изменится напряженность в некоторой точке электрического поля точечного заряда при уменьшении потенциала в этой точке в 5 раз?

- А) уменьшится в 25 раз.      D) увеличится в 5 раз.  
В) увеличится в 25 раз.      Е) не изменится.  
С) уменьшится в 5 раз.

25. (00/5-41). Точечные заряды  $q_1 = -10$  нКл и  $q_2 = 20$  нКл находятся на расстоянии 42 см друг от друга. На каком расстоянии от второго заряда (в см) на линии, соединяющей эти заряды, потенциал поля равен нулю?

- А) 12; 30.      В) 15; 42.      С) 20; 54.      D) 28; 84.      Е) 30; 42.

26. (99/1-31). Три шара радиусами  $R_1 < R_2 < R_3$  заряжены одинаковыми положительными зарядами. Каково соотношение потенциалов на поверхности этих шаров?

- А)  $\varphi_1 = \varphi_2 = \varphi_3$ .      С)  $\varphi_1 > \varphi_2 < \varphi_3$ .      Е)  $\varphi_1 > \varphi_2 > \varphi_3$ .  
В)  $\varphi_1 < \varphi_2 < \varphi_3$       D)  $\varphi_1 < \varphi_3 > \varphi_2$ .

27. (00/6-32). Поверхностная плотность заряда сферы радиусом  $R$  равна  $\sigma$ . Определите потенциал внутри сферы.

- А)  $\frac{\sigma}{\varepsilon_0 R}$ .      В)  $\frac{\sigma R}{\varepsilon_0}$ .      С)  $\frac{\sigma}{2\varepsilon_0 R}$ .      D)  $\frac{\sigma}{\varepsilon_0 R^2}$ .      Е) 0.

28. (99/1-28). 8 одинаковых капель ртути радиусами 1 мм и зарядами  $10^{-12}$  Кл каждая слились в одну каплю. Определите потенциал образовавшейся капли (в вольтах).

- А) 42.      В) 38.      С) 36.      D) 28.      Е) 45.

29. (00/6-33). Каким будет отношение поверхностных плотностей заряда  $\sigma_1$  и  $\sigma_2$  после соприкосновения заряженного шара радиусом  $R$  с незаряженным шаром радиуса  $2R$ ?

- А)  $\sigma_1 = 4\sigma_2$ .      С)  $\sigma_1 = \sigma_2$ .      Е)  $\sigma_2 = 4\sigma_1$ .  
 В)  $\sigma_2 = 2\sigma_1$ .      D)  $\sigma_1 = 2\sigma_2$

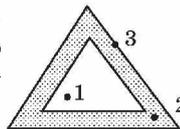
30. (00/6-34). Во сколько раз уменьшится потенциал заряженного шара радиусом  $R$  после соприкосновения его с незаряженным шаром радиуса  $2R$ ?

- А) 3.      В) 2.      С) 1,5.      D) 1,2.      Е) не изменится.

31. (04/9-32). Две параллельные пластинки, расстояние между которыми 15 см, заряжены до напряжения 2 кВ. Какая сила (в ньютонах) действует на заряд  $3 \cdot 10^{-4}$  Кл, находящийся между пластинками?

- А) 2.      В) 3.      С) 9.      D) 4,5.      Е) 4.

32. (04/9-33). Полое тело, сечение которого изображено на рисунке, заряжено. Определите соотношение между потенциалами точек 1, 2 и 3.



- А)  $\varphi_1 = \varphi_2 = 0$ ;  $\varphi_3 \neq 0$ .      D)  $\varphi_1 < \varphi_2 < \varphi_3$ .  
 В)  $\varphi_1 = \varphi_2 = \varphi_3$ .      Е)  $\varphi_2 = 0$ ;  $\varphi_1 = \varphi_3 \neq 0$ .  
 С)  $\varphi_1 = 0$ ;  $\varphi_2 = \varphi_3 \neq 0$ .

33. (98/11-5). Какова напряженность электрического поля в точке, находящейся на расстоянии 5 см от центра металлического шара радиусом 6 см и зарядом 25 нКл?

- А) 450 кВ/м.      В) 900 В/м.      С) 0.      D) 90 кВ/м.      Е) 9 кВ/м.

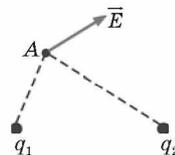
34. (02/11- ). Какое значение покажет электрометр для разности потенциалов, если ось вращения проходит через центр тяжести стрелки электрометра?

- А) в 2 раза уменьшенное значение.  
 В) в 2 раза увеличенное значение.  
 С) нулевое значение.  
 D) истинное значение.  
 Е) максимальное значение по шкале.

35. (01/8-27). Чему равно (в  $\text{м/с}^2$ ) ускорение электрона, движущегося в электрическом поле напряженностью  $9,1 \cdot 10^4$  В/м?

- $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл;  $m = 9,1 \cdot 10^{-31}$  кг.  
 А)  $1,4 \cdot 10^{15}$ .      С)  $8,3 \cdot 10^{16}$ .      Е)  $1,6 \cdot 10^{23}$ .  
 В)  $1,6 \cdot 10^4$ .      D)  $1,6 \cdot 10^{16}$ .

36. (01/11-49). На рисунке показан вектор напряженности электрического поля, созданного зарядами  $q_1$  и  $q_2$  в точке  $A$ . Определите знаки зарядов  $q_1$  и  $q_2$ .

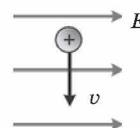


- А) невозможно определить.      D)  $q_1(-); q_2(+)$ .  
 B)  $q_1(+); q_2(+)$ .                      E)  $q_1(+); q_2(-)$ .  
 C)  $q_1(-); q_2(-)$ .

37. (01/8-33). В электрическом поле скорость электрона возросла с  $1 \cdot 10^7$  до  $5 \cdot 10^7$  м/с. Чему равна разность потенциалов между конечной и начальной точками (в кВ)? Отношение заряда электрона к его массе равно  $1,76 \cdot 10^{11}$  Кл/кг.

- А) 3,4.      B) 4.      C) 6.      D) 1,76.      E) 6,8.

38. (01/1-75). На рисунке показано направление скорости положительно заряженной частицы в однородном электрическом поле. Сила, которая действует на частицу со стороны поля, направлена:



- А) вправо.      C) на нас.      E) вниз.  
 B) вверх.      D) влево.

39. (01/2-34). Время, которое потребуется электрону массой  $m$ , зарядом  $e$ , влетевшему со скоростью  $v$  в однородное электрическое поле с напряженностью  $E$  параллельно силовым линиям, до полной остановки равно ...

- А)  $m v^2 / eE$ .      B)  $m v / eE^2$ .      C)  $m v / eE$ .      D)  $m v^2 / 2eE$ .      E)  $2m v / eE$ .

40. (11-20). Каково ускорение (м/с<sup>2</sup>) пылинки массой 0,1 мкг и зарядом +1 нКл, находящейся в электрическом поле напряженностью  $E = 2000$  В/м?  $E$  направлена вертикально вверх.

- А) 0,5.      B) 2.      C) 4.      D) 5.      E) 10.

41. (8-78). Два одноименных точечных заряда по 2 нКл каждый находятся на расстоянии 20 см друг от друга. Каков потенциал поля (В) в точке, находящейся посередине между ними?

- А) 720.      B) 360.      C) 320.      D) 180.      E) 0.

42. (8-28). Два одинаковых точечных заряда по 1 нКл расположены на расстоянии 5 дм друг от друга. Какова напряженность электрического поля (В/м) в точке, находящейся на расстоянии 3 дм от первого заряда и 4 дм от второго?  $k = 9 \cdot 10^9$  м/Ф.

- А) 50.      B) 56.      C) 100.      D) 115.      E) 125.

43. (03/11-23). Два разноименных заряда создают в одной точке пространства потенциалы +100 В и -200 В. Каков общий потенциал в этой точке (В)?

- А) -100.      B) -50.      C) 100.      D) 150.      E) 300.

44. (5-36). Каким будет потенциал большой шарообразной капли, полученной слиянием  $n$  малых одинаковых капель, заряженных до потенциала  $\phi_0$ ?

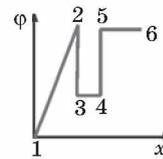
- А)  $n^2 \phi_0$ .      B)  $n \phi_0$ .      C)  $\sqrt[3]{n \phi_0}$ .      D)  $\sqrt{n^3 \phi_0}$ .      E)  $\sqrt[3]{n^2 \phi_0}$ .

45. (01/1-54). Если два металлических шарика одинакового радиуса, находящихся на большом расстоянии друг от друга и заряженных соответственно до потенциалов  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$ , соединить тонким проводом, то общий потенциал на шариках будет равен ...

- A)  $(\varphi_1 - \varphi_2)/2$ .      C)  $\frac{\varphi_1 \varphi_2}{\varphi_1 + \varphi_2}$ .      E)  $\frac{2\varphi_1 \varphi_2}{\varphi_1 + \varphi_2}$ .  
 B)  $\varphi_1 + \varphi_2$ .      D)  $(\varphi_1 + \varphi_2)/2$ .

46. (01/1-58). На рисунке представлен график зависимости потенциала некоторого электрического поля от координаты. Напряженность поля равна нулю на участках ...

- A) 4-5.      D) 3-4, 4-5, 5-6.  
 B) 3-4, 5-6.      E) 2-3, 4-5.  
 C) 1-2, 2-3.



47. (04/2-56). Какие из следующих единиц можно использовать в качестве единицы емкости: 1) Ф; 2) Кл<sup>2</sup>/Дж; 3) Дж/В<sup>2</sup>; 4) Кл/В?

- A) 1, 4.      B) 1, 2.      C) все.      D) 1, 2, 3.      E) 3, 4.

48. (04/9-34). Три конденсатора с емкостями 1, 2 и 4 мкФ последовательно соединены и подключены к источнику постоянного напряжения 210 В. Определите заряд первого конденсатора (в мкКл).

- A) 105.      B) 420.      C) 120.      D) 210.      E) 330.

49. (99/1-27). Как изменится емкость плоского конденсатора при увеличении площади пластин в два раза при неизменном расстоянии между ними?

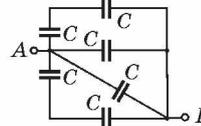
- A) увеличится в 4 раза.      D) уменьшится в 4 раза.  
 B) уменьшится в 2 раза.      E) увеличится в 2 раза.  
 C) не изменится.

50. (99/2-26). Три плоских конденсатора имеют равные площади обкладок, но расстояния между ними  $d_1 < d_2 < d_3$ . В каком соотношении будут емкости конденсаторов?

- A)  $C_2 < C_3 < C_1$ .      C)  $C_1 = C_2 = C_3$ .      E)  $C_3 < C_1 < C_2$ .  
 B)  $C_1 < C_2 < C_3$ .      D)  $C_1 > C_2 > C_3$ .

51. (00/5-25). Определите общую емкость данной схемы.

- A)  $6C$ .      B)  $4C$ .      C)  $C$ .      D)  $2C$ .      E)  $3C$ .



52. (00/7-37). Три конденсатора с одинаковыми емкостями подсоединены параллельно к источнику питания с ЭДС 2В. Какова общая емкость цепи (в пФ), если заряд каждого конденсатора равен  $10^{-9}$  Кл?

- A) 1400.      B) 1500.      C) 1600.      D) 1650.      E) 2000.

53. (99/1-32). Конденсатор емкостью 2 мкФ заряжают до напряжения 110 В. Затем, отключив от сети, его присоединяют к незаряженному конденсатору, который при этом заряжается до напряжения 44 В. Какова емкость второго конденсатора (в мкФ)?

- А) 3.    В) 5.    С) 6.    D) 7.    E) 11.

54. (98/-24). Как изменится емкость конденсатора при увеличении его заряда в 2 раза?

- А) уменьшится в 4 раза.    D) увеличится в 4 раза.  
В) увеличится в 2 раза.    E) не изменится.  
С) уменьшится в 2 раза.

55. (00/10-45). Конденсатор подключили к источнику постоянного напряжения. Как изменится напряженность электрического поля конденсатора, если пространство между обкладками заполнить диэлектриком?

- А) уменьшится.  
В) увеличится.  
С) не изменится.  
D) ответ зависит от напряжения источника.  
E) ответ зависит от проницаемости диэлектрика.

56. (98/5-28). Как изменится емкость конденсатора при увеличении разности потенциалов между обкладками в 2 раза?

- А) уменьшится в 2 раза.    D) увеличится в 4 раза.  
В) увеличится в 2 раза.    E) уменьшится в 4 раза.  
С) не изменится.

57. (99/10-7). Обкладки заряженного конденсатора разрядились через замыкающий провод. Как изменились массы обкладок?

- А) масса обеих обкладок увеличилась.  
В) масса положительно заряженной обкладки увеличилась, а отрицательно заряженной — уменьшилась.  
С) масса обеих обкладок не изменилась.  
D) масса положительно заряженной обкладки уменьшилась, а отрицательно заряженной — увеличилась.  
E) масса обеих обкладок уменьшилась.

58. (96/5-101). Пластины заряженного плоского конденсатора притягиваются друг к другу с силой  $F$ . Как изменится эта сила, если в конденсатор внести плоскую стеклянную пластину с диэлектрической проницаемостью  $\varepsilon = 2$ ? Толщина пластины меньше расстояния между обкладками.

- А) увеличится в 2 раза.  
В) уменьшится в 2 раза.  
С) уменьшится в 4 раза.  
D) увеличится в 4 раза.  
E) не изменится.

## Глава II. ПОСТОЯННЫЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК

### § 11. Электрический ток. Сила тока. Плотность тока

Если к изолированному проводнику приложить электрическое поле  $\vec{E}$ , то на свободные заряды  $q$  в проводнике будет действовать сила  $\vec{F} = q\vec{E}$ . В результате в проводнике возникает упорядоченное перемещение свободных зарядов, возникает электрический ток (рис. 2.1).

Непрерывное упорядоченное движение свободных носителей электрического заряда называется *электрическим током*.

За направление электрического тока принято направление движения положительных свободных зарядов.

**Условия, необходимые для существования электрического тока:**

- наличие свободных заряженных частиц;
- наличие электрического поля.

*Действия тока, сопровождающие его протекание:*

**1. Тепловое.** Проводник, по которому течет ток, нагревается. Тепловое действие проявляется практически всегда. Исключение составляет явление сверхпроводимости, тепловое действие тока не проявляется также при протекании тока в вакууме.

**2. Химическое.** Электрический ток изменяет химический состав проводника. Наблюдается при протекании тока в электролитах.

**3. Магнитное.** Ток оказывает силовое воздействие на соседние токи и на магнитные тела. Магнитное действие тока в отличие от химического и от теплового явления является основным, так как проявляется у всех без исключения проводников (наблюдается всегда).

Электрический ток в проводниках (металлах) обусловлен наличием *свободных электронов* (рис. 2.2).

Положительно заряженные ионы металла образуют кристаллическую

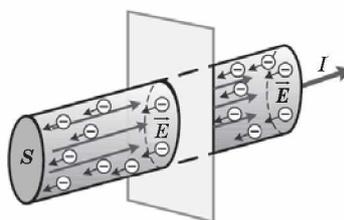


Рис. 2.1

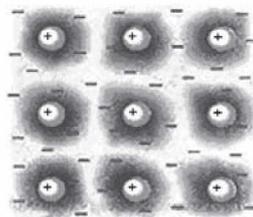


Рис. 2.2

решетку (рис. 2.2). «Газ свободных электронов» образуется за счет одного или нескольких электронов, отданных каждым атомом. Свободные электроны способны блуждать по всему объему кристалла.

**Силой тока** называется скалярная физическая величина, численно равная электрическому заряду, проходящему через поперечное сечение проводника за единицу времени:

$$I = \frac{dq}{dt}.$$

Если величина силы тока и его направление не меняются с течением времени, то ток называется *постоянным* и

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

Единица силы тока – 1 Ампер. Ампер в системе СИ является основной единицей и определяется из магнитного взаимодействия двух параллельных бесконечно длинных проводников с током.

1Ампер (А) равен силе постоянного тока, который, протекая по двум длинным параллельным прямолинейным проводникам, расположенным на расстоянии 1 м один от другого в вакууме, вызывает между этими проводниками силу взаимодействия, равную  $2 \cdot 10^{-7}$  Н на каждый метр длины (рис. 2.3).

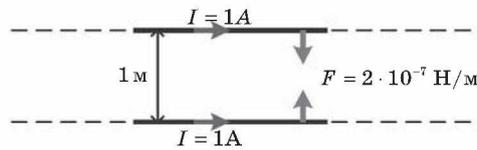


Рис. 2.3

Сила тока зависит от заряда частицы  $e$ , концентрации  $n$ , скорости частиц  $v$  и площади сечения проводника  $S$ :

$$I = \frac{q}{t} = \frac{eN}{t} = \frac{enV}{t} = \frac{envtS}{t} = evnS,$$

где  $q = eN$ ;  $n$  — концентрация частиц; в объеме  $V = vtS$  содержится  $N = nV$  частиц.

**Плотностью тока**  $\vec{j}$  называется векторная физическая величина, численно равная силе тока, приходящегося на единицу площади, ориентированной перпендикулярно

току: 
$$\vec{j} = \frac{\Delta I}{\Delta S}.$$

Вектор  $\vec{j}$  направлен вдоль тока по вектору напряженности электрического поля в проводнике. В системе СИ плотность тока измеряется в А/м<sup>2</sup>. Для постоянного тока  $j = \frac{I}{S}$ .

## § 12. Закон Ома для однородного участка цепи. Сопротивление

Рассмотрим отрезок однородного цилиндрического проводника длиной  $l$ , по которому течет постоянный ток  $I$ , внутри проводника поддерживается постоянное электрическое поле  $E$  (рис. 2.4).

Из формулы, связывающей напряженность поля с разностью потенциалов, получим:

$$E = -\frac{\Delta\varphi}{l} = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{l} = \frac{U}{l},$$

Ом экспериментально установил, что ток на участке цепи прямо пропорционален напряжению и обратно пропорционален сопротивлению участка:  $I = \frac{U}{R}$ .

Этот закон называется законом Ома в интегральной форме.

Для каждого проводника существует зависимость силы тока от приложенного напряжения, называемая **вольт-амперной характеристикой**. Для металлических проводников эта зависимость имеет линейный характер (рис. 2.5).

Из графика на рис. 2.5 можно определить сопротивление проводников:  $R = \text{ctg}\alpha$ .

**Электрическое сопротивление.** Согласно классической электронной теории, движение свободных электрических зарядов, создающих электрический ток, не происходит беспрепятственно. В металлических проводниках электроны проводимости сталкиваются с ионами, совершающими тепловые колебания около своих положений равновесия, те-

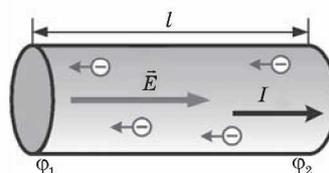


Рис. 2.4

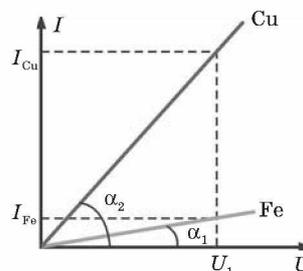


Рис. 2.5

ряют скорость упорядоченного движения и отдают этим частицам часть своей кинетической энергии. Затем электроны снова разгоняются электрическим полем, снова сталкиваются с ионами, тормозятся и т.д. Вследствие этого уменьшается и сила тока в проводнике.

*Свойство проводника препятствовать прохождению электрического тока называют его сопротивлением. Сопротивление зависит от материала проводника, его длины, поперечного сечения и температуры:*

$$R = \rho \frac{l}{S},$$

где  $R$  — сопротивление проводника,  $l$  — длина,  $S$  — площадь сечения проводника,  $\rho$  — удельное сопротивление вещества проводника.

За единицу сопротивления  $R$  в системе СИ принимают 1 Ом.

1 Ом — это сопротивление такого проводника, по которому течет ток в 1 А, если на его концах поддерживается напряжение 1 В:

$$1 \text{ Ом} = \frac{1 \text{ В}}{1 \text{ А}}.$$

*Удельное сопротивление проводника  $\rho$  численно равно сопротивлению проводника, имеющего длину 1 м и площадь поперечного сечения 1 м<sup>2</sup>.*

Единицей удельного сопротивления является 1 Ом·м.

Удельное сопротивление зависит от рода вещества и температуры.

Величина, обратная сопротивлению, называется *электрической проводимостью проводника*:

$$A = \frac{1}{R}, \text{ единица проводимости — сименс (См).}$$

Величина, обратная удельному сопротивлению, называется *удельной электрической проводимостью вещества проводника*:

$$\gamma = \frac{1}{\rho}.$$

**Закон Ома в дифференциальной форме:**

$$j = \frac{I}{S} = \frac{U}{RS} = \frac{US}{S\rho l} = \frac{1}{\rho} \cdot \frac{U}{l} = \gamma E.$$

При выводе использовали закон Ома  $I = \frac{U}{R}$ , учли, что  $R = \rho \frac{l}{S}$ , также  $\gamma = \frac{1}{\rho}$  и  $\frac{U}{l} = E$ .

$\vec{j} = \gamma \vec{E}$  — закон Ома для постоянного тока в дифференциальной форме.

**Зависимость сопротивления от температуры.**

Сопротивление металла возрастает линейно с увеличением температуры:

$$R = R_0(1 + \alpha t),$$

где  $\alpha$  — температурный коэффициент сопротивления металлов;  $R$  — сопротивление проводника при температуре  $t$ ;  $R_0$  — сопротивление проводника при  $0^\circ \text{C}$ .

Зависимость сопротивления от температуры с точки зрения электронной проводимости твердых тел можно объяснить тем, что с увеличением температуры возрастает амплитуда колебаний иона кристаллической решетки металла и, следовательно, увеличивается число столкновений электронов с ионами. Кроме того, с увеличением температуры возрастает скорость хаотического движения электронов, что приводит к уменьшению средней скорости их упорядоченного движения, а следовательно и тока ( $I = envS$ ).

**Явление сверхпроводимости** открыто датским физиком Х. Каммерлинг-Оннесом в 1911 г. При некоторой определенной температуре  $T_{\text{кр}}$ , различной для разных веществ, удельное сопротивление скачком уменьшается до нуля (рис. 2.6). Критическая температура у ртути равна 4,1 К, у алюминия — 1,2 К, у олова — 3,7 К.

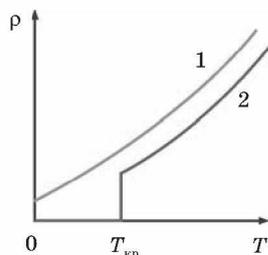


Рис. 2.6. Зависимость удельного сопротивления  $\rho$  от абсолютной температуры  $T$  при низких температурах: 1 — нормальный металл; 2 — сверхпроводник

Вещества в сверхпроводящем состоянии обладают исключительными свойствами.

Практически важным из них является способность длительное время (многие годы) поддерживать без затухания электрический ток, возбужденный в сверхпроводящей цепи.

### § 13. Соединения проводников

В электрической цепи проводники могут быть соединены последовательно и параллельно, а также смешанным образом.

**Последовательное соединение.** *Последовательным* называется соединение проводников без узлов (рис. 2.7).

Начало второго проводника соединяется с концом первого и т. д.

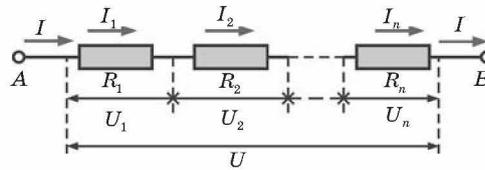


Рис. 2.7

*Узлом* называется точка, в которой сходится более чем два проводника.

При последовательном соединении проводников ток  $I$  одинаков во всех сопротивлениях:  $I = I_1 = I_2 = \dots = I_n$ .

Падение напряжения на концах цепи равно сумме напряжений на отдельных участках:  $U = U_1 + U_2 + \dots + U_n$ .

Применив закон Ома, получим:

$$IR = IR_1 + IR_2 + \dots + IR_n \Rightarrow R = R_1 + R_2 + \dots + R_n, \text{ или } R = \sum_{i=1}^n R_i.$$

*Общее сопротивление равно сумме отдельных сопротивлений.*

При последовательном соединении  $n$  одинаковых проводников  $R_1$  общее сопротивление равно:  $R = nR_1$ .

**Параллельное соединение.** *Параллельным соединением* называется соединение нескольких проводников между двумя узлами (рис. 2.8, точки  $A$  и  $B$  — узлы).

Все вместе параллельно соединенные проводники составляют разветвление, а каждый из них является ветвью. Начала и концы сопротивлений соединяются взаимно.

При параллельном соединении проводников напряжение  $U$  на всем участке  $AB$  будет таким же, как и для каждого отдельного проводника, т. е.  $U = U_1 = U_2 = \dots = U_n$ .

В точке  $A$  (узел) происходит разветвление тока:  $I = I_1 + I_2 + \dots + I_n$ .

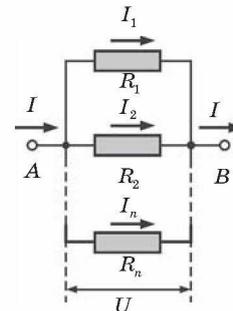


Рис. 2.8

Применив закон Ома для каждого участка, получим:

$$\frac{U}{R} = \frac{U}{R_1} + \frac{U}{R_2} + \dots + \frac{U}{R_n} \Rightarrow \frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n}, \text{ или } \frac{1}{R} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{R_i},$$

где  $R$  — общее сопротивление проводников, соединенных параллельно.

*Общая проводимость равна сумме проводимостей отдельных проводников.*

Отметим, что общее сопротивление параллельного соединения меньше самого малого из его сопротивлений.

При параллельном соединении  $n$  одинаковых сопротивлений  $R_1$ , общее сопротивление равно:  $R = \frac{R_1}{n}$ .

Пример расчета сопротивления сложной цепи по формулам последовательного и параллельного соединения проводников приведен на рисунке 2.9, на котором указана последовательность вычислений, сопротивления проводников даны в омах (Ом).

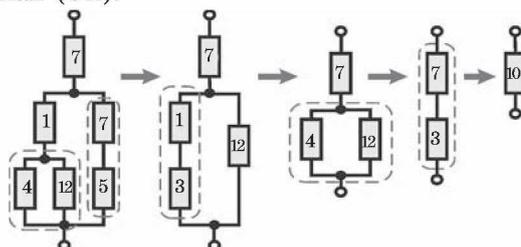


Рис. 2.9

## § 14. Измерение напряжения и силы тока

Для измерения напряжений и токов в электрических цепях используются приборы — *вольтметры* и *амперметры* (рис. 2.10).

Вольтметр (V) подключается *параллельно* участку цепи, на котором производится измерение разности потенциалов.

Амперметр (A) включается *последовательно* в разрыв электрической цепи, чтобы через него проходил весь измеряемый ток.

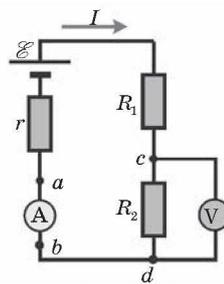


Рис. 2.10

**Вольтметр** обладает некоторым внутренним сопротивлением  $R_B$ . Для того чтобы вольтметр не вносил заметного перераспределения токов, его внутреннее сопротивление должно быть велико по сравнению с сопротивлением того участка цепи, к которому он подключен ( $R_B \gg R_2$ ). Это условие означает, что ток  $I_B$ , протекающий через вольтметр, много меньше тока  $I$ , который протекает по измеряемому участку цепи.

**Добавочные сопротивления к вольтметру.** Любой вольтметр рассчитан на предельное напряжение  $U_0$ . Можно измерить в  $n$  раз большее напряжение  $U = nU_0$ , если подключить последовательно с вольтметром добавочный резистор, сопротивление которого  $R_d$  (рис. 2.11).

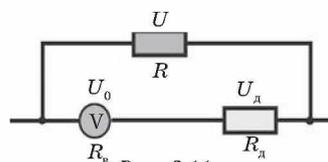


Рис. 2.11

Найдем сопротивление добавочного резистора  $R_d$ . При включении в цепь вольтметра добавочного резистора на вольтметр по-прежнему должно приходиться напряжение  $U_0$ , но это составляет лишь  $\frac{1}{n}$  часть измеряемого напряжения  $U_0 = \frac{U}{n}$ . Остальная часть напряжения ( $U_d = U - U_0$ ) приходится на добавочный резистор. Поэтому пределы измерения увеличиваются в  $n$  раз и во столько же раз увеличивается цена деления вольтметра, а, следовательно, уменьшается его чувствительность (в  $n$  раз). В вольтметре и добавочном резисторе устанавливается один и тот же ток  $I$ , поэтому:  $U_0 = IR_B$ ,  $U = nU_0 = nIR_B$ ,  $U_d = IR_d$ . Так как  $U = U_0 + U_d$ , то  $nIR_B = IR_B + IR_d \Rightarrow R_d = R_B(n - 1)$ .

**Амперметр** обладает некоторым внутренним сопротивлением  $R_A$ . В отличие от вольтметра, внутреннее сопротивление амперметра должно быть малым по сравнению с полным сопротивлением всей цепи, чтобы при включении амперметра ток в цепи не изменялся.

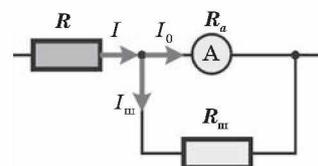


Рис. 2.12

**Шунты к амперметру.** Любой амперметр рассчитан на измерение сил токов до некоторого максимального значения  $I_0$ . Можно измерить в  $n$  раз большую силу тока  $I = nI_0$ , если подключить параллельно амперметру резистор, называемый **шунтом** (рис. 2.12).

Найдем сопротивление шунта  $R_{ш}$ . Сопротивление амперметра —  $R_a$ . При включении шунта часть тока  $I_{ш}$  пойдет по нему. Через амперметр должен идти ток, не превышающий  $I_0$ .

Сила тока  $I_0$  меньше измеряемой в  $n$  раз:  $I_0 = \frac{I}{n}$ . Следовательно, цена деления прибора возрастет в  $n$  раз, т. е. отклонению стрелки на одно деление будет соответствовать в  $n$  раз большая сила тока. Иначе говоря, чувствительность амперметра уменьшится в  $n$  раз: при подключении шунта стрелка прибора отклонится на угол, в  $n$  раз меньший, чем без него.

При параллельном соединении  $I = I_0 n = I_0 + I_{ш}$ , а напряжение на шунте и амперметре одинаково и согласно закону Ома равно:  $I_0 R_a = I_{ш} R_{ш}$ . Исключая силу тока  $I_0$  из двух последних уравнений, получим:  $R_{ш} = \frac{R_a}{n - 1}$

## § 15. Источники постоянного тока

Если пластинки заряженного конденсатора (или два заряженных тела) соединить проводником, то через него будет проходить быстро убывающий ток, так как пластинки будут разряжаться и разность потенциалов на концах проводника будет убывать. Для поддержания в цепи тока достаточно длительное время надо поддерживать постоянную разность потенциалов на его концах, для этого необходимо иметь специальное устройство, внутри которого происходило бы непрерывное разделение зарядов и перенос их к соответствующим пластинам (телам).

Электрическое поле вызывает движение положительных зарядов только в сторону убывающего потенциала, поэтому в цепи должны иметься участки, в которых *сторонние силы* (не электростатического происхождения) вызывают движение зарядов в сторону возрастающего потенциала.

Устройство, в котором действуют сторонние силы, называется *источником тока*.

*Электродвижущей силой источника  $\mathcal{E}$  (ЭДС)* называется работа сторонних сил по перемещению единичного положительного заряда по замкнутой цепи:  $\mathcal{E} = \frac{A_{стр}}{q}$ .

В системе СИ за единицу ЭДС принимается один вольт (1 В):  $1\text{ В} = \frac{1\text{ Дж}}{\text{Кл}}$ .

## § 16. Химические источники постоянного тока

**Гальванические элементы.** Источники электрической энергии, в которых энергия получается за счет химической энергии, называются *гальваническими элементами* (рис. 2.13).

При погружении металла в кислоту происходит процесс растворения металла в кислоте. При этом в раствор переходят его положительные ионы, избыточные электроны остаются в металле и заряжают его отрицательно. По мере

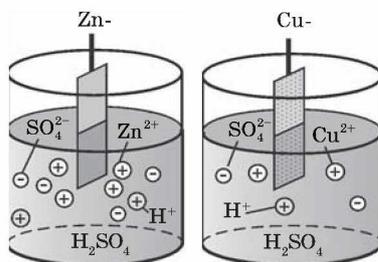


Рис. 2.13

увеличения концентрации ионов в растворе все большую роль играет обратный процесс — возврат положительных ионов металла на электрод. Устанавливается равновесие: число ионов, переходящих в раствор, равно числу ионов, осаждающихся из раствора за то же время. Этому равновесному состоянию соответствует определенная

разность потенциалов между *металлом и раствором, характерная для природы металла и раствора электролита.*

Между металлом и электролитом устанавливается разность потенциалов:  $\varphi_{эл} - \varphi_{мет}$ .

Заметим, что в этом процессе все *металлы заряжаются отрицательно.*

В гальваническом элементе Вольта две пластинки (электроды) из разных металлов (Zn и Cu) опущены в электролит (рис. 2.14).

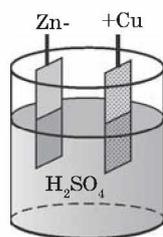


Рис. 2.14

Оба электрода заряжаются отрицательно, но медная пластина растворяется в электролите меньше цинковой и избыток отрицательного заряда и разность потенциалов между медью и электролитом меньше, чем между цинком и электролитом. Таким образом, между медным и цинковым электродами возникает разность потенциалов, которая является ЭДС источника:

$$\mathcal{E} = (\varphi_{эл} - \varphi_{Zn}) - (\varphi_{эл} - \varphi_{Cu}) = \varphi_{Cu} - \varphi_{Zn}.$$

При замыкании электродов металличе-

ким проводником во *внешней цепи* гальванического элемента движутся электроны от цинкового электрода с более низким потенциалом к медному с более высоким потенциалом. В электролите движутся ионы: отрицательные  $\text{SO}_4^{2-}$  от меди к цинку и положительные ( $\text{Cu}^{2+}$  и  $\text{Zn}^{2+}$ ) от цинка к меди.

Таким образом, у гальванических элементов поддерживается непрерывный круговорот зарядов, разность потенциалов между электродами сохраняет постоянное значение и в цепи будет идти длительный постоянный ток. ЭДС не зависит от площади электродов. Процесс является необратимым, так как металлический электрод растворяется в электролите и химические реакции прекращаются.

ЭДС элемента Вольта  $\mathcal{E} = 1,1\text{В}$ . Элемент Вольта рассмотрен как пример принципа работы гальванического элемента, так как он обладает рядом недостатков и поэтому на практике не применяется.

Технически более совершенными являются элементы Лекланше ( $\mathcal{E} = 1,5\text{В}$ ), в которых в качестве электролита используется раствор нашатыря, а электроды изготовлены из цинка и графита.

В настоящее время производится множество различных типов гальванических элементов.

**Аккумуляторы** (рис. 2.15). Если погрузить свинцовые электроды в ванну с раствором серной кислоты, то они покрываются сернокислым свинцом  $\text{PbSO}_4$ . Так как химические процессы на обеих пластинах одинаковы, то разность потенциалов между ними равна нулю. Элемент в таком виде не обладает еще ЭДС.

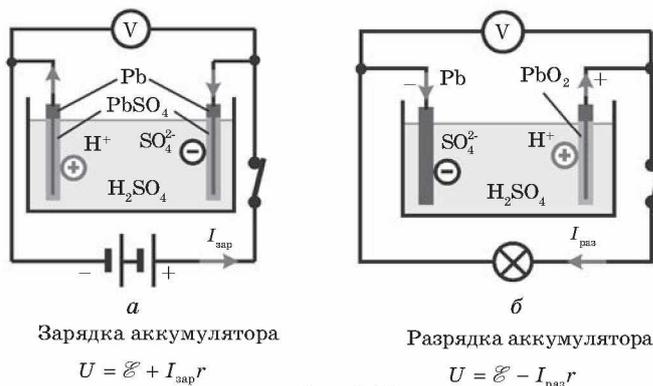


Рис. 2.15

Включим ванну в цепь постороннего источника постоянного тока (рис. 2.15, *a*). В процессе прохождения тока на аноде образуется двуокись свинца  $PbO_2$ , а на катоде — чистый свинец  $Pb$ . Поскольку пластины стали разнородными, между ними создается разность потенциалов, которая при разомкнутой цепи равна ЭДС аккумулятора. Если теперь убрать батарею и вместо нее присоединить лампу накаливания (рис. 2.15, *b*), то при замыкании цепи лампа загорается, следовательно, прибор сам стал источником электрической энергии.

Через некоторое время, когда обе пластины снова покроются серноокислым свинцом, ток прекратится.

Теперь снова можно присоединить источник электрической энергии и повторить все описанные процессы: это означает, что процессы в описанном приборе обратимы.

Итак, прибор накапливает энергию, когда через него проходит ток, создаваемый посторонним источником, и отдает эту энергию, когда сам создает ток в цепи.

Приборы, которые становятся источниками электрической энергии после пропускания через них тока, называют *аккумуляторами*.

Пропускание тока через аккумулятор называют его *зарядкой*, а использование его в качестве источника энергии называют *разрядкой*.

При зарядке аккумулятора происходит превращение электрической энергии в скрытую химическую форму энергии, а при его разрядке — обратный переход химической энергии в форму энергии электрического тока.

Аккумуляторы характеризуются КПД, емкостью и ЭДС.

**Коэффициентом полезного действия** аккумулятора называют число, показывающее, какую часть энергии, затраченной на его зарядку, он отдает при разрядке:

$$\eta = \frac{W_{\text{ваз}}}{W_{\text{зар}}} \cdot 100\%.$$

**Емкостью аккумулятора** называют максимальное количество электричества, которое может пройти по цепи за все время разрядки аккумулятора. За единицу емкости аккумулятора обычно принимают ампер-час:  $1 \text{ А-ч} = 3600 \text{ Кл}$ .

Аккумуляторы бывают кислотные и щелочные. Выше было описано действие кислотного (или свинцового) аккумулятора. Его ЭДС составляет около 2В, а КПД — около 80 %. ЭДС щелочного аккумулятора равна примерно 1,3В,

а КПД не превышает 60 %. Зато эти аккумуляторы не портятся при кратковременном коротком замыкании, легче свинцовых и не выделяют вредных паров и газов.

### § 17. Обобщенный закон Ома

Рассмотрим участок цепи, содержащий ЭДС. Такой участок цепи называется *неоднородным* (рис. 2.16).

Работа  $A$  всех сил (сторонних и электростатических), совершаемая над носителями заряда, по закону сохранения и превращения энергии равна количеству теплоты  $Q$ , выделяющейся на участке цепи.

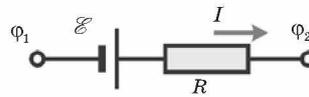


Рис. 2.16

Работа сил, совершаемая при перемещении заряда на участке цепи, равна:  $A = q\mathcal{E} + q(\phi_1 - \phi_2)$ .

За время  $\Delta t$  в проводнике выделяется теплота:

$$Q = I^2 R \Delta t = IR(I\Delta t) = IRq.$$

Так как  $Q = A$ , получим:  $IRq = q\mathcal{E} + q(\phi_1 - \phi_2) \Rightarrow$

$\Rightarrow IR = \mathcal{E} + (\phi_1 - \phi_2) \Rightarrow I = \frac{\phi_1 - \phi_2 + \mathcal{E}}{R}$  — обобщенный закон Ома.

**Закон Ома для полной цепи.** На замкнутой цепи постоянного тока участок цепи ( $cd$ ) является однородным, участок ( $ab$ ), содержащий источник тока с ЭДС, равной  $\mathcal{E}$ , является неоднородным;  $r$  — внутреннее сопротивление источника тока (рис. 2.17).

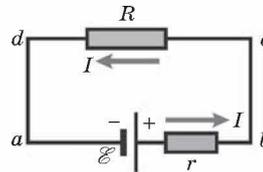


Рис. 2.17

По закону Ома:  $IR = \Delta\phi_{cd}$  и  $Ir = \Delta\phi_{ab} + \mathcal{E}$ . Сложив оба равенства, получим:

$I(R + r) = \Delta\phi_{cd} + \Delta\phi_{ab} + \mathcal{E}$ , но  $\Delta\phi_{ce} = \Delta\phi_{ba} = -\Delta\phi_{ab}$ , поэтому  $I = \frac{\mathcal{E}}{R + r}$  — закон Ома для полной цепи.

Сила тока в полной цепи прямо пропорциональна электродвижущей силе источника и обратно пропорциональна полному сопротивлению цепи.

**Источник постоянного тока в различных режимах работы.** Используем следующие обозначения:

$\vec{E}$  — напряженность электрического поля внутри батареи;  $\vec{F}_э$  — электрическая сила;  $\vec{F}_{ст}$  — сторонняя сила, действующая на положительные заряды внутри источника.

**1. Короткое замыкание** (рис. 2.18). Участок  $(ab)$  является внутренним участком источника. Если точки  $a$  и  $b$  замкнуть проводником, сопротивление которого мало по сравнению с внутренним сопротивлением источника ( $R \rightarrow 0$ ), тогда в цепи потечет ток:

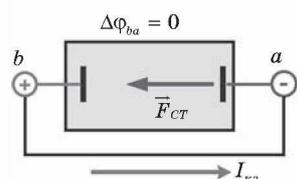


Рис. 2.18

$I_{кз} = \frac{\mathcal{E}}{r}$  — ток короткого замыкания.

Сила тока короткого замыкания — максимальная сила тока, которую можно получить от данного источника с электродвижущей силой  $\mathcal{E}$  и внутренним сопротивлением  $r$ . У источников с малым внутренним сопротивлением ток короткого замыкания может быть очень велик и вызывать разрушение электрической цепи или источника.

В режиме короткого замыкания электрическое поле внутри батареи исчезает. Показания вольтметра, подключенного к зажимам источника, близки к нулю.

**2. Внешняя цепь разомкнута** (рис. 2.19). Если внешняя цепь разомкнута, то  $\Delta\phi_{ba} = \Delta\phi_{ab} = \mathcal{E}$ , т. е. разность потенциалов на полюсах разомкнутой батареи равна ее ЭДС. Показания вольтметра, подключенного к зажимам источника, равны ЭДС источника  $\mathcal{E}$ .

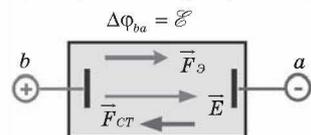


Рис. 2.19

**3. Внешняя цепь замкнута на нагрузочное сопротивление** (рис. 2.20). Если внешнее нагрузочное сопротивление  $R$  включено и через батарею протекает ток  $I$ , разность потенциалов на ее полюсах становится

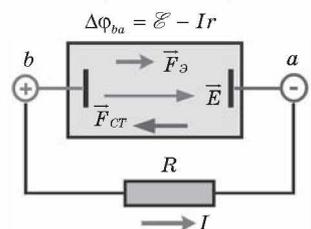


Рис. 2.20

равной  $\Delta\phi_{ba} = \mathcal{E} - Ir$ .

Показания вольтметра, подключенного к зажимам источника, равны напряжению на внешнем сопротивлении  $R$ .

## § 18. Соединения источников постоянного тока

Электрическая цепь может содержать несколько источников, соединенных последовательно, параллельно или смешанно. При этом действия всех источников принято заменять одним источником, называемым *эквивалентным*, который будет создавать во внешнем сопротивлении  $R$  такой же ток, как и батарея. Для всех случаев соединения ЭДС закон Ома можно записать в виде:

$$I = \frac{\mathcal{E}_{\text{эк}}}{R + r_{\text{эк}}}.$$

При *последовательном* соединении нескольких источников тока ЭДС всей батареи равна *алгебраической сумме ЭДС отдельных источников* (рис. 2.21):

$$\mathcal{E}_{\text{эк}} = \mathcal{E}_1 + \mathcal{E}_2 + \dots + \mathcal{E}_n, \quad \text{или} \quad \mathcal{E}_{\text{эк}} = \sum_{i=1}^n \mathcal{E}_i.$$

Внутреннее сопротивление батареи равно:

$$r_{\text{эк}} = r_1 + r_2 + \dots + r_n, \quad \text{или} \quad r_{\text{эк}} = \sum_{i=1}^n r_i.$$

ЭДС источников, которые сами создавали бы ток того же направления, что и ток в цепи, берут со знаком «+».

ЭДС источников, которые давали бы ток противоположного направления, берут со знаком «-». Например, для рис. 2.21:  $\mathcal{E}_{\text{эк}} = \mathcal{E}_1 - \mathcal{E}_2 + \dots + \mathcal{E}_n$ .

При параллельном соединении нескольких источников (рис. 2.22) батарею можно заменить одним эквивалентным источником, который будет создавать во внешнем сопротивлении  $R$  такой же ток, как и батарея:

$$\frac{1}{r_{\text{эк}}} = \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} + \dots + \frac{1}{r_n}, \quad \text{или} \quad \frac{1}{r_{\text{эк}}} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{r_i};$$

$$\frac{\mathcal{E}_{\text{эк}}}{r_{\text{эк}}} = \frac{\mathcal{E}_1}{r_1} + \frac{\mathcal{E}_2}{r_2} + \dots + \frac{\mathcal{E}_n}{r_n}, \quad \text{или} \quad \frac{\mathcal{E}_{\text{эк}}}{r_{\text{эк}}} = \sum_{i=1}^n \frac{\mathcal{E}_i}{r_i}.$$

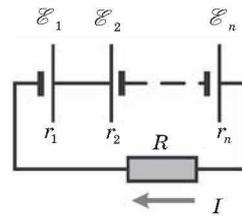


Рис. 2.21

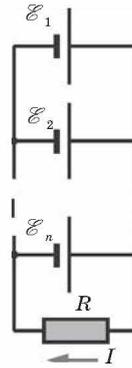


Рис. 2.22

## § 19. Правила Кирхгофа для разветвленных цепей

Для упрощения расчетов сложных электрических цепей, содержащих неоднородные участки, используются правила Кирхгофа, которые являются обобщением закона Ома на случай разветвленных цепей.

**Первое правило Кирхгофа.** В разветвленных цепях можно выделить узловые точки (узлы), в которых сходятся не менее трех проводников. Токи, втекающие в узел, принято считать положительными; токи, вытекающие из узла, — отрицательными (рис. 2.23).

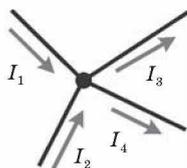


Рис. 2.23

**Первое правило Кирхгофа:** алгебраическая сумма сил токов для каждого узла в разветвленной цепи равна нулю:

$$I_1 + I_2 + I_3 + \dots + I_n = 0.$$

Первое правило Кирхгофа является следствием закона сохранения электрического заряда.

**Второе правило Кирхгофа.** В разветвленной цепи всегда можно выделить некоторое количество замкнутых путей (контуров), состоящих из однородных и неоднородных участков. На разных участках выделенного контура могут протекать различные токи (рис. 2.24).

Цепь на рисунке 2.24 содержит два узла  $a$  и  $d$ , в которых сходятся одинаковые токи; поэтому только один из узлов является независимым ( $a$  или  $d$ ).

В цепи можно выделить три контура  $abcd$ ,  $adef$  и  $abcdef$ . Из них только два являются независимыми (например,  $abcd$  и  $adef$ ), так как третий не содержит никаких новых участков.

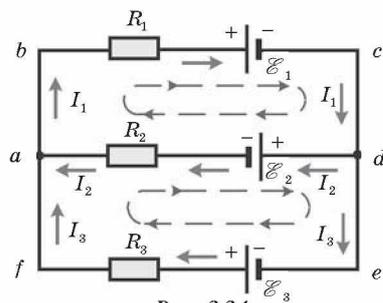


Рис. 2.24

Второе правило Кирхгофа является следствием обобщенного закона Ома.

Запишем обобщенный закон Ома для участков, составляющих контуры  $abcd$  и  $adef$ . Зададим произвольно направление обхода контуров (на рис. 2.24 по часовой стрелке). На каждом участке нужно задать положительное направление

тока. При записи обобщенного закона Ома для каждого из участков соблюдают «правила знаков», которые поясняются на рисунке 2.25.



Рис. 2.25. «Правила знаков»

Для участков контура  $abcd$  обобщенный закон Ома записывается в виде:

- для участка  $bc$ :  $I_1 R_1 = \Delta\varphi_{bc} - \mathcal{E}_1$ ;
- для участка  $da$ :  $I_2 R_2 = \Delta\varphi_{da} - \mathcal{E}_2$ .

Складывая левые и правые части этих равенств и принимая во внимание, что  $\Delta\varphi_{bc} = -\Delta\varphi_{da}$ , получим:

$$I_1 R_1 + I_2 R_2 = \Delta\varphi_{bc} + \Delta\varphi_{da} - \mathcal{E}_1 - \mathcal{E}_2 = -\mathcal{E}_1 - \mathcal{E}_2.$$

Аналогично, для контура  $adef$  можно записать:

$$-I_2 R_2 + I_3 R_3 = \mathcal{E}_2 + \mathcal{E}_3.$$

**Второе правило Кирхгофа:** алгебраическая сумма произведений сопротивления каждого из участков любого замкнутого контура разветвленной цепи постоянного тока на силу тока на этом участке равна алгебраической сумме ЭДС вдоль этого контура.

Таким образом, правила Кирхгофа сводят расчет разветвленной электрической цепи к решению системы линейных алгебраических уравнений.

Для цепи, изображенной на рисунке 2.24, система уравнений для определения трех неизвестных токов  $I_1$ ,  $I_2$  и  $I_3$  имеет вид:

$$\begin{cases} I_1 R_1 + I_2 R_2 = -\mathcal{E}_1 - \mathcal{E}_2; \\ -I_2 R_2 + I_3 R_3 = -\mathcal{E}_2 + \mathcal{E}_3; \\ -I_1 + I_2 + I_3 = 0. \end{cases}$$

Если в результате решения сила тока на каком-то участке оказывается отрицательной, то это означает, что ток на этом участке идет в направлении, противоположном выбранному направлению.

## § 20. Работа и мощность тока

При протекании тока по однородному участку цепи электрическое поле совершает работу. За время  $\Delta t$  по цепи протекает заряд  $\Delta q = I \Delta t$ .

$$\Delta A = (\varphi_1 - \varphi_2) \Delta q = \Delta \varphi_{12} I \Delta t = UI \Delta t,$$

где  $U = \Delta \varphi_{12}$  — напряжение. Работу  $\Delta A$  называют *работой электрического тока*.

Применяя закон Ома, получим эквивалентные формулы работы:

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

Работа  $\Delta A$  электрического тока  $I$ , протекающего по неподвижному проводнику с сопротивлением  $R$ , преобразуется в тепло  $\Delta Q$ , выделяющееся на проводнике:

$$\Delta Q = \Delta A = RI^2 \Delta t.$$

Закон преобразования работы тока в тепло был экспериментально установлен независимо друг от друга Дж. Джоулем и Э. Ленцем и носит название *закона Джоуля-Ленца*.

Мощность электрического тока равна отношению работы тока  $\Delta A$  к интервалу времени  $\Delta t$ , за которое эта работа была совершена:

$$P = \frac{\Delta A}{\Delta t} = UI = I^2 R = \frac{U^2}{R}.$$

Работа электрического тока в СИ выражается в *джоулях* (Дж), мощность — в *ваттах* (Вт).

Рассмотрим теперь полную цепь постоянного тока, состоящую из источника с электродвижущей силой  $\mathcal{E}$  и внутренним сопротивлением  $r$  и внешнего однородного участка с сопротивлением  $R$ . Закон Ома для полной цепи записывается в виде  $(R + r)I = \mathcal{E}$ .

Умножив обе части этой формулы на  $\Delta q = I \Delta t$ , мы получим соотношение, выражающее закон сохранения энергии для полной цепи постоянного тока:

$$RI^2 \Delta t + rI^2 \Delta t = \mathcal{E} I \Delta t = \Delta A_{\text{ст.}}$$

Первое слагаемое в левой части  $\Delta Q = RI^2 \Delta t$  — тепло, выделяющееся на внешнем участке цепи за время  $\Delta t$ , второе слагаемое  $\Delta Q_{\text{ист}} = rI^2 \Delta t$  — тепло, выделяющееся внут-

ри источника за то же время. Выражение  $\mathcal{E} I \Delta t$  равно работе сторонних сил  $\Delta A_{\text{ст}}$ , действующих внутри источника.

При протекании электрического тока по замкнутой цепи работа сторонних сил  $\Delta A_{\text{ст}}$  преобразуется в тепло, выделяющееся во внешней цепи ( $\Delta Q$ ) и внутри источника ( $\Delta Q_{\text{ист}}$ ):

$$\Delta Q + \Delta Q_{\text{ист}} = \Delta A_{\text{ст}} = \mathcal{E} I \Delta t.$$

Внешняя цепь может представлять собой не только проводник с сопротивлением  $R$ , но и какое-либо устройство, потребляющее мощность, например, электродвигатель постоянного тока. В этом случае под  $R$  нужно понимать *эквивалентное сопротивление нагрузки*. Энергия, выделяемая во внешней цепи, может частично или полностью преобразовываться не только в тепло, но и в другие виды энергии, например, в механическую работу, совершаемую электродвигателем.

Полная мощность источника, то есть работа, совершаемая сторонними силами за единицу времени, равна:

$$P_{\text{ист}} = \mathcal{E} I = \frac{\mathcal{E}^2}{R + r}.$$

Во внешней цепи выделяется мощность:

$$P = RI^2 = \mathcal{E} I - rI^2 = \frac{\mathcal{E}^2 R}{(R + r)^2}.$$

Отношение  $\eta = \frac{P}{P_{\text{ист}}}$ , равное  $\eta = \frac{P}{P_{\text{ист}}} = 1 - \frac{r}{\mathcal{E}} I = \frac{R}{R + r}$ , называется *коэффициентом полезного действия источника*.

На рисунке 2.26 графически представлены зависимости мощности источника  $P_{\text{ист}}$ , полезной мощности  $P$ , выделяемой во внешней цепи, и коэффициента полезного действия  $\eta$  от тока в цепи  $I$  для источника с ЭДС, равной  $\mathcal{E}$ , и внутренним сопротивлением  $r$ .

Значение тока, при котором полезная мощность принимает макси-

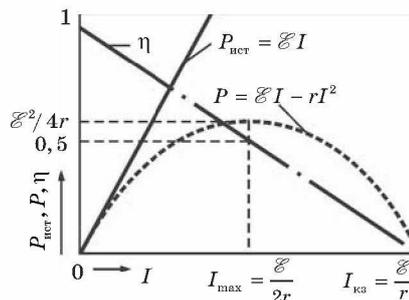


Рис. 2.26

мальную величину, можно найти, взяв производную по току выражения  $P = \mathcal{E}I - rI^2$  и приравняв ее к нулю:  $\mathcal{E} - 2rI = 0$ .

Отсюда  $I_{\max} = \frac{\mathcal{E}}{2r}$ .

Ток в цепи может изменяться в пределах от  $I = 0$  (при  $R = \infty$ ) до  $I = I_{\text{кз}} = \frac{\mathcal{E}}{r}$  (при  $R = 0$ ).

Максимальная мощность во внешней цепи  $P_{\max}$ , равная  $P_{\max} = \frac{\mathcal{E}^2}{4r}$ , достигается при  $R = r$ . При этом ток в цепи

$I_{\max} = \frac{1}{2}I_{\text{кз}} = \frac{\mathcal{E}}{2r}$ , а КПД источника равен 50 % (рис. 2.26).

Максимальное значение КПД источника достигается при  $I \rightarrow 0$ , т. е. при  $R \rightarrow \infty$ . В случае короткого замыкания полезная мощность  $P = 0$  и вся мощность выделяется внутри источника, что может привести к его перегреву и разрушению. КПД источника при этом обращается в нуль.

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ К ГЛАВЕ II

1. Что такое электрический ток? При каких условиях возникает электрический ток?
2. Назовите действия электрического тока. Какое действие тока наблюдается всегда?
3. Что называется силой электрического тока, в каких единицах она измеряется?
4. Что такое плотность тока, в чем она измеряется?
5. Как зависит сопротивление проводника от размеров, материала и температуры?
6. Сформулируйте закон Ома для участка цепи.
7. Объясните формулы для  $U$ ,  $I$ ,  $R$  при последовательном и параллельном соединении проводников.
8. Как подсоединяются приборы для измерения силы тока и напряжения? Как вычисляется добавочное сопротивление и сопротивление шунта?
9. Какие силы называются сторонними? В каких устройствах они возникают?
10. Что называется ЭДС источника, и в каких единицах она измеряется?
11. Сформулируйте закон Ома для полной цепи постоянного тока. Чему равен ток короткого замыкания?

12. Укажите, при каких условиях разность потенциалов полюсов элемента равна его ЭДС?
13. Как вычисляется ЭДС эквивалентного источника при последовательном и параллельном соединении источников?
14. Сформулируйте правила Кирхгофа для расчета электрических цепей.
15. Приведите формулы работы и мощности тока. В каких единицах они измеряются?
16. Объясните зависимость полезной мощности от силы тока. При какой силе тока она максимальна?
17. Что называется КПД источника тока?

### ТЕСТОВЫЕ ЗАДАНИЯ К ГЛАВЕ II

1. (01/8-39). В каких единицах выражается температурный коэффициент сопротивления металлов?

- А) К.      В) Ом/К.      С) Ом · К.      D) К/Ом.      E) К<sup>-1</sup>.

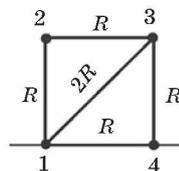
2. (01/7-14). Каково сопротивление медной проволоки (в омах)

при 100 °С, если оно равно 2 Ом при 50 °С? Температурный коэффициент сопротивления меди равен 0,004 К<sup>-1</sup>.

- А) 0,5.      В) 4,66.      С) 1,16.      D) 2,33.      E) 4.

3. (03/7-49). Определите сопротивление участка цепи между точками 1 и 4 в схеме, изображенной на рисунке.

- А)  $5R/3$ .      С)  $3R/2$ .      E)  $4R$ .  
 В)  $6R$ .      D)  $2R/3$ .



4. (03/5-27). При последовательном соединении двух проводников их общее сопротивление оказалось равным 5 Ом, а при параллельном соединении — 1,2 Ом. Определите отношение сопротивлений проводников.

- А) 2.      В) 1,5.      С) 1.      D) 0,75.      E) 0,3.

5. (03/5-38). К амперметру с сопротивлением 0,04 Ом параллельно соединен медный провод длиной 15 см и сечением 3 мм<sup>2</sup>. Какова сила тока в проводе (А), если амперметр показывает 0,17 А? Удельное сопротивление меди равно  $1,7 \cdot 10^{-8}$  Ом · м.

- А) 2,8.      В) 3,2.      С) 4.      D) 5.      E) 8.

6. (03/7-52). Внутреннее сопротивление вольтметра 300 Ом. Во сколько раз увеличится цена деления вольтметра, если к нему соединить дополнительное сопротивление 1200 Ом?

- А) 3.      В) 4.      С) 5.      D) 6.      E) 7.

7. (04/2-62). Проводник сопротивлением 4,8 Ом подключили к источнику тока с ЭДС 5В и внутренним сопротивлением 0,2 Ом.

Определите падение напряжения на проводнике (в вольтах).

- А) 10.    В) 1.    С) 2,8.    D) 4,8.    E) 5.

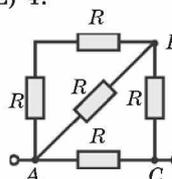
8. (03/1-60). Сопротивление реостата, подключенного к аккумулятору, равно внутреннему сопротивлению аккумулятора. Во сколько раз увеличится напряжение на реостате, если его сопротивление увеличить в 2 раза?

- А) 4/3.    В) 3/2.    С) 2.    D) 3.    E) 4.

9. (03/1-61). Сопротивление реостата, подключенного к аккумулятору, равно внутреннему сопротивлению аккумулятора. Во сколько раз уменьшится напряжение на реостате, если его сопротивление уменьшить в 2 раза?

- А) 2.    В) 1,5.    С) 3.    D) 3,5.    E) 4.

10. (02/12-49). Во сколько раз сопротивление между точками А и С цепи, приведенной на рисунке, больше, чем сопротивление между точками А и В?



- А) 4.    В) 2,5.    С) 1,25.    D) 2.    E) 8.

11. (04/2-17). Проводник сопротивлением  $R$  подключен к источнику постоянного напряжения. Во сколько раз уменьшится сила тока в нем, если к нему параллельно присоединить проводник сопротивлением  $2R$ ?

- А) 2.    В) не изменится.    С) 3.    D) 4.    E) 1,5.

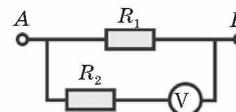
12. (00/4-11). Амперметр, сопротивление которого  $0,32 \text{ Ом}$ , зашунтирован сопротивлением  $0,08 \text{ Ом}$ . Амперметр показывает  $4 \text{ А}$ . Чему равна сила тока в цепи (в амперах)?

- А) 16.    В) 20.    С) 32.    D) 40.    E) 8.

13. (03/1-30). При включении шунта цена деления амперметра увеличилась в 2 раза. Во сколько раз увеличится цена деления, если включить еще один такой же шунт параллельно первому?

- А) 3.    В) 4.    С) 5.    D) 2,5.    E) 1,5.

14. (02/12-68). На схеме  $R_1 = 800 \text{ Ом}$ ,  $R_2 = 1000 \text{ Ом}$ , общее сопротивление равно  $480 \text{ Ом}$ . Во сколько раз увеличен предел измерения вольтметра?



- А) 2.    В) 3.    С) 4.    D) 5.    E) 6.

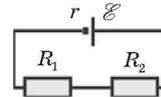
15. (03/1-62). Каково внутреннее сопротивление (в омах) источника тока с ЭДС  $9 \text{ В}$ , если падение напряжения на внешней цепи с сопротивлением  $4 \text{ Ом}$  равно  $8 \text{ В}$ ?

- А) 0,25.    В) 0,5.    С) 1.    D) 1,5.    E) 2.

16. (00/3-11). Вольтметр, подсоединенный к источнику тока с ЭДС  $\mathcal{E} = 51$  В и внутренним сопротивлением  $r = 10$  Ом, показывает 50 В. Чему равно внутреннее сопротивление вольтметра (в омах)?

- А) 20. В) 50. С) 100. D) 500. E) 10.

17. (00/3-8). Цепь состоит из источника тока с ЭДС  $\mathcal{E} = 9$  В, внутренним сопротивлением  $r = 10$  Ом и проводников сопротивлениями  $R_1 = 30$  Ом,  $R_2 = 50$  Ом. Чему равно напряжение (В) на проводнике  $R_2$ ?

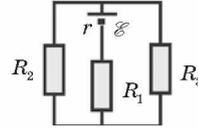


- А) 5. В) 4. С) 3. D) 1. E) 9.

18. (02/8-3). При каком отношении внутреннего сопротивления источника питания к внешнему сопротивлению напряжение на зажимах источника составляет 20 % от его ЭДС?

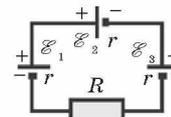
- А)  $r/R = 1$ . В)  $r/R = 2$ . С)  $r/R = 5$ . D)  $r/R = 4$ . E)  $r/R = 1/2$ .

19. (00/10-26). Определите силу тока через источник (в амперах).  $\mathcal{E} = 3$  В,  $r = 0,8$  Ом,  $R_1 = 0,6$  Ом,  $R_2 = 2$  Ом,  $R_3 = 8$  Ом.



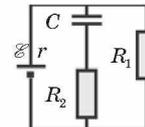
- А) 3. В) 2,5. С) 2. D) 1,5. E) 1.

20. (04/2-63). Определите напряжение на сопротивлении  $R$  (в вольтах).  $\mathcal{E}_1 = 5$  В,  $\mathcal{E}_2 = 3$  В,  $\mathcal{E}_3 = 4$  В,  $r = 10$  Ом и  $R = 70$  Ом.



- А) 14. В) 1,4. С) 7. D) 0,7. E) 8,4.

21. (00/3-7). Источник тока с ЭДС  $\mathcal{E} = 10$  В и внутренним сопротивлением  $r = 1$  Ом соединен по схеме, показанной на рисунке. Каково напряжение (В) на конденсаторе  $C$ , если  $R_1 = 9$  Ом и  $R_2 = 10$  Ом?



- А) 0. В) 0,1. С) 1. D) 9. E) 10.

22. (02/11-31). Источники с ЭДС  $\mathcal{E}_1$  и  $\mathcal{E}_2$  соединены параллельно. Какова разность потенциалов между полюсами источников, если их внутренние сопротивления одинаковы?

- А)  $\mathcal{E}_1 + \mathcal{E}_2$ . В)  $(\mathcal{E}_1 - \mathcal{E}_2)/2$ . С) 0. D)  $\mathcal{E}_1 - \mathcal{E}_2$ . E)  $(\mathcal{E}_1 + \mathcal{E}_2)/2$ .

23. (03/4-26). Сопротивление внешней цепи в 4 раза больше внутреннего сопротивления источника тока. Каково падение напряжения во внешней цепи (В), если ЭДС источника равна 12,5 В?

- А) 2,5. В) 6,5. С) 7,5. D) 8. E) 10.

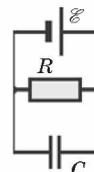
24. (6-45). Чему равно напряжение на клеммах источника с ЭДС  $\mathcal{E}$ , если внешнее сопротивление цепи в 2 раза больше, чем внутреннее?

- А)  $\mathcal{E}$ . В)  $2\mathcal{E}/3$ . С)  $\mathcal{E}/2$ . D)  $3\mathcal{E}/2$ . E)  $\mathcal{E}/3$ .

25. (03/5-60). При подключении к гальваническому элементу вольтметр с бесконечно большим внутренним сопротивлением показал 2 В. При замыкании элемента проводником с сопротивлением 2 Ом этот вольтметр показал 1 В. Каково внутреннее сопротивление элемента (Ом)?

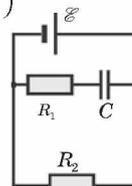
- А) 2.    В) 1,6.    С) 1.    D) 0,5.    E) 0,4.

26. (01/1-63). Электрическая цепь состоит из источника ЭДС  $\mathcal{E}$  с внутренним сопротивлением  $r$ , внешнего сопротивления  $R$  и конденсатора  $C$ . Чему равен заряд на конденсаторе?



- А)  $C\mathcal{E}$     В)  $\frac{C\mathcal{E}R}{r}$     С)  $\frac{C\mathcal{E}R}{r+R}$     D)  $\frac{C\mathcal{E}R}{R-r}$     E)  $C\mathcal{E}\left(1+\frac{r}{R}\right)$ .

27. (01/12-49). Каков заряд на обкладках конденсатора (мкКл), если  $C = 2$  мкФ,  $\mathcal{E} = 21$  В,  $r = 1$  Ом и  $R_1 = R_2 = 20$  Ом?



- А) 40.    В) 25.    С) 15.    D) 2.    E) 1.

28. (03/4-24). К источнику питания с внутренним сопротивлением  $r$  подключен проводник с сопротивлением  $R = r$ . Как изменится сила тока в этом проводнике, если к нему параллельно присоединить такой же проводник?

- А) не изменится.    D) уменьшится в 1,5 раза.  
 В) увеличится в 1,5 раза.    E) увеличится в 2 раза.  
 С) уменьшится в 2 раза.

29. (03/9-1). Какое число источников с ЭДС 2,5В и внутренним сопротивлением 0,1 Ом надо соединить последовательно в батарею, чтобы напряжение во внешней цепи было равно 100 В при силе тока 5 А?

- А) 25.    В) 36.    С) 38.    D) 40.    E) 50.

30. (03/5-39). В электрочайнике с сопротивлением спирали 50 Ом находится 600 см<sup>3</sup> воды при температуре 0 °С. Какое время (мин) требуется для того, чтобы вода нагрелась до кипения и выкипела, если напряжение в сети равно 200 В, а КПД чайника — 60 %? Удельная теплоемкость воды равна 4,2 кДж/(кг·К), удельная теплота парообразования 2,3 МДж/кг.

- А) 57.    В) 28.    С) 32.    D) 41.    E) 50.

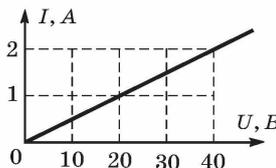
31. (03/4-41). Каково отношение сопротивлений ( $R_2/R_1$ ) двух лампочек одинаковой мощности, рассчитанных на напряжения  $U_1 = 6$  В и  $U_2 = 12$  В?

- А) 1/4.    В) 1/2.    С) 1.    D) 2.    E) 4.

32. (03/4-42). Какую мощность (Вт) потребляет лампа с номинальной мощностью 100 Вт и рассчитанная на напряжение 220 В при подключении на напряжение 110 В?

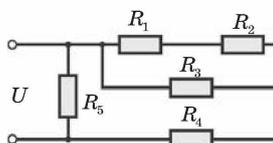
- А) 12,5. В) 25. С) 50. D) 70. E) 75.

33. (01/2-37). Используя график зависимости силы тока на участке цепи от приложенного к этому участку напряжения, найдите мощность (в ваттах), выделяемую на участке при напряжении 40 В.



- А) 80. В) 40. С) 20. D) 10. E) 1/20.

34. (03/7-53). Определите мощность, выделяемую в электрической цепи, изображенной на рисунке (Вт).  $U = 12$  В,  $R_1 = 7$  Ом,  $R_2 = 5$  Ом,  $R_3 = R_5 = 4$  Ом,  $R_4 = 9$  Ом.



- А) 40. В) 36. С) 48. D) 42. E) 24.

35. (03/4-23). Во сколько раз уменьшится мощность, выделяемая в сопротивлении  $R$ , подключенном к источнику постоянного напряжения, если к нему последовательно присоединить сопротивление  $2R$ ?

- А) 1,5. В) 2. С) 3. D) 5. E) 9.

36. (02/2-33). Как изменятся тепловые потери в линии электропередачи при увеличении напряжения на линии в 2 раза?

- А) не изменятся. D) уменьшатся в 2 раза.  
 В) увеличатся в 4 раза. E) увеличатся в 2 раза.  
 С) уменьшатся в 4 раза.

37. (02/9-46). При увеличении напряжения без изменения мощности источника потери энергии на линиях электропередачи уменьшились в 100 раз. Во сколько раз увеличено напряжение?

- А) 5. В) 10. С) 20. D) 100. E) 50.

38. (02/9-47). Напряжение источника тока 16 кВ, потери энергии на линиях электропередачи за сутки 240 кВт·ч. На сколько кВ надо увеличить напряжение источника, чтобы уменьшить потери энергии на 75 %?

- А) 4. В) 8. С) 12. D) 16. E) 24.

39. (02/9-48). Каково может быть максимальное сопротивление проводов (в омах), чтобы при передаче энергии от генератора с мощностью 60 кВт и напряжением 2400 В падение напряжения на линии не превышало 10 %?

- А) 60. В) 48. С) 24. D) 19,2. E) 9,6.

40. (03/1-15). При какой мощности потребителя (в кВт) диск счетчика вращается с частотой 1 Гц? 1200 вращений диска соответствуют энергии 1 кВт·ч.

- А) 3. В) 3,5. С) 4. D) 5. E) 2,5.

41. (03/1-32). Сколько метров нихромовой проволоки сечением  $0,6 \text{ мм}^2$  требуется для изготовления спирали электроплитки мощностью  $180 \text{ Вт}$ , рассчитанной на напряжение  $36 \text{ В}$ ? Удельное сопротивление нихрома  $\rho = 1,2 \cdot 10^{-6} \text{ Ом}\cdot\text{м}$ .

- А) 36. В) 7,2. С) 3,6. D) 2,4. E) 1,8.

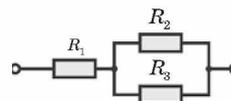
42. (02/9-44). Электровоз при скорости  $18 \text{ м/с}$  создает силу тяги  $45 \text{ кН}$ . Чему равна общая сила тока через двигатели (в амперах), если их КПД  $90 \%$ , а напряжение сети  $1,5 \text{ кВ}$ ?

- А) 250. В) 300. С) 400. D) 500. E) 600.

43. (03/1-58). Резистор с сопротивлением  $R$  подключен к источнику постоянного напряжения. Какое сопротивление надо соединить с ним последовательно, чтобы мощность, выделяемая на резисторе, уменьшилась в  $2,25$  раза?

- А)  $2,25R$ . В)  $1,5R$ . С)  $0,5R$ . D)  $0,75R$ . E)  $R$ .

44. (12-67). Напряжение на резисторе  $R_1 = 10 \text{ В}$ , в нем выделяется мощность  $40 \text{ Вт}$ . Сила тока через резистор  $R_2 = 2 \text{ А}$ , сопротивление резистора  $R_3 = 4 \text{ Ом}$ . Определите общее сопротивление цепи (в омах).



- А)  $1/3$ . В)  $0,9$ . С)  $2$ . D)  $4$ . E)  $4,5$ .

45. (03/1-78). Во сколько раз уменьшится общая мощность двух одинаковых лампочек, подключенных к сети параллельно, если их подключить к сети последовательно?

- А) 2. В) 4. С) 8. D) 12. E) 16.

46. (02/9-45). Вагон освещается пятью лампочками по  $25 \text{ Вт}$  каждая, соединенных последовательно. Как изменится освещенность вагона, если одна из ламп заменяется лампой мощностью  $40 \text{ Вт}$ ?

- А) ответ зависит от напряжения сети.  
В) не изменится. С) уменьшится. D) увеличится. E) НПО.

47. (02/12-66). Сколько электронов проходит через участок цепи с напряжением  $200 \text{ В}$  за время совершения работы на этом участке в  $16 \text{ кДж}$ ?

- А)  $8 \cdot 10^{18}$ . В)  $5 \cdot 10^{19}$ . С)  $6,02 \cdot 10^{23}$ . D)  $5 \cdot 10^{20}$ . E)  $1,6 \cdot 10^{19}$ .

48. (04/1-20). ЭДС батареи  $14 \text{ В}$ , внешнее сопротивление  $10 \text{ Ом}$ , сила тока в цепи  $1,2 \text{ А}$ . Определите мощность (Вт), выделяемую внутри батареи.

- А) 2,4. В) 4,8. С) 7,2. D) 8,4. E) 14,4.

49. (02/10-57). Электрический чайник имеет два нагревательных элемента. Если в сеть подключить только первый элемент, то вода закипает за  $1 \text{ ч}$ . Если подключить только второй элемент, то

вода закипает за 0,5 ч. За сколько минут закипает вода, если в сеть подключаются одновременно оба элемента (параллельно)?

- А) 15.    В) 20.    С) 25.    D) 30.    E) 28.

50. (04/2-18). Сопротивления  $R$  и  $2R$  соединены параллельно и подключены к источнику тока. Какое количество теплоты (в джоулях) выделится на сопротивлении  $2R$  за то же самое время, за которое в сопротивлении  $R$  выделится 100 Дж теплоты?

- А) 400.    В) 200.    С) 100.    D) 50.    E) 25.

51. (04/1-21). Каков КПД источника тока, если его ЭДС 12 В, а напряжение на клеммах 9 В?

- А) 0,95.    В) 0,9.    С) 0,75.    D) 0,8.    E) 0,85.

52. (02/8-17). Какова ЭДС аккумулятора (в вольтах), если при напряжении на клеммах, равном 12В, КПД аккумулятора равен 0,6?

- А) 7,2.    В) 14,4.    С) 20.    D) 40.    E) 8.

53. (96/10-46). При зарядке аккумулятора сила тока равна 4 А, напряжение в клеммах 12,8 В; при разрядке сила тока равна 6 А, а напряжение на клеммах 11,1 В. Чему равно внутреннее сопротивление аккумулятора (Ом)?

- А) 0,1.    В) 0,17.    С) 1,11.    D) 1,7.    E) 17.

54. (03/3-73). Когда внешнее сопротивление изменилось с 6 до 21 Ом, КПД источника увеличился в 2 раза. Определите внутреннее сопротивление источника (Ом).

- А) 7.    В) 14.    С) 15.    D) 16.    E) 21.

55. (01/2-36). Выражение  $\mathcal{E}^2 r / (R + r)^2$  представляет собой ...

- А) мощность, выделяющуюся внутри источника тока.  
В) мощность, выделяющуюся во внешней цепи.  
С) напряжение на зажимах источника тока.  
D) работу перемещения единицы заряда по замкнутой цепи.  
E) силу тока в замкнутой цепи.

56. (01/12-68). Чему равен КПД источника тока, если внешнее сопротивление электрической цепи равно внутреннему сопротивлению источника тока?

- А) 25 %.    В) 35 %.    С) 40 %.    D) 75 %.    E) 50 %.

## Глава III. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК В РАЗЛИЧНЫХ СРЕДАХ

### § 21. Электрический ток в металлах

**Доказательство электронной природы тока в металлах.** Электрический ток в металлах — это упорядоченное движение электронов под действием электрического поля. При протекании тока по металлическому проводнику не происходит переноса вещества, следовательно, ионы металла не принимают участия в переносе электрического заряда.

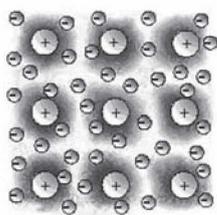


Рис. 3.1

Положительно заряженные ионы металла, образующие кристаллическую решетку, удерживаются вблизи положений равновесия силами взаимодействия с «газом свободных электронов» (рис. 3.1). Электронный газ образуется за счет одного или нескольких валентных электронов, отданных каждым атомом.

Свободные электроны способны блуждать по всему объему кристалла.

Доказательство электронной природы тока в металлах было получено в опытах Л. И. Мандельштама и Н. Д. Папалекси (1913 г.), а также в опытах Р. Толмена и Б. Стюарта (1916 г.) с инерцией электронов.

**Опыт Толмена и Стюарта** (рис. 3.2).

Катушка с большим числом витков проволоки приводилась в быстрое вращение вокруг своей оси. Концы катушки с помощью скользящих контактов и гибких проводов присоединены к чувствительному гальванометру Г. Раскрученная катушка резко тормозилась, и в цепи возникал кратковременный ток, обусловленный инерцией носителей заряда. Полный заряд, протекающий по цепи, измерялся по отбросу стрелки гальванометра. При торможении вращающейся катушки на каждый носитель заряда  $e$  действует сила инерции, равная  $F = -m \frac{\Delta v}{\Delta t}$ , которая играет

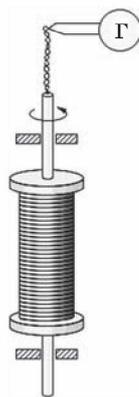


Рис. 3.2

роль сторонней силы, то есть силы неэлектрического происхождения. Сторонняя сила, отнесенная к единице заряда, по определению является напряженностью  $E_{\text{ст}}$  поля сторонних сил. На основании результатов опытов Толмена и Стюарта было установлено, что носители свободного заряда в металлах имеют отрицательный знак, а отношение заряда носителя к его массе близко к удельному заряду электрона, полученному из других опытов: модуль заряда электрона (*элементарный заряд*) равен  $e = 1,60218 \cdot 10^{-19}$  Кл, а его удельный заряд  $\frac{e}{m} = 1,75882 \cdot 10^{11}$  Кл/кг.

Высокая электропроводность металлов объясняется высокой концентрацией свободных электронов, равной по порядку величины числу атомов в единице объема.

**Классическая электронная теория проводимости металлов (теория П. ДрUDE и Х. Лоренца).** Согласно этой теории, электроны в металлах ведут себя как электронный газ, во многом похожий на идеальный газ.

Из-за взаимодействия с ионами электроны могут покинуть металл, лишь преодолев так называемый *потенциальный барьер*. Высота этого барьера называется *работой выхода*. При обычных (комнатных) температурах у электронов не хватает энергии для преодоления потенциального барьера, т.е. энергии взаимодействия с ионами.

Ионы совершают тепловые колебания вблизи положений равновесия — узлов кристаллической решетки. Свободные электроны движутся хаотично и при своем движении сталкиваются с ионами решетки (рис. 3.3). В результате таких столкновений устанавливается термодинамическое равновесие между электронным газом и решеткой.

Согласно теории ДрUDE–Лоренца, электроны обладают такой же средней энергией теплового движения, как и молекулы одноатомного идеального газа. Это позволяет оценить среднюю скорость  $\bar{v}_T$  теплового движения электронов по формулам молекулярно-кинетической теории. При комнатной температуре она оказывается примерно равной  $10^5$  м/с.

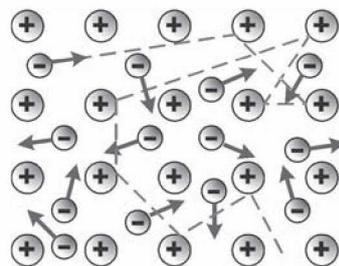


Рис. 3.3

При наложении внешнего электрического поля в металлическом проводнике кроме теплового движения электронов возникает их упорядоченное движение (дрейф), то есть электрический ток (рис. 3.4). Среднюю скорость  $\bar{v}_d$  дрейфа можно оценить следующим образом. За интервал времени  $\Delta t$  через поперечное сечение  $S$  проводника пройдут все электроны, находившиеся в объеме  $\bar{v}_d \Delta t S$ . Число таких электронов равно  $n \bar{v}_d \Delta t S$ , где  $n$  — средняя концентрация свободных электронов, примерно равная числу атомов в единице объема металлического проводника.

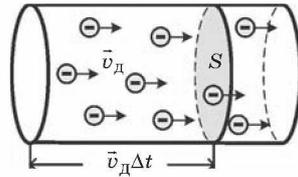


Рис. 3.4

Через сечение проводника за время  $\Delta t$  пройдет заряд  $\Delta q = enS\bar{v}_d\Delta t$ . Отсюда следует:  $I = \frac{\Delta q}{\Delta t} = enS\bar{v}_d \Rightarrow \bar{v}_d = \frac{I}{enS}$ .

Концентрация  $n$  атомов в металлах находится в пределах  $10^{28} - 10^{29} \text{ м}^{-3}$ .

Оценка по этой формуле для металлического проводника сечением  $1 \text{ мм}^2$ , по которому течет ток  $10 \text{ А}$ , дает для средней скорости  $\bar{v}_d$  упорядоченного движения электронов значение в пределах  $0,6 - 6 \text{ мм/с}$ . Таким образом, средняя скорость  $\bar{v}_d$  упорядоченного движения электронов в металлических проводниках на много порядков меньше средней скорости  $\bar{v}_T$  их теплового движения ( $\bar{v}_d \ll \bar{v}_T$ ). Малая скорость дрейфа не противоречит опытному факту, что ток во всей цепи постоянного тока устанавливается практически мгновенно. Замыкание цепи вызывает распространение электрического поля со скоростью  $c = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$ . Через время порядка  $l/c$  ( $l$  — длина цепи) вдоль цепи устанавливается стационарное распределение электрического поля и в ней начинается упорядоченное перемещение (движение) электронов.

В классической электронной теории металлов предполагается, что движение электронов подчиняется законам механики Ньютона. В этой теории пренебрегают взаимодействием электронов между собой, а их взаимодействие с положительными ионами сводят только к соударениям. Предполагается также, что при каждом соударении электрон передает решетке всю накопленную в электрическом поле энергию, и поэтому после соударения он начинает движение с нулевой дрейфовой скоростью.

Несмотря на то, что все эти допущения являются весьма приближенными, классическая электронная теория качественно объясняет законы электрического тока в металлических проводниках.

**Закон Ома.** В промежутке между соударениями на электрон действует сила, равная по модулю  $eE$ , в результате чего он приобретает ускорение  $\frac{e}{m}E$ . Поэтому к концу свободного пробега дрейфовая скорость электрона равна

$v_{\text{д}} = (v_{\text{д}})_{\text{max}} = \frac{eE}{m}\tau$ , где  $\tau$  — время свободного пробега, которое предполагается одинаковым для всех электронов. Среднее значение скорости дрейфа  $\bar{v}_{\text{д}}$  равно половине максимального значения:

$$\bar{v}_{\text{д}} = \frac{1}{2}(v_{\text{д}})_{\text{max}} = \frac{1}{2} \cdot \frac{eE}{m}\tau.$$

Для проводника длиной  $l$  и сечением  $S$ , с концентрацией электронов  $n$ , ток в проводнике может быть записан в виде:

$$I = enS\bar{v}_{\text{д}} = \frac{1}{2} \cdot \frac{e^2\tau nS}{m} E = \frac{e^2\tau nS}{2ml} U,$$

где  $U = El$  — напряжение на концах проводника. Полученная формула выражает закон Ома для металлического проводника. Электрическое сопротивление проводника равно  $R = \frac{2m}{e^2n\tau} \cdot \frac{l}{S}$ , а удельное сопротивление  $\rho$  и удельная проводимость  $\gamma$  выражаются соотношениями:

$$\rho = \frac{2m}{e^2n\tau}; \quad \gamma = \frac{1}{\rho} = \frac{e^2n\tau}{2m}.$$

**Закон Джоуля–Ленца.** К концу свободного пробега электроны приобретают под действием поля кинетическую энергию:

$$\frac{1}{2}m(v_{\text{д}})_{\text{max}}^2 = \frac{1}{2} \cdot \frac{e^2\tau^2}{m} E^2.$$

Согласно сделанным предположениям, вся эта энергия передается решетке при соударении и переходит в тепло. За время  $\Delta t$  каждый электрон испытывает  $\Delta t/\tau$  соударений. В проводнике сечением  $S$  и длины  $l$  имеется  $nSl$  электронов. Отсюда следует, что выделяемое в проводнике за время  $\Delta t$  тепло равно:

$$\Delta Q = \frac{nSl\Delta t}{\tau} \cdot \frac{e^2\tau^2}{2m} E^2 = \frac{ne^2\tau}{2m} \cdot \frac{S}{l} U^2\Delta t = \frac{U^2}{R} \Delta t.$$

Это соотношение выражает закон Джоуля–Ленца.

Таким образом, классическая электронная теория объясняет существование электрического сопротивления металлов, законы Ома и Джоуля–Ленца. Однако в ряде вопросов классическая электронная теория приходит к выводам, находящимся в противоречии с опытом.

Классическая электронная теория не может, например, объяснить температурную зависимость удельного сопротивления металлов. Теория дает  $\rho \sim \sqrt{T}$ , в то время как из эксперимента получается зависимость  $\rho \sim T$ . Объяснение механизма этого явления было дано только через 60 лет после его открытия на основе квантово-механических представлений.

## § 22. Электрический ток в электролитах

**Электролитами** называются электропроводящие среды, в которых протекание электрического тока сопровождается переносом вещества. Носителями свободных зарядов в электролитах являются положительно и отрицательно заряженные ионы. Основными представителями электролитов являются *водные растворы неорганических кислот, солей и оснований*. К электролитам относятся также многие соединения металлов в расплавленном состоянии.

Прохождение электрического тока через электролит сопровождается выделением веществ на электродах. Это явление получило название **электролиза** (рис. 3.5).

Электрический ток в электролитах представляет собой упорядоченное перемещение ионов обоих знаков в противоположных направлениях.

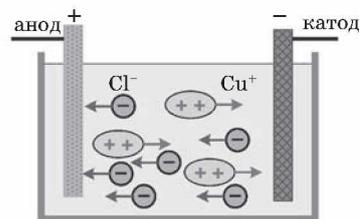


Рис. 3.5

Положительные ионы движутся к отрицательному электроду (*катоду*), отрицательные ионы — к положительному электроду (*аноду*). Поэтому они называются **катионами** и **анионами** соответственно.

Ионы обоих знаков появляются в водных растворах

солей, кислот и щелочей в результате расщепления части нейтральных молекул. Это явление называется *электролитической диссоциацией*. Например, хлорид меди  $\text{CuCl}_2$  диссоциирует в водном растворе на ионы меди и хлора:



Достигнув катода, ионы меди нейтрализуются избыточными электронами катода и превращаются в нейтральные атомы, оседающие на катоде. Например, ионы хлора, достигнув анода, отдают по одному электрону, нейтральные атомы хлора соединяются попарно и образуют молекулы хлора  $\text{Cl}_2$ . Хлор выделяется на аноде в виде пузырьков.

Во многих случаях электролиз сопровождается *вторичными реакциями* продуктов разложения, выделяющихся на электродах, с материалом электродов или растворителей. Примером может служить электролиз водного раствора сульфата меди  $\text{CuSO}_4$  (медный купорос) в том случае, когда электроды, опущенные в электролит, изготовлены из меди. Диссоциация молекул сульфата меди происходит по схеме  $\text{CuSO}_4 \rightleftharpoons \text{Cu}^{2+} + \text{SO}_4^{2-}$ .

Нейтральные атомы меди отлагаются в виде твердого осадка на катоде. Таким путем можно получить химически чистую медь. Ион  $\text{SO}_4^{2-}$  отдает аноду два электрона и превращается в нейтральный радикал,  $\text{SO}_4$  вступает во вторичную реакцию с медным анодом:  $\text{SO}_4 + \text{Cu} = \text{CuSO}_4$ .

Образовавшаяся молекула сульфата меди переходит в раствор.

Таким образом, при прохождении электрического тока через водный раствор сульфата меди происходит растворение медного анода и отложение меди на катоде. Концентрация раствора сульфата меди при этом не изменяется.

**Закон Фарадея** (англ., 1833 г.): *масса вещества  $m$ , выделившегося в процессе электролиза на электроде, прямо пропорциональна заряду  $Q$ , прошедшему через электролит:*

$$m = kQ = kIt.$$

Величину  $k$  называют *электрохимическим эквивалентом*.

Масса выделившегося на электроде вещества равна массе всех ионов, пришедших к электроду:

$$m = m_0 N = m_0 \frac{Q}{q_0} = \frac{m_0}{q_0} It.$$

Здесь  $m_0$  и  $q_0$  — масса и заряд одного иона,  $N = \frac{Q}{q_0}$  — число ионов, пришедших к электроду при прохождении через электролит заряда  $Q$ . Таким образом, электрохимический эквивалент  $k$  равен отношению массы  $m_0$  иона данного вещества к его заряду  $q_0$ .

Так как заряд иона равен произведению валентности вещества  $n$  на элементарный заряд  $e$  ( $q_0 = ne$ ), то выражение для электрохимического эквивалента  $k$  можно записать в виде:

$$k = \frac{m_0}{q_0} = \frac{m_0 N_A}{neN_A} = \frac{1}{F} \cdot \frac{\mu}{n},$$

где  $N_A$  — постоянная Авогадро;  $\mu = m_0 N_A$  — молярная масса вещества;  $\frac{\mu}{n} = x$  — химический эквивалент вещества.

**II закон Фарадея:** электрохимический эквивалент вещества прямо пропорционален химическому эквиваленту,

то есть  $k \sim x$ , или  $k = \frac{x}{F}$ .

Здесь  $F = eN_A$  — постоянная Фарадея;

$$F = eN_A = 96485 \text{ Кл/моль.}$$

Постоянная Фарадея численно равна заряду, который необходимо пропустить через электролит для выделения на электроде количества вещества, численно равного химическому эквиваленту этого вещества.

Закон Фарадея для электролиза приобретает вид:

$$m = \frac{1}{F} \cdot \frac{\mu}{n} It.$$

### Применения электролиза.

1. **Гальваностегия.** Электролитическим путем покрывают поверхности одного металла тонким слоем другого (никелирование, хромирование, омеднение и т.п.). Это прочное покрытие используют для защиты поверхности от коррозии, а также в декоративных целях (покрытие золотом, серебром, платиной).

2. **Гальванопластика.** Процесс получения отслаиваемых покрытий называется *гальванопластикой*. Если принять меры к тому, чтобы электролитическое покрытие хорошо отслаивалось от поверхности, на которую осаждался металл (этого достигают, например, нанося на поверхность

графит), можно получить копию с рельефной поверхности. В полиграфической промышленности такие копии (стереотипы) получают с матриц (оттиска набора на пластичном материале). Для этого осаждают на матрицах толстый слой железа или другого материала.

**3. Рафинирование.** При помощи электролиза осуществляют очистку металлов от примесей. Так, полученную из руды неочищенную медь отливают в форме толстых листов, которые затем помещают в ванну в качестве анодов. При электролизе медь анода растворяется, примеси, содержащие ценные и редкие металлы, выпадают на дно, а на катоде оседает чистая медь.

**4. Металлургия.** При помощи электролиза получают алюминий, натрий, магний, бериллий и другие металлы из расплавов руд. Именно этот способ получения алюминия из бокситов сделал его дешевым и распространенным в технике и быту металлом.

### § 23. Электрический ток в полупроводниках

По значению удельного электрического сопротивления *полупроводники* занимают промежуточное место между проводниками и диэлектриками. К числу полупроводников относятся многие химические элементы (германий, кремний, селен, теллур, мышьяк и др.), огромное количество сплавов и химических соединений. Самым распространенным в природе полупроводником является кремний, составляющий около 30 % земной коры.

На рисунке 3.6 приведена зависимость удельного сопротивления  $\rho(T)$  чистого полупроводника от абсолютной температуры.

У полупроводников с понижением температуры сопротивление возрастает и вблизи абсолютного нуля они практически становятся изоляторами.

Концентрация носителей свободного заряда не остается постоянной, а увеличивается с ростом температуры. Поэтому с увеличением температуры удельное сопротивление полупроводника уменьшается.

Рассмотрим механизм электрического тока в полупроводниках на примере германия (Ge) (рис. 3.7).

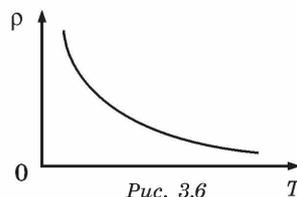


Рис. 3.6

Атомы германия имеют четыре валентных электрона на внешней оболочке.

В кристаллической решетке каждый атом окружен четырьмя ближайшими соседями. Связь между атомами в кристалле германия является *ковалентной*, т. е. осуществляется парами валентных электронов. Каждый валентный электрон принадлежит двум атомам.

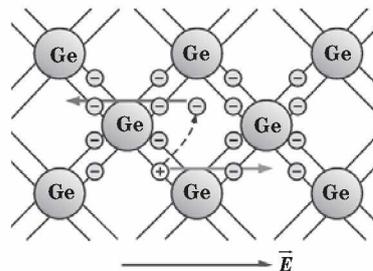


Рис. 3.7

Валентные электроны в кристалле германия сильнее связаны с атомами, чем в металлах; поэтому концентрация электронов проводимости при комнатной температуре в полупроводниках на много порядков меньше, чем у металлов. Вблизи абсолютного нуля температуры в кристалле германия все электроны заняты в образовании связей. Такой кристалл электрического тока не проводит.

**Собственная проводимость.** При повышении температуры некоторая часть валентных электронов может получить энергию, достаточную для разрыва ковалентных связей. Тогда в кристалле возникнут свободные электроны (электроны проводимости). Одновременно в местах разрыва связей образуются вакансии, которые получили название «дырок». Вакантное место может быть занято валентным электроном из соседней пары, тогда дырка переместится на новое место в кристалле. При заданной температуре полупроводника в единицу времени образуется определенное количество электронно-дырочных пар. В то же время идет обратный процесс — *рекомбинация* (при встрече свободного электрона с дыркой восстанавливается электронная связь). Электронно-дырочные пары могут рождаться также при освещении полупроводника за счет энергии электромагнитного излучения. В отсутствие электрического поля электроны проводимости и дырки участвуют в хаотическом тепловом движении.

Если полупроводник помещается в электрическое поле, то в упорядоченное движение вовлекаются не только свободные электроны, но и дырки, которые ведут себя как положительно заряженные частицы. Поэтому ток  $I$  в полупроводнике складывается из электронного  $I_e$  и дырочного  $I_d$  токов:  $I = I_e + I_d$ .

Концентрация электронов проводимости в полупроводнике равна концентрации дырок:  $n_e = n_d$ . Электронно-дырочный механизм проводимости проявляется только у чистых (без примесей) полупроводников и называется *собственной электрической проводимостью полупроводников*.

**Примесная проводимость.** Проводимость полупроводников при наличии примесей сильно изменяется (добавка примесей фосфора в кристалл кремния в количестве 0,001 атомного процента уменьшает удельное сопротивление более чем на пять порядков). Необходимым условием резкого уменьшения удельного сопротивления полупроводника при введении примесей является *отличие валентности* атомов примеси от валентности основных атомов кристалла. Различают два типа примесной проводимости — *электронную* и *дырочную*.

**Электронная проводимость** возникает, когда в кристалл германия с четырехвалентными атомами введены пятивалентные атомы (например, атомы мышьяка As, фосфора P и др.) (рис. 3.8).

Четыре валентных электрона атома мышьяка включены в образование ковалентных связей с четырьмя соседними атомами германия. Пятый валентный электрон оказался излишним; он легко отрывается от атома мышьяка и становится свободным.

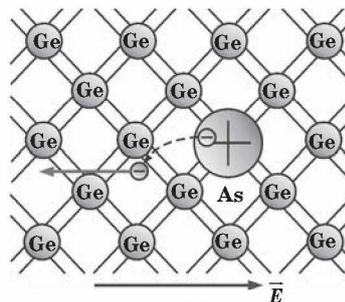


Рис. 3.8

Примесь из атомов с валентностью, превышающей валентность основных атомов полупроводникового кристалла, называется *донорной примесью*.

В результате ее введения в кристалле появляется значительное число свободных электронов. Это приводит к резкому уменьшению удельного сопротивления полупроводника — в тысячи и даже миллионы раз. Удельное сопротивление проводника с большим содержанием примесей может приближаться к удельному сопротивлению металлического проводника.

В кристалле германия с примесью мышьяка есть электроны и дырки, ответственные за собственную проводимость

кристалла. Но основным типом носителей свободного заряда являются электроны, оторвавшиеся от атомов мышьяка. В таком кристалле  $n_s \gg n_d$ . Такая проводимость называется *электронной*, а полупроводник — *полупроводником n-типа*.

**Дырочная проводимость** возникает, когда в кристалл германия введены трехвалентные атомы. Например, атом индия In создает с помощью своих валентных электронов ковалентные связи лишь с тремя соседними атомами германия (рис. 3.9)

На образование связи с четвертым атомом германия у атома индия нет электрона. Этот недостающий электрон может быть захвачен атомом индия из ковалентной связи соседних атомов германия. В этом случае атом индия превращается в отрицательный ион,

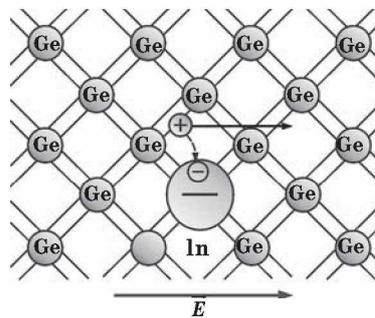


Рис. 3.9

расположенный в узле кристаллической решетки, а в ковалентной связи соседних атомов образуется вакансия — «дырка».

Примесь атомов, способных захватывать электроны, называется *акцепторной примесью*. В результате введения акцепторной примеси в кристалле разрывается множество ковалентных связей и образуются вакантные места (дырки). На эти места могут перескакивать электроны из соседних ковалентных связей, что приводит к хаотическому блужданию дырок по кристаллу.

Наличие акцепторной примеси резко снижает удельное сопротивление полупроводника за счет появления большого числа свободных дырок. Концентрация дырок в полупроводнике с акцепторной примесью значительно превышает концентрацию электронов, которые возникли из-за механизма собственной электропроводности полупроводника:  $n_d \gg n_s$ . Проводимость такого типа называется *дырочной проводимостью*, а полупроводник — *полупроводником p-типа*. Основными носителями свободного заряда в полупроводниках p-типа являются дырки.

## § 24. Электронно-дырочный переход. Полупроводниковый диод. Транзистор

В полупроводнике  $n$ -типа основными носителями свободного заряда являются электроны; их концентрация значительно превышает концентрацию дырок ( $n_e \gg n_d$ ). В полупроводнике  $p$ -типа основными носителями являются дырки ( $n_d \gg n_e$ ). При контакте двух полупроводников  $n$ - и  $p$ -типов начинается процесс диффузии: «дырки» из  $p$ -области переходят в  $n$ -область, а электроны, наоборот, из  $n$ -области в  $p$ -область (рис. 3.10). В результате в  $n$ -области вблизи зоны контакта уменьшается концентрация электронов и возникает положительно заряженный слой. В  $p$ -области уменьшается концентрация дырок и возникает отрицательно заряженный слой. На границе полупроводников образуется двойной электрический слой, электрическое поле которого препятствует процессу диффузии электронов и дырок навстречу друг другу.

Пограничная область раздела полупроводников с разными типами проводимости называется **запирающим слоем**.

Объемные заряды этого слоя создают между  $p$ - и  $n$ -областями запирающее напряжение  $U_3$ .

Запирающее напряжение  $U_3$  приблизительно равно 0,35 В для германиевых  $n$ - $p$ -переходов и 0,6 В для кремниевых.  $p$ - $n$ -переход обладает свойством односторонней проводимости. Если полупроводник с  $p$ - $n$ -переходом подключен к источнику тока так, что положительный полюс источника соединен с  $n$ -областью (рис. 3.11), а отрицательный — с  $p$ -областью, то напряженность поля в запирающем слое возрастает.

Дырки в  $p$ -области и электроны в  $n$ -области будут смещаться от  $p$ - $n$ -перехода, увеличивая тем самым ширину запирающего слоя. Ток через  $p$ - $n$ -пе-

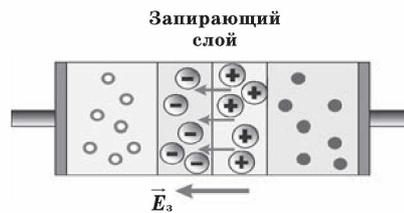


Рис. 3.10

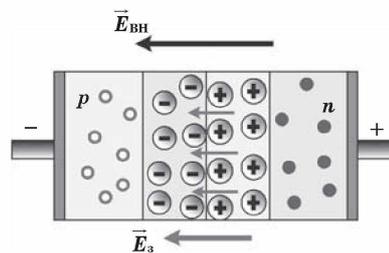


Рис. 3.11

переход практически не идет. Напряжение, поданное на  $p$ - $n$ -переход, в этом случае называют **обратным**. Незначительный обратный ток обусловлен только собственной проводимостью, т. е. наличием небольшой концентрации свободных электронов в  $p$ -области и дырок в  $n$ -области.

Если  $p$ - $n$ -переход соединить с источником так, чтобы положительный полюс источника был соединен с  $p$ -областью, а отрицательный с  $n$ -областью (рис.3.12), то напряженность электрического поля в запирающем слое будет уменьшаться, что облегчает переход основных носителей

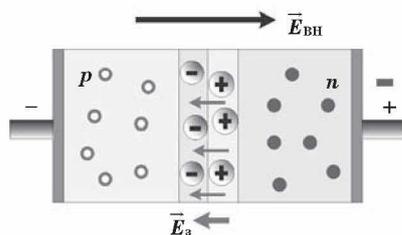


Рис. 3.12

через контактный слой. Дырки из  $p$ -области и электроны из  $n$ -области, двигаясь навстречу друг другу, будут пересекать  $p$ - $n$ -переход, создавая ток в прямом направлении. Сила тока через  $p$ - $n$ -переход в этом случае будет возрастать при увеличении напряжения источника.

Способность  $p$ - $n$ -перехода пропускать ток практически только в одном направлении используется в приборах, которые называются **полупроводниковыми диодами**. Типичная вольт-амперная характеристика кремниевого диода приведена на рисунке 3.13.

На графике использованы различные шкалы для положительных и отрицательных напряжений.

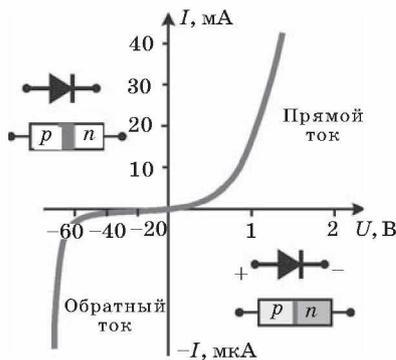


Рис. 3.13

Полупроводниковые диоды используются в выпрямителях для преобразования переменного тока в постоянный.

Полупроводниковые диоды обладают преимуществами по сравнению с вакуумными диодами: малые размеры, длительный срок службы, механическая прочность, экономичность.

Недостатком полупроводниковых диодов является зависимость их парамет-

ров от температуры. Кремниевые диоды могут работать в диапазоне температур от  $-70^{\circ}\text{C}$  до  $80^{\circ}\text{C}$ .

**Транзистор.** Полупроводниковые приборы с двумя  $p-n$ -переходами называются *транзисторами* (transfer — переносить и resistor — сопротивление). Транзисторы бывают двух типов:  $p-n-p$ -транзисторы (рис. 3.14) и  $n-p-n$ -транзисторы (рис. 3.15).

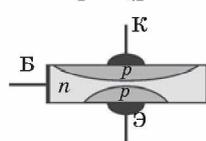


Рис. 3.14.

Транзистор структуры  $p-n-p$

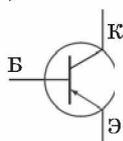


Рис. 3.15.

Транзистор структуры  $n-p-n$

В условных обозначениях разных структур стрелка эмиттера показывает направление тока через транзистор. Например, германиевый транзистор  $p-n-p$ -типа представляет собой небольшую пластинку из германия с донорной примесью, т. е.  $n$ -типа. В этой пластинке создаются две области с акцепторной примесью, т. е. с дырочной проводимостью (рис. 3.16).

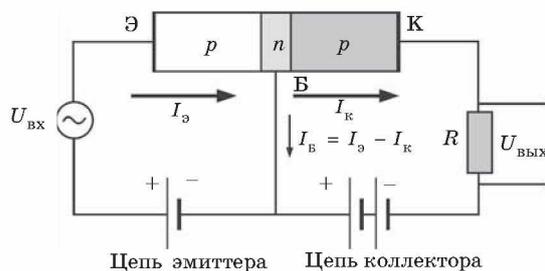


Рис. 3.16

Пластинку транзистора называют *базой* (Б), одну из областей с противоположным типом проводимости — *коллектором* (К), а вторую — *эмиттером* (Э). Оба  $n-p$ -перехода транзистора соединяются с двумя источниками тока. Переход «эмиттер–база» включается в прямом (пропускном) направлении (цепь эмиттера), а переход «коллектор–база» — в запирающем направлении (цепь коллектора).

Пока цепь эмиттера разомкнута, ток в цепи коллектора очень мал, так как для основных носителей свободного заряда — электронов в базе и дырок в коллекторе — переход заперт.

При замыкании цепи эмиттера дырки — основные носители заряда в эмиттере — переходят из него в базу, создавая в этой цепи ток  $I_{\text{э}}$ . Но для дырок, попавших в базу из эмиттера,  $n$ - $p$ -переход в цепи коллектора открыт.

Большая часть дырок захватывается полем этого перехода и проникает в коллектор, создавая ток  $I_{\text{к}}$ . Для того чтобы ток коллектора был практически равен току эмиттера, базу транзистора делают в виде очень тонкого слоя. При изменении тока в цепи эмиттера изменяется сила тока и в цепи коллектора.

Если в цепь эмиттера включен источник переменного напряжения (рис. 3.16), то на резисторе  $R$ , включенном в цепь коллектора, также возникает переменное напряжение, амплитуда которого может во много раз превышать амплитуду входного сигнала. Следовательно, транзистор выполняет роль усилителя переменного напряжения.

Качественно новым этапом электронной техники явилось развитие *микроэлектроники*, которая занимается разработкой интегральных микросхем и принципов их применения. *Интегральной микросхемой* называют совокупность большого числа взаимосвязанных элементов — сверхмалых диодов, транзисторов, конденсаторов, резисторов, соединительных проводов, изготовленных в едином технологическом процессе на одном кристалле. Микросхема размером в  $1 \text{ см}^2$  может содержать несколько сотен тысяч микроэлементов.

## § 25. Электрический ток в газах

**Ионизация газов.** Процесс протекания тока через газ называют *газовым разрядом*. При комнатной температуре воздух плохой проводник, так как газы состоят из нейтральных атомов или молекул и, следовательно, являются диэлектриками.

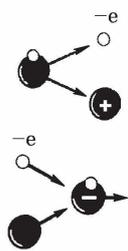


Рис. 3.17

Вследствие нагревания или воздействия излучения (ультрафиолетового, рентгеновского, радиоактивного и др.) часть атомов ионизуется — распадается на *положительно заряженные ионы* и *электроны*.

В газе могут образовываться и отрицательные ионы: они появляются благодаря присоединению электронов к нейтральным атомам (рис. 3.17).

Ионизация газов при нагревании объясняется тем, что по мере нагревания молекулы движутся быстрее. При этом некоторые молекулы начинают двигаться так быстро, что часть из них при столкновениях распадается, превращаясь в ионы. Чем выше температура, тем больше образуется ионов.

**Проводимость газов.** В газах сочетается электронная проводимость, подобная проводимости металлов, с ионной проводимостью, подобной проводимости водных растворов или расплавов электролитов.

**Рекомбинация.** При сближении электрона и положительно заряженного иона они могут вновь образовать нейтральный атом, такой процесс называют *рекомбинацией*.

**Несамостоятельный разряд.** Для исследования разряда в газе при различных давлениях используют стеклянную трубку с двумя металлическими электродами (рис. 3.18). С помощью какого-либо ионизатора в газе образуется в секунду определенное число пар заряженных частиц: положительных ионов и электронов.

При небольшой разности потенциалов между электродами трубки положительно заряженные ионы перемещаются к отрицательному электроду, а электроны и отрицательно заряженные ионы — к положительному электроду. В результате в трубке возникает электрический ток, т. е. происходит газовый разряд. Не все образующиеся ионы достигают электродов: часть их воссоединяется (рекомбинирует), образуя нейтральные молекулы.

По мере увеличения разности потенциалов между электродами трубки доля заряженных частиц, достигающих электродов, увеличивается. Возрастает и сила тока в цепи. (рис. 3.19).

Наступает момент, при котором все заряженные частицы, образующиеся в газе за секунду, достигают за это время электродов. Дальнейшего роста тока не происходит, ток достигает *насыщения*.

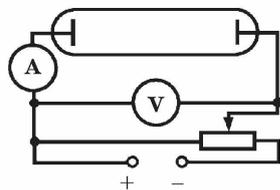


Рис. 3.18

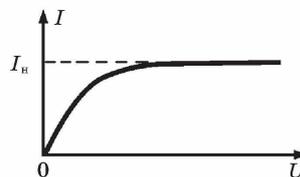


Рис. 3.19

Если действие ионизатора прекращается, то прекращается и разряд, так как других источников ионов нет.

**Несамостоятельным разрядом** называют газовый разряд, происходящий при постоянно действующем внешнем ионизаторе.

**Самостоятельный разряд.** При дальнейшем увеличении разности потенциалов между электродами, начиная с некоторого значения напряжения, сила тока снова возрастает (рис. 3.20).

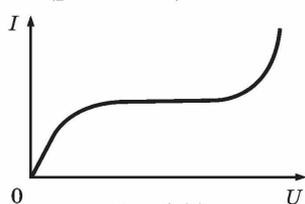


Рис. 3.20

Это означает, что в газе появляются дополнительные ионы сверх тех, которые образуются за счет действия ионизатора. Сила тока может возрасти в сотни и тысячи раз, а число ионов, возникающих в процессе разряда, может стать таким большим, что внешний ионизатор будет уже не нужен: если его убрать, ток не прекратится.

**Самостоятельным разрядом** называют газовый разряд, происходящий в отсутствие внешнего ионизатора.

Причинами резкого увеличения силы тока при больших напряжениях являются ионизация электронным ударом и эмиссия электронов с катода.

**Ионизация электронным ударом.** Свободный электрон движется к положительному электроду — аноду, а положительный ион — к катоду. На своем пути электрон встречает ионы и нейтральные атомы. В промежутках между двумя последовательными столкновениями энергия электрона увеличивается за счет работы сил электрического поля. Чем больше разность потенциалов между электродами, тем больше напряженность электрического поля. Кинетическая энергия электрона перед очередным столкновением пропорциональна напряженности поля и длине

свободного пробега электрона:  $\frac{mv^2}{2} = eEl$ . Если  $\frac{mv^2}{2} \geq A_i$ ,

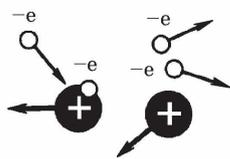


Рис. 3.21

т.е. кинетическая энергия электрона превосходит работу  $A_i$  ионизации нейтрального атома, то при столкновении электрона с атомом происходит ионизация молекулы газа (рис. 3.21). В результате вместо одного электрона возникают два (налетающий и вырванный

из атома). Они, в свою очередь, получают энергию в поле и ионизируют встречные атомы и т. д. Число заряженных частиц нарастает, возникает электронная лавина. Такой процесс называется *ионизацией электронным ударом*.

Одна ионизация электронным ударом не может обеспечить поддержания самостоятельного разряда, так как все возникающие электроны движутся по направлению к аноду и по достижении анода «выбывают из игры».

**Эмиссия электронов с катода.** Для поддержания разряда необходима эмиссия (испускание) электронов с катода. Эмиссия электронов может быть обусловлена несколькими причинами.

Положительные ионы при своем движении к катоду приобретают под действием поля большую кинетическую энергию. При ударах быстрых ионов о катод с поверхности катода выбиваются электроны.

Если энергия ионов не слишком велика, то выбивания электронов с катода не происходит и электроны испускаются вследствие термоэлектронной эмиссии.

*Термоэлектронной эмиссией* называется процесс испускания электронов разогретым катодом.

При самостоятельном разряде нагрев катода может происходить за счет бомбардировки его положительными ионами, а также в результате прямого или косвенного накаливания катода.

#### **Различные типы самостоятельного разряда.**

*Тлеющий разряд.* Самостоятельный газовый разряд происходит при выполнении соотношения  $eEl \geq A_i$ . Из формулы следует, что самостоятельный разряд можно получить двумя путями: либо увеличивать напряженность  $E$  поля либо увеличивать длину свободного пробега  $l$ . Чтобы увеличить длину свободного пробега заряженных частиц в газе, необходимо уменьшить давление газа (разредить газ). При малых давлениях (десятые и сотые доли миллиметра ртутного столба) в трубке наблюдается тлеющий разряд при достаточно низких напряжениях между электродами (несколько сотен и меньше вольт). При тлеющем разряде почти вся трубка, за исключением небольшого участка возле катода, заполнена однородным свечением, называемым *положительным столбом*. Газ на темном катодном пространстве не светится, так как электроны еще не приобрели энергии, достаточной для ионизации молекул.

**Электрическая дуга.** При соприкосновении двух угольных стержней в месте их контакта выделяется большое количество теплоты из-за большого сопротивления контакта. Температура повышается настолько, что начинается термоэлектронная эмиссия с поверхностей стержней, а также ионизация слоев воздуха вблизи контакта электродов. Вследствие этого при раздвижении угольных электродов между ними начинается разряд. Между углями возникает столб ярко светящегося газа — электрическая дуга. Проводимость газа в этом случае значительна и при атмосферном давлении, так как число электронов, испускаемых отрицательным электродом, очень велико. Сила тока в небольшой дуге достигает нескольких ампер, а в больших дугах — нескольких сотен ампер при разности потенциалов порядка 50 В.

Дуговой разряд — мощный источник света, его используют в прожекторах, проекционных аппаратах и киноаппаратах.

В металлургии широко применяют электропечи, в которых источником теплоты служит дуговой разряд. Дуговой разряд используют также для сварки металлов.

**Другие типы самостоятельного разряда.** При атмосферном давлении вблизи заостренных участков проводника, несущего большой электрический заряд, наблюдается разряд, светящаяся область которого напоминает корону. Этот разряд, называемый **коронным**, вызывается высокой (около  $3 \cdot 10^6$  В/м) напряженностью электрического поля вблизи заряженного острия. С коронным разрядом приходится считаться, имея дело с высоким напряжением. При наличии выступающих частей или очень тонких проводов может начаться коронный разряд. Это приводит к утечке электроэнергии. Чем выше напряжение высоковольтной линии, тем толще должны быть провода.

При большом напряжении между электродами в воздухе возникает **искровой разряд**, имеющий вид пучка ярких зигзагообразных полосок, разветвляющихся от тонкого канала. Этот вид разряда возникает тогда, когда мощность источника недостаточна для поддержания дугового или тлеющего разряда. Пример гигантского искрового разряда — молния. Молнии возникают либо между двумя облаками, либо между облаком и Землей. Сила тока в молнии достигает 500 000 А, а разность потенциалов между облаком и Землей — миллиарда вольт.

**Плазма.** При достаточно больших температурах начинается ионизация газа за счет столкновений быстро движущихся атомов или молекул. Вещество переходит в новое состояние, называемое плазмой. *Плазма* — это частично или полностью ионизованный газ, в котором плотности положительных и отрицательных зарядов практически совпадают. Плазма в целом является электрически нейтральной системой. Степень ионизации может быть различной. В полностью ионизованной плазме нейтральных атомов нет.

Наряду с нагреванием ионизация газа и образование плазмы могут быть вызваны разного рода излучениями или бомбардировкой атомов газа быстрыми заряженными частицами. При этом получается так называемая *низкотемпературная плазма*.

Плазма обладает рядом специфических свойств, что позволяет рассматривать ее как особое четвертое состояние вещества.

Из-за большой подвижности заряженные частицы плазмы легко перемещаются под действием электрических и магнитных полей.

Проводимость плазмы увеличивается по мере роста степени ионизации. При высокой температуре полностью ионизованная плазма по своей проводимости приближается к сверхпроводникам.

В состоянии плазмы находится подавляющая (около 99 %) часть вещества Вселенной. Вследствие высокой температуры Солнце и другие звезды состоят в основном из полностью ионизованной плазмы.

## § 26. Электрический ток в вакууме

*Вакуумом* называют такое состояние газа в сосуде, при котором молекулы газа пролетают от одной стенки до другой, ни разу не испытав соударений друг с другом.

Разреженный газ не проводит ток. В большинстве современных электронных вакуумных приборов источником заряженных частиц является нагретый катод. Явление термоэлектронной эмиссии приводит к тому, что нагретый металлический электрод, в отличие от холодного, непрерывно испускает электроны, которые образуют вокруг него «электронное облако». Электрод при этом заряжается положительно, и под влиянием электрического поля

электроны из облака частично возвращаются на электрод. В равновесном состоянии число электронов, покинувших электрод в секунду, равно числу электронов, возвратившихся на электрод за это время. Чем выше температура металла, тем выше плотность электронного облака.

Различие между горячим и холодным электродами приводит к односторонней проводимости электрического тока между ними. При подключении электродов к источнику тока между ними возникает электрическое поле. Если положительный полюс источника соединен с холодным электродом (анодом), а отрицательный — с нагретым (катодом), то напряженность электрического поля направлена к нагретому электроду. Под действием этого поля электроны частично покидают электронное облако и движутся к холодному электроду. Электрическая цепь замыкается, и в ней устанавливается электрический ток.

При противоположном включении источника напряженность поля направлена от катода к аноду. Электрическое поле отталкивает электроны облака назад к катоду. Цепь оказывается разомкнутой.

**Двухэлектродная электронная лампа (диод).** Односторонняя проводимость используется в электронных приборах с двумя электродами — вакуумных диодах (рис. 3.22).

Внутри баллона из стекла или металлокерамики, из которого откачан воздух до давления  $10^{-6}$ – $10^{-9}$  мм рт. ст., размещены два электрода.

Один из них — катод (1) имеет вид вертикального металлического цилиндра, покрываемого обычно слоем оксидов щелочноземельных металлов — бария, стронция, кальция. Такой катод называют *оксидным*. При нагревании поверхность оксидного катода выделяет гораздо больше электронов, чем поверхность катода из чистого металла.

Внутри катода при косвенном накаливании расположен изолированный проводник (3), нагреваемый переменным током. Нагретый катод испускает электроны, достигающие анода, если он имеет более высокий потенциал, чем катод.

Анод лампы (2) представляет собой круглый или овальный цилиндр, имеющий общую ось с катодом.

Анод лампы (2) представляет собой круглый или овальный цилиндр, имеющий общую ось с катодом.

80

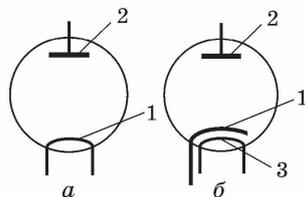


Рис. 3.22. Устройство вакуумного диода

**Вольт-амперная характеристика диода.** Существенные свойства любого электронного устройства отражает его вольт-амперная характеристика, т. е. зависимость силы тока от разности потенциалов на клеммах этого устройства (рис. 3.23). Получить вольт-амперную характеристику диода можно с помощью цепи, схема которой изображена на рисунке 3.24.

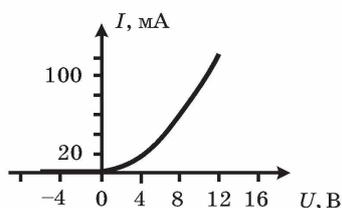


Рис. 3.23

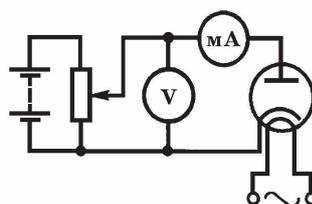


Рис. 3.24

В отличие от характеристики металлического проводника эта характеристика нелинейная. Основная причина нелинейности характеристики вакуумного диода в том, что свободные электроны, образующие ток в пространстве диода, создают электронное облако над катодом. На движение электронов, наряду с полем, созданным зарядами на электродах, существенное влияние оказывает поле пространственного заряда электронного облака у катода. Чем выше напряжение между анодом и катодом, тем меньше пространственный заряд электронного облачка, тем большее количество электронов достигает анода, следовательно, тем больше и сила тока в лампе. При достаточно большом напряжении все электроны, покинувшие катод, достигают анода, и при дальнейшем увеличении напряжения сила тока не меняется, наступает насыщение (пунктирная линия на рисунке 3.25,  $I_{\text{нас}}$ ).

Если повысить температуру катода ( $T_2$ ), то катод будет покидать большее число электронов. Электронное облако вокруг катода станет более плотным. Ток насыщения наступит при большем напряжении между анодом и катодом, и сила тока насыщения возрастет (вторая пунктирная линия на рис. 3.25,  $I_{2\text{нас}}$ ).

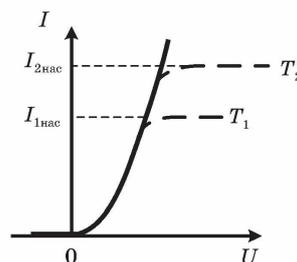


Рис. 3.25

Диоды применяются для выпрямления переменного электрического тока.

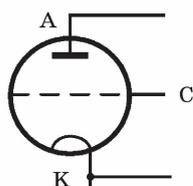


Рис. 3.26

**Трехэлектродная лампа (триод)** имеет третий электрод в виде *сетки*. Изменяя разность потенциалов между катодом и сеткой, можно управлять током в анодной цепи лампы (рис. 3.26). Электронные лампы более сложного типа имеют большее число электродов (тетроды, пентоды и т. д.). Важнейшим применением электронных ламп является применение их в *усилителях* слабых токов и напряжений.

**Электронные пучки.** Вылетающие из катода электроны можно сфокусировать, то есть собрать в электронные пучки.

Количеством электронов в пучке можно *управлять*, поместив между катодом и анодом дополнительный электрод и изменяя его потенциал.

Электронный пучок, попадая на тела, вызывает их *нагревание*. В современной технике это свойство используют для электронной плавки сверхчистых металлов в вакууме.

При торможении быстрых электронов, попадающих на вещество, возникает *рентгеновское излучение*. Это свойство используют в рентгеновских трубках.

Некоторые вещества (стекло, сульфиды цинка и кадмия), бомбардируемые электронами, светятся. Их называют *люминофорами*.

Электронные пучки отклоняются электрическим полем. Электронный пучок отклоняется также в магнитном поле.

**Электроннолучевая трубка.** Возможность управления электронным пучком с помощью электрического или магнитного поля и свечение покрытого люминофором экрана под действием пучка применяют в *электроннолучевой трубке* (рис. 3.27).

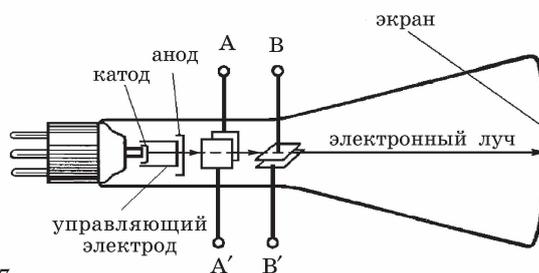


Рис. 3.27

Электроннолучевая трубка — основной элемент телевизора (кинескоп) и осциллографа. Трубка представляет собой вакуумный баллон, одна из стенок которого служит экраном. В узком конце трубки помещен источник быстрых электронов — электронная пушка. Она состоит из катода, управляющего электрода и анода. Сильное электрическое поле ускоряет электроны, и они приобретают большую скорость. Форма, расположение и потенциалы анодов выбраны так, чтобы наряду с ускорением электронов на экране почти до точки происходила и фокусировка электронного пучка. На пути к экрану пучок последовательно проходит между двумя парами управляющих пластин ( $AA'$  и  $BB'$ ). Если электрического поля между пластинами нет, то пучок не отклоняется и светящаяся точка располагается в центре экрана. При сообщении разности потенциалов вертикально расположенным пластинам ( $AA'$ ) пучок смещается в горизонтальном направлении, а при сообщении разности потенциалов горизонтальным пластинам ( $BB'$ ) он смещается в вертикальном направлении. Соответствующее напряжение на пластине заставляет луч с большой скоростью заштриховывать весь экран рядом параллельных линий (строчек). Если бы при этом яркость светящейся точки, определяемая кинетической энергией электронов, оставалась все время постоянной, то мы увидели бы весь экран равномерно светящимся. Но приходящие к приемнику телевизора сигналы, посылаемые передающей телевизионной станцией, то увеличивают, то уменьшают ускоряющее электроны напряжение на управляющем электроде в соответствии с яркостью той или иной точки передаваемого изображения. Поэтому и светящиеся точки на экране получаются то более, то менее яркими, и их совокупность, воспринимаемая нашим глазом, воспроизводит передаваемое изображение.

### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ К ГЛАВЕ III

1. Каков характер проводимости электрического тока в металлах? Как это было установлено?
2. Сравните среднюю скорость упорядоченного движения электронов в металлических проводниках и скорость их теплового движения.
3. Объясните возникновение сопротивления проводника с точки зрения электронной теории.
4. Каков характер проводимости электрического тока в электролитах?
5. Что называется электролитической диссоциацией?
6. Какое явление называется электролизом?
7. Как определяется масса вещества, выделившегося на электроде?
8. Каков физический смысл электрохимического эквивалента  $k$ ?
9. Выведите формулу закона Фарадея для электролиза, содержащую постоянную Фарадея.
10. Каков характер проводимости электрического тока в полупроводниках?
11. Какова зависимость удельного сопротивления полупроводника от температуры? Сравните с аналогичной зависимостью для металлов.
12. Объясните механизм возникновения собственной электрической проводимости полупроводников.
13. Объясните механизм возникновения примесной электрической проводимости полупроводников.
14. Опишите поведение контакта двух полупроводников с разными типами проводимости в отсутствие электрического поля и в электрическом поле.
15. Начертите вольт-амперную характеристику полупроводникового диода.
16. Начертите схему и объясните принцип работы транзистора.
17. Что называют газовым разрядом?
18. Каков характер проводимости электрического тока в газах?
19. Объясните механизм процесса ионизации и рекомбинации в газах.
20. Какой разряд называют несамостоятельным разрядом? Начертите вольт-амперную характеристику.
19. Какой разряд называют самостоятельным разрядом? Начертите вольт-амперную характеристику.
20. Объясните механизм возникновения самостоятельного разряда.
21. Назовите типы самостоятельного разряда.
22. Какое состояние газа в сосуде называют вакуумом?
23. Каков характер проводимости электрического тока в вакууме?

24. Объясните механизм процесса возникновения электронов в вакууме.
25. Начертите схему и объясните принцип работы двухэлектродной электронной лампы. Начертите ее вольт-амперную характеристику.

### ТЕСТОВЫЕ ЗАДАНИЯ К ГЛАВЕ III

1. (01/1-60). Согласно классической электронной теории проводимости металлов, величина  $j/en$  ( $j$  — плотность тока,  $e$  — заряд электрона,  $n$  — концентрация электронов) представляет собой ...
- А) сопротивление участка цепи.    С) удельное сопротивление.  
 В) силу тока.    D) удельную проводимость.  
 Е) среднюю скорость направленного движения электронов.
2. (96/8-35). Концентрация свободных электронов в проводнике с поперечным сечением  $10 \text{ мм}^2$  равна  $5 \cdot 10^{28} \text{ м}^{-3}$ . Чему равна скорость (мм/с) упорядоченного движения электронов в таком проводнике при силе тока  $10 \text{ А}$ ?
- А) 0,05.    В) 0,125.    С) 0,15.    D) 0,25.    Е) 0,3.
3. (96/5-43). Какова скорость (мм/с) упорядоченного движения электронов в медном проводе при плотности тока  $1 \text{ А/мм}^2$ ? Заряд электрона  $1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$ , концентрация свободных электронов  $8,4 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-3}$ .
- А) 0,01.    В) 0,07.    С) 0,8.    D) 1,2.    Е) 4.
4. (97/8-62). Что называется электролитом?
- А) раствор, имеющий ионную проводимость.  
 В) раствор, имеющий электронно-дырочную электропроводность.  
 С) раствор, имеющий электронную электропроводность.  
 D) раствор, имеющий дырочную электропроводность.  
 Е) раствор, имеющий электроны.
5. (97/8-59). Какие частицы переносят электрический ток в электролитах?
- А) ионы.    С) только электроны.    Е) только дырки.  
 В) атомы.    D) электроны и дырки.
6. (96/15- ). От каких факторов, перечисленных ниже, больше всего зависит степень диссоциации электролита: 1) температура раствора; 2) объем электролита; 3) концентрация электролита; 4) масса молекул электролита; 5) скорость рекомбинации; 6) сила тока через электролит; 7) плотность растворителя?
- А) 1, 4.    В) 1, 3.    С) 2, 5.    D) 2, 6.    Е) 1, 5.
7. (97/2-36). Напряжение между электродами равно  $50 \text{ В}$ . Какая масса вещества выделяется при электролизе, если при этом работа электрического тока равна  $100 \text{ кДж}$ ? Электрохимический эквивалент вещества  $3,2 \cdot 10^{-7} \text{ кг/Кл}$ .

- А)  $1,6 \cdot 10^{-6}$  кг.      С)  $1,6 \cdot 10^{-10}$  кг.      Е) 640 мкг.  
В)  $3,2 \cdot 10^{-4}$  кг.      D) 640 мг.

8. (97/4-35). Сколько вещества с электрохимическим эквивалентом  $9,3 \cdot 10^{-8}$  кг/Кл в течение 1 мин. можно выделить в процессе электролиза, если потребляемая мощность установки, рассчитанной на напряжение 60 В, равна 30 кВт?

- А)  $3,1 \cdot 10^{-5}$  кг.      С)  $2,79 \cdot 10^{-5}$  кг.      Е) 2,79 г.  
В) 310 мг.      D)  $558 \cdot 10^{-11}$  кг.

9. (97/1-47). При силе тока 2,5 А за 20 мин. в электролитической ванне выделилось 1017 мг двухвалентного металла. Определить атомную массу металла (г/моль).

- А) 66.      В) 53.      С) 45.      D) 21.      Е) НПО.

10. (97/7-39). В электролитической ванне, содержащей раствор  $\text{AgNO}_3$ , течет ток 10 мА. Сколько атомов серебра выделяется на катоде за 1 с?

- А)  $6,25 \cdot 10^{16}$ .      В)  $8,3 \cdot 10^{15}$ .      С)  $9 \cdot 10^{14}$ .      D)  $10^{17}$ .      Е)  $3 \cdot 10^{18}$ .

11. (96/10-49). Молярная масса серебра 108 г/моль, валентность 1, а электрохимический эквивалент  $1,08 \cdot 10^{-6}$  кг/Кл. Чему равен электрохимический эквивалент золота (кг/Кл), если его молярная масса 200 г/моль, а валентность 1?

- А)  $2 \cdot 10^{-6}$ .      В)  $2 \cdot 10^{-7}$ .      С)  $6 \cdot 10^{-7}$ .      D)  $1 \cdot 10^{-6}$ .      Е)  $1 \cdot 10^{-7}$ .

12. (03/5-41). В двух последовательно соединенных электролитических ваннах предметы покрываются медью и серебром. Какой будет масса медного слоя (г) к моменту времени, когда масса серебряного слоя достигнет 33,6 г? Электрохимические эквиваленты меди и серебра равны соответственно 0,33 и 1,12 мг/Кл.

- А) 1.      В) 5.      С) 10.      D) 20.      Е) 100.

13. (99/7-42). Слой какой толщины (в мкм) образуется на электроде за 100 с, если плотность тока при электролизе хрома равна  $4 \cdot 10^4$  А/м<sup>2</sup>? Плотность хрома  $7,2 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>, его электрохимический эквивалент  $1,8 \cdot 10^{-7}$  кг/Кл.

- А) 40.      В) 72.      С) 100.      D) 50.      Е) 4.

14. (97/2-38). Что возникает при соединении электрона и дырки в полупроводнике?

- А) положительный ион.  
В) отрицательный ион.  
С) нейтральный атом.  
D) положительные и отрицательные ионы.  
Е) НПО.

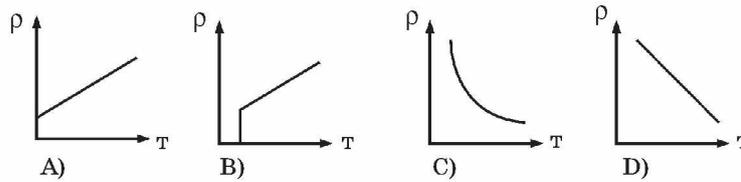
15. (97/4-37). Какой процесс наблюдается в полупроводнике при встрече электрона с дыркой?

- А) поглощается энергия.  
В) электрон и дырка отталкиваются и разлетаются в разные стороны.

- С) выделяется энергия, а дырка и электрон проводимости исчезают.  
 D) образуется положительный ион.  
 E) образуется отрицательный ион.
16. (97/8-58). Какие частицы переносят электрический ток в полупроводниках?  
 A) электроны и дырки. C) атомы. E) только дырки.  
 B) только электроны. D) ионы.
17. (97/5-38). Какие примеси содержатся в кристалле полупроводника, если он имеет дырочную проводимость?  
 A) донорные примеси. C) нет примесей.  
 B) акцепторные примеси.  
 D) содержатся акцепторные и донорные примеси в равной концентрации.  
 E) концентрация акцепторных примесей меньше, чем донорных.
18. (97/6-39). Каким типом проводимости обладают полупроводниковые материалы с донорными примесями?  
 A) в основном электронной.  
 B) в основном дырочной.  
 C) в равной мере электронной и дырочной.  
 D) ионной.  
 E) такие материалы не проводят ток.
19. (98/3-36). Каким типом проводимости обладают полупроводниковые материалы с акцепторными примесями?  
 A) в основном дырочной.  
 B) не проводят ток.  
 C) в равной мере электронной и дырочной.  
 D) в основном электронной.  
 E) НПО.
20. (98/1-32). Каким типом проводимости обладают полупроводниковые материалы без примесей?  
 A) в основном электронной.  
 B) в равной мере электронной и дырочной.  
 C) в основном дырочной.  
 D) не проводят ток.  
 E) НПО.
21. (01/12-67). С ростом температуры сопротивление полупроводников ...  
 A) уменьшится. B) увеличится. C) не изменится.  
 D) сначала увеличится, затем уменьшится.  
 E) сначала уменьшится, затем увеличится.
22. (97/7-37). Какого типа будет проводимость германия, если к нему добавить в качестве примеси фосфор? Валентность фосфора равна 5.  
 A) собственная. B) *p*-типа. C) *n*-типа.

- Д) тип проводимости будет зависеть от количества примеси.  
 Е) тип проводимости будет зависеть от температуры.

23. (2-32). Какой из графиков, приведенных на рисунке, соответствует зависимости удельного сопротивления полупроводника от температуры?



Е) НПО.

24. (03/8-39). За счет упорядоченного движения электронов через чистый полупроводник проходит ток силой 1 мА. Какова полная сила тока через полупроводник (мА)?

- А) 0. В) 0,5. С) 1. Д) 2. Е) 3.

25. (98/11-31). Для получения необходимого типа проводимости обычно используют примеси атомов фосфора (V), цинка (II), галлия (III) и сурьмы (V). В скобках указаны валентности этих элементов. Какие из этих примесей можно использовать, чтобы получить германий (IV) с электронным типом проводимости?

- А) цинка и сурьмы. С) все. Е) фосфора и галлия.  
 В) ни одну. Д) фосфора и сурьмы.

26. (99/10-60). Какие заряженные частицы являются носителями тока в газах: 1) электроны; 2) положительные ионы; 3) отрицательные ионы; 4) дырки?

- А) 1. В) 2, 3. С) 1, 3, 4. Д) 3, 4. Е) 1, 2, 3.

27. (97/2-37). Как изменяется напряжение между электродами в момент возникновения электрической дуги?

- А) уменьшается. В) увеличивается. С) не изменяется.  
 Д) сначала увеличивается, затем уменьшается.  
 Е) сначала уменьшается, а затем постепенно увеличивается.

28. (97/4-36). Как изменится температура электрической дуги, если увеличить давление газа между электродами?

- А) не изменится. В) увеличится. С) уменьшится.  
 Д) сначала увеличится, потом уменьшится.  
 Е) сначала уменьшится, потом увеличится.

29. (96/7-99). Расстояние между анодом и экраном телевизионной трубки, равное 30 см, электрон проходит за 4 нс. Каково ускоряющее напряжение (между катодом и анодом) (кВ), если начальная скорость электрона равна нулю?  $m_e = 9,1 \cdot 10^{-31}$  кг,  $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл.

- А) 1,6. В) 16. С) 6,4. Д) 3,2. Е) 64.

30. (5-42). Сколько электронов ежесекундно испускает катод, если сила тока насыщения равна 16 мА?

- А)  $6 \cdot 10^{17}$ . В)  $4 \cdot 10^{16}$ . С)  $1,6 \cdot 10^6$ . D)  $5 \cdot 10^{17}$ . E)  $1 \cdot 10^{17}$ .

31. (03/9-71). Каково назначение выпрямителя? Выпрямитель...

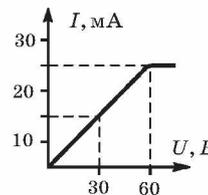
- А) постоянный ток преобразует в переменный.  
В) изменяет силу переменного тока.  
С) переменный ток преобразует в постоянный.  
D) изменяет напряжение переменного тока.  
E) изменяет мощность постоянного тока.

32. (03/11-24). В каких средах не наблюдается тепловое действие тока: 1) в электролитах; 2) в газах; 3) в металлах; 4) в вакууме; 5) в полупроводниках?

- А) 4. В) 1; 4; 5. С) 3; 4. D) 1; 2. E) 5.

33. (99/9-40). Используя вольт-амперную характеристику лампового диода, показанную на рисунке, определите ток насыщения и внутреннее сопротивление лампы.

- А) 10 мА; 2000 Ом.  
В) 15 мА; 2000 Ом.  
С) 25 мА; 1000 Ом.  
D) 25 мА; 2000 Ом.  
E) 25 мА; 200 Ом.



34. (96/15-87). Как изменится проводимость четырехвалентного германия, если в него ввести трехвалентный индий в количестве один атом индия на миллион атомов германия?

- А) увеличится примерно на одну миллионную долю первоначального значения.  
В) уменьшится примерно на одну миллионную долю первоначального значения.  
С) значительно возрастет и станет дырочной.  
D) значительно возрастет и станет электронной.  
E) значительно возрастет и будет в равной мере обусловлена электронами и дырками.

35. (96/8-41). От чего зависит масса вещества, выделяющегося на электроде при электролизе?

- А) только от напряжения.  
В) только от силы тока.  
С) только от времени.  
D) от величины заряда, прошедшего через электролит.  
E) только от сопротивления.

36. (96/3-98). При электролизе соляной кислоты (НСl) на катоде выделилось 2 г водорода. Определите массу хлора, выделенного на аноде в этих условиях (г). Электрохимический эквивалент водорода  $1 \cdot 10^{-8}$  кг/Кл, хлора  $37 \cdot 10^{-8}$  кг/Кл.

- А) 148. В) 74. С) 37. D) 7,4. E) 3,7.

## Глава IV. МАГНИТНОЕ ПОЛЕ

Магнитные явления были известны еще в древнем мире. Компас был изобретен более 4500 лет тому назад. Он появился в Европе приблизительно в XII веке новой эры. Однако только в XIX веке была обнаружена связь между электричеством и магнетизмом и возникло представление о *магнитном поле*.

Первыми экспериментами, показавшими, что между электрическими и магнитными явлениями имеется глубокая связь, были опыты датского физика Х. Эрстеда (1820 г.). Эти опыты показали, что на магнитную стрелку, расположенную вблизи проводника с током, действуют силы, которые стремятся повернуть стрелку. Французский физик А. Ампер наблюдал силовое взаимодействие двух проводников с токами и установил закон взаимодействия токов.

Ученые XIX века пытались создать теорию магнитного поля по аналогии с электростатикой, вводя в рассмотрение так называемые *магнитные заряды* двух знаков (например, северный N и южный S полюса магнитной стрелки). Однако опыт показывает, что изолированных магнитных зарядов не существует.

### § 27. Магнитное поле и его характеристики

По современным представлениям, проводники с током оказывают силовое действие друг на друга не непосредственно, а через окружающие их магнитные поля.

Источниками магнитного поля являются *движущиеся* электрические заряды (токи). Магнитное поле возникает в пространстве, окружающем проводники с током, подобно тому, как в пространстве, окружающем неподвижные электрические заряды, возникает электрическое поле. Магнитное поле постоянных магнитов также создается электрическими микротоками, циркулирующими внутри молекул вещества (гипотеза Ампера).

Магнитное поле, в отличие от электрического, оказывает силовое действие *только на движущиеся* заряды (токи).

Силовой характеристикой магнитного поля является *вектор магнитной индукции*  $\vec{B}$ . Вектор магнитной индукции определяет силы, действующие на токи или движущиеся заряды в магнитном поле.

За положительное направление вектора  $\vec{B}$  принимается направление от южного полюса S к северному полюсу N магнитной стрелки, свободно устанавливающейся в магнитном поле.

Исследуя магнитное поле, создаваемое током или постоянным магнитом, с помощью маленькой магнитной стрелки, можно в каждой точке пространства определить направление вектора  $\vec{B}$  и представить пространственную структуру магнитного поля.

Линии магнитной индукции — это линии, в каждой точке которых вектор  $\vec{B}$  направлен по касательной.

Индикаторные магнитные стрелки ориентируются по направлению касательных к линиям индукции.

На рисунках приведены линии магнитной индукции полей постоянного магнита (рис. 4.1) и катушки с током (рис. 4.2).

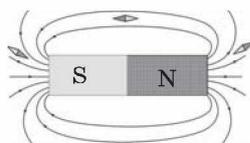


Рис. 4.1

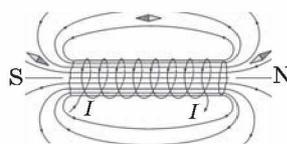


Рис. 4.2

Линии магнитной индукции всегда замкнуты, они нигде не пересекаются и не обрываются. Это означает, что магнитное поле не имеет источников — магнитных зарядов. Силовые поля, обладающие этим свойством, называются **вихревыми**. Картину магнитной индукции можно наблюдать с помощью мелких железных опилок, которые в магнитном поле намагничиваются и, подобно маленьким магнитным стрелкам, ориентируются вдоль линий индукции.

Направления вектора индукции  $\vec{B}$  магнитного поля прямолинейного проводника с током определяют по **правилу буравчика**: если направление поступательного движения буравчика совпадает с направлением тока в проводнике, то вращательное движение буравчика совпадает с направлением вектора магнитной индукции  $\vec{B}$  (рис. 4.3).

Правило буравчика также называют **правилом правого винта**.

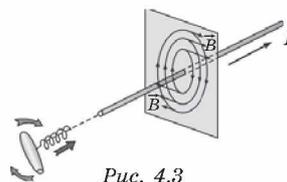


Рис. 4.3

## § 28. Закон Ампера

На проводник с током в магнитном поле действует сила. Эта сила называется *силой Ампера*.

Сила Ампера направлена перпендикулярно вектору магнитной индукции  $\vec{B}$  и направлению тока. Для определения направления силы Ампера используют **правило левой руки**: если расположить левую руку так, чтобы линии индукции  $\vec{B}$  входили в ладонь, а вытянутые пальцы были направлены вдоль направления тока, то отведенный большой палец укажет направление силы, действующей на проводник с током (рис. 4.4).

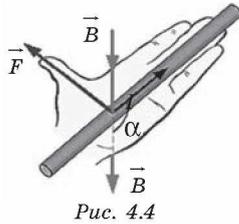


Рис. 4.4

Если угол  $\alpha$  между направлениями вектора  $\vec{B}$  и тока в проводнике отличен от  $90^\circ$ , то для определения направления силы Ампера  $\vec{F}$  более удобно пользоваться **правилом буравчика** (рис. 4.5).

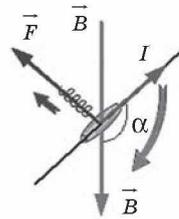


Рис. 4.5

Воображаемый буравчик располагается перпендикулярно плоскости, содержащей вектор  $\vec{B}$  и проводник с током, затем его рукоятка поворачивается от направления тока к направлению вектора  $\vec{B}$ . Поступательное перемещение буравчика будет показывать направление силы Ампера  $\vec{F}$ .

**Определение модуля силы Ампера.** Для определения величины силы Ампера можно использовать установку, приведенную на рисунке 4.6.

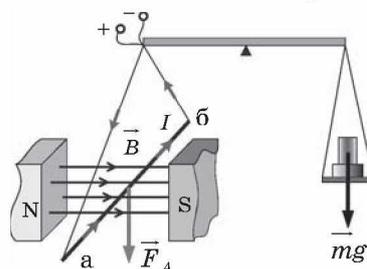


Рис. 4.6

Проводник (а-б) с помощью тонких подводящих проводов подвешивается на рычаге весов между полюсами магнита и уравнивается. При подключении к источнику постоянного тока на проводник с током действует сила Ампера и равнове-

сие нарушается. Эту силу можно уравновесить дополнительными гирями и таким образом измерить силу Ампера.

Как показали опыты Ампера, сила, действующая со стороны магнитного поля  $\vec{B}$  на участок проводника, пропорциональна силе тока  $I$ , длине  $\Delta l$  этого участка и синусу угла  $\alpha$  между направлениями тока и вектора магнитной индукции:  $F = IB\Delta l \sin\alpha$ . Это соотношение называется **законом Ампера**.

Сила Ампера достигает максимального по модулю значения  $F_{\max}$ , когда проводник с током ориентирован перпендикулярно линиям магнитной индукции.

*Модуль вектора магнитной индукции равен отношению максимального значения силы Ампера, действующей на прямой проводник с током, к силе тока  $I$  в проводнике и его длине  $\Delta l$ :*

$$B = \frac{F_{\max}}{I\Delta l}.$$

В системе единиц СИ за единицу магнитной индукции принята индукция такого магнитного поля, в котором на каждый метр длины проводника при силе тока 1 А действует максимальная сила Ампера 1 Н. Эта единица называется **тесла** (Тл):  $1\text{Тл} = 1 \frac{\text{Н}}{\text{А} \cdot \text{м}}$ .

Тесла — очень крупная единица. Магнитное поле Земли приблизительно равно  $0,5 \cdot 10^{-4}$  Тл. Большой лабораторный электромагнит может создать поле не более 5 Тл.

## § 29. Магнитное взаимодействие токов

Если по двум параллельным проводникам электрические токи текут в одну и ту же сторону, то наблюдается взаимное притяжение проводников (рис. 4.7). В случае когда токи текут в противоположных направлениях, проводники отталкиваются (рис. 4.8)

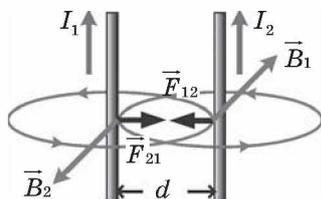


Рис. 4.7

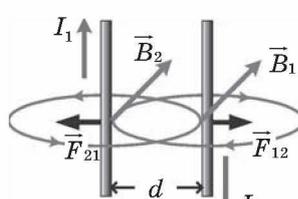


Рис. 4.8

Взаимодействие токов вызывается их магнитными полями: магнитное поле одного тока действует силой Ампера на другой ток и наоборот.

Опыты показали, что модуль силы, действующей на отрезок длиной  $\Delta l$  каждого из проводников, прямо пропорционален силам тока  $I_1$  и  $I_2$  в проводниках, длине отрезка  $\Delta l$  и обратно пропорционален расстоянию  $d$  между ними:

$$F = k \frac{I_1 I_2 \Delta l}{d}.$$

Коэффициент пропорциональности  $k$  в системе СИ записывают в виде:  $k = \mu_0 / 2\pi$ , где  $\mu_0$  — магнитная постоянная:  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Н/А}^2 \approx 1,26 \cdot 10^{-6} \text{ Н/А}^2$ .

Тогда формула, выражающая закон магнитного взаимодействия параллельных токов, принимает вид:

$$F = \frac{\mu_0}{2\pi} \frac{I_1 I_2 \Delta l}{d}.$$

Так как  $F = F_A = IB \Delta l$ , ( $\sin \alpha = 1$ ), то можно приравнять:

$$I_1 B \Delta l = \frac{\mu_0}{2\pi} \frac{I_1 I_2 \Delta l}{d}.$$

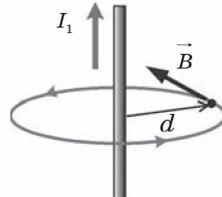


Рис. 4.9

Отсюда получим выражение для индукции  $B$  магнитного поля прямолинейного проводника с током  $I$  (рис. 4.9) на расстоянии  $d$  от него:

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi d}.$$

Магнитное поле внутри катушки практически однородно. Модуль вектора магнитной индукции  $\vec{B}$  внутри (и вблизи торцов) длинной прямолинейной катушки (соленоида) (рис. 4.10) определяется по формуле:  $B = \mu_0 I n$ , где

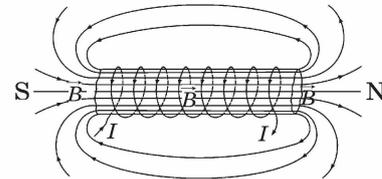


Рис. 4.10

$n = N/l$  — число витков на единицу длины катушки.

Магнитное взаимодействие параллельных проводников с током используется в Международной системе единиц (СИ) для определения единицы силы тока — ампера.

**Ампер** – сила неизменяющегося тока, который при прохождении по двум параллельным проводникам (бесконечной длины и ничтожно малого кругового сечения), расположенным на расстоянии 1 м один от другого в вакууме, вызывает между этими проводниками силу магнитного взаимодействия, равную  $2 \cdot 10^{-7}$  Н на каждом участке проводника длиной 1 м.

### § 30. Рамка с током в магнитном поле

На рамку с током магнитное поле оказывает ориентирующее действие (рис. 4.11).

Рамка (или виток) с током в магнитном поле  $\vec{B}$  разворачивается и ориентируется подобно магнитной стрелке так, что ее магнитное поле  $\vec{B}'$  устанавливается вдоль внешнего магнитного поля  $\vec{B}$ .

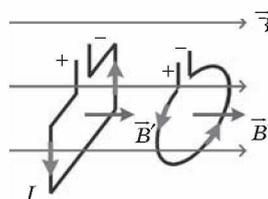


Рис. 4.11

**Вращающий момент.** На активные участки рамки  $AB$  и  $CD$  длиной  $l$  с постоянным током  $I$  в перпендикулярном магнитном поле  $B$  (рис. 4.12) действуют равные силы Ампера:  $F_A = IB\Delta l$ . Направление этих сил определяется по правилу левой руки. Эта пара сил создает вращающий момент относительно оси  $OO_1$  (рис. 4.13). Плечо каждой из этих сил равно  $\frac{d}{2} \sin \alpha$ . Момент каждой силы равен:

$$M_1 = F_A \frac{d}{2} \sin \alpha .$$

Тогда суммарный вращательный момент, действующий на рамку, равен:

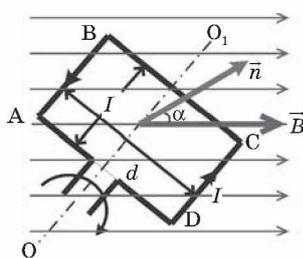


Рис. 4.12

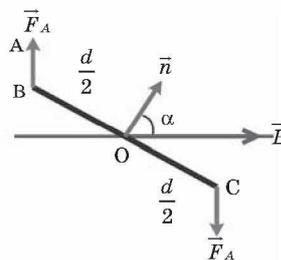


Рис. 4.13

$$M = 2M_1 = 2F_A \frac{d}{2} \sin \alpha = IBld \sin \alpha = IBS \sin \alpha,$$

где  $S = ld$  — площадь рамки.

Максимальный момент сил:  $M_m = IBS$  (при  $\alpha = 90^\circ$ ). Полученная формула показывает, что момент сил прямо пропорционален силе тока, протекающего в витках контура.

**Электроизмерительные приборы.** Зависимость момента сил, действующих на рамку с током в магнитном поле, от величины силы тока в рамке положена в основу принципа работы электроизмерительных приборов (рис. 4.14).

Силу тока можно определить по углу поворота катушки (1), если проградуировать прибор. Катушка с током поворачивается до тех пор, пока момент сил упругости со стороны спиральных пружин (2) не уравновесит момент сил, действующих на рамку со стороны магнитного поля.

Вращение катушки с током в магнитном поле используется в устройстве *электрического двигателя*.

Прибор на рисунке 4.15 является моделью электрического двигателя постоянного тока. Для того чтобы рамка продолжала вращаться в том же направлении, ток на нее подается через *коллектор*, представляющий собой кольцо, разрезанное на секторы, изолированные друг от друга. При повороте рамки присоединенные к ее концам полукольца (сектора) коллектора повернутся вместе с ней и каждое прижмется к другой щетке, поэтому ток в рамке изменит направление на противоположное, сохраняя направление вращательного момента.

В технических электродвигателях обмотка вращающейся катушки называется *якорем*. Якорь представляет собой стальной цилиндр, в пазах которого проложено большое число витков. Чем больше число пазов и витков в них, тем больше вращающий момент.

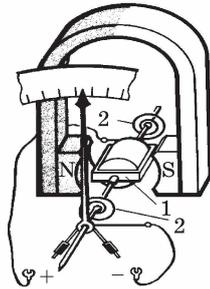


Рис. 4.14

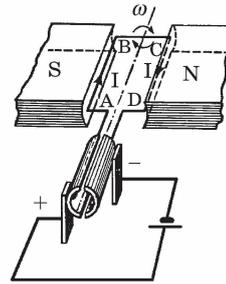


Рис. 4.15

### § 31. Движение заряженных частиц в магнитном поле

**Сила Лоренца.** Действие магнитного поля на проводник с током есть результат действия поля на движущиеся заряженные частицы внутри проводника. Выразим силу Ампера, действующую на отрезок проводника длиной  $\Delta l$  с силой тока  $I$ , находящийся в магнитном поле  $B$ , через силы, действующие на отдельные носители заряда.

Пусть концентрация носителей свободного заряда в проводнике  $n$ ,  $v$  — модуль скорости упорядоченного движения носителей заряда  $q$ , тогда сила тока, текущего по проводнику площадью поперечного сечения  $S$ , равна:  $I = qnvS$ .

Выражение для силы Ампера можно записать в виде:

$$F = IB\Delta l \sin \alpha = qnS\Delta lvB \sin \alpha.$$

Так как полное число  $N$  носителей свободного заряда в проводнике длиной  $\Delta l$  и сечением  $S$  равно  $nS\Delta l$ , то сила, действующая на одну заряженную частицу, равна:

$$F_{\text{л}} = qvB \sin \alpha.$$

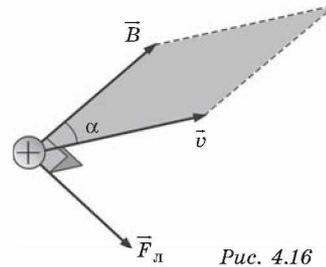
Эту силу называют **силой Лоренца**. Угол  $\alpha$  в этом выражении равен углу между вектором скорости  $\vec{v}$  и вектором магнитной индукции  $\vec{B}$ . Направление силы Лоренца, действующей на положительно заряженную частицу, так же как и направление силы Ампера, может быть найдено по правилу левой руки или по правилу буравчика (рис. 4.16).

Взаимное расположение векторов  $\vec{v}$ ,  $\vec{B}$  и  $\vec{F}_{\text{л}}$  для положительно заряженной частицы показано на рисунке.

Модуль силы Лоренца  $\vec{F}_{\text{л}}$  численно равен площади параллелограмма, построенного на векторах  $\vec{v}$  и  $\vec{B}$ , помноженной на заряд  $q$ .

Сила Лоренца направлена перпендикулярно векторам  $\vec{v}$  и  $\vec{B}$ .

При движении заряженной частицы в магнитном поле сила Лоренца работы не совершает (так как сила перпендикулярна скорости). Поэтому модуль вектора скорости при



движении частицы не изменяется. Если заряженная частица движется в однородном магнитном поле под действием силы Лоренца (рис. 4.17), а ее скорость  $\vec{v}$  лежит в

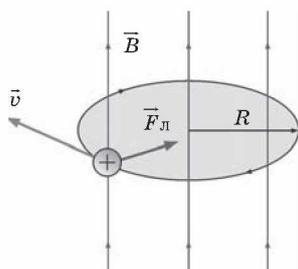


Рис. 4.17

плоскости, перпендикулярной вектору  $\vec{B}$ , то сила Лоренца в этом случае играет роль центростремительной силы:

$$\frac{mv^2}{R} = qvB.$$

Частица будет двигаться по окружности радиуса:

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

Период обращения частицы в однородном магнитном поле равен:

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

Это выражение показывает, что для заряженных частиц заданной массы  $m$  период обращения не зависит от скорости  $v$  и радиуса траектории  $R$ .

**Циклотрон.** Угловая скорость движения заряженной частицы по круговой траектории  $\omega = \frac{v}{R} = v \frac{qB}{mv} = \frac{qB}{m}$  называется **циклотронной частотой**. Циклотронная частота не зависит от скорости (и от кинетической энергии) частицы. Это обстоятельство используется в **циклотронах** — ускорителях тяжелых частиц (протонов, ионов).

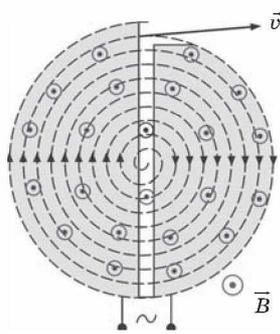


Рис. 4.18

На рисунке 4.18 приведена принципиальная схема циклотрона. Между полюсами сильного электромагнита помещается вакуумная камера, в которой находятся два электрода в виде полых металлических полуцилиндров (**дуантов**). К дуантам приложено переменное электрическое напряжение, частота которого *равна* **циклотронной частоте**. Заряженные частицы вводятся в центр вакуумной камеры и ускоряются электрическим полем в промежутке между дуантами.

Внутри дуантов частицы движутся под действием силы Лоренца по полуокружностям, радиус которых растет по мере увеличения энергии частиц. Каждый раз, когда частица пролетает через зазор между дуантами, она ускоряется электрическим полем. Таким образом, в циклотроне, как и во всех других ускорителях, заряженная частица ускоряется электрическим полем, а удерживается на траектории магнитным полем. Циклотроны позволяют ускорять протоны до энергии порядка 20 МэВ.

При ускорении заряженных частиц до скоростей, соизмеримых со скоростью света, возникает релятивистское возрастание массы частицы со скоростью. Это приводит к увеличению периода обращения и изменению циклотронной частоты. Возникает необходимость синхронизации частоты внешнего ускоряющего электрического поля с изменяющейся частотой движения частицы. Эта проблема решена в ускорителях другого типа (синхрофазотрон, фазотрон и др.). Заряженные частицы ускоряются до энергий в несколько тысяч ГэВ.

**Масс-спектрометр** — устройство, с помощью которого можно измерять массы заряженных частиц — ионов или ядер различных атомов (рис. 4.19).

Масс-спектрометры используются для разделения изотопов, то есть ядер атомов с одинаковым зарядом, но разными массами.

Ионы, вылетающие из источника  $S$ , проходят через несколько небольших отверстий, формирующих узкий пучок, и попадают в селектор скоростей, в котором частицы движутся в скрещенных однородных электрическом и магнитном полях. Электрическое поле создается между пластинами плоского конденсатора, магнитное поле — в зазоре между полюсами электромагнита.

Начальная скорость заряженных частиц направлена перпендикулярно векторам  $\vec{E}$  и  $\vec{B}$ .

На частицу, движущуюся в скрещенных электрическом и

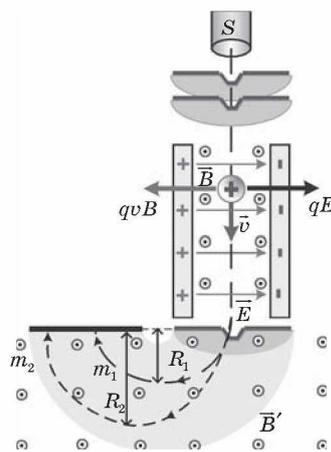


Рис. 4.19

магнитном полях, действуют электрическая сила  $q\vec{E}$  и магнитная сила Лоренца. При условии  $E = vB$  эти силы уравниваются друг друга, частица будет двигаться равномерно и прямолинейно и, пролетев через конденсатор, пройдет через отверстие в экране. При заданных значениях электрического и магнитного полей селектор выделит частицы, движущиеся со скоростью  $v = E/B$ .

Далее частицы с одним и тем же значением скорости попадают в камеру масс-спектрометра, в которой создано однородное магнитное поле  $\vec{B}'$ . Частицы движутся в камере в плоскости, перпендикулярной магнитному полю под действием силы Лоренца. Траектории частиц представляют собой окружности радиусов  $R = mv/qB'$ . Измеряя радиусы траекторий при известных значениях  $v$  и  $B'$ , можно определить отношение  $q/m$ . В случае изотопов ( $q_1 = q_2$ ) масс-спектрометр позволяет разделить частицы с разными массами. Современные масс-спектрометры позволяют измерять массы заряженных частиц с точностью выше  $10^{-4}$ .

**Движение частицы в магнитном поле по спирали.** Если частица влетает в магнитное поле под углом к вектору магнитной индукции, то скорость частицы  $\vec{v}$  имеет составляющую  $\vec{v}_{\parallel}$  вдоль направления магнитного поля, и такая частица будет двигаться в однородном магнитном поле по спирали (рис. 4.20).

При этом радиус спирали  $R$  зависит от модуля перпендикулярной магнитному полю составляющей  $\vec{v}_{\perp}$  вектора  $\vec{v}$ , а шаг спирали  $h$  — от модуля продольной составляющей  $\vec{v}_{\parallel}$ .

Таким образом, траектория заряженной частицы как бы навивается на линии магнитной индукции. Это явление используется в технике

для *магнитной термоизоляции высокотемпературной плазмы*, то есть полностью ионизированного газа при температуре порядка  $10^6$  К. Вещество в таком состоянии получают в установках типа «Токамак» при изучении управляемых термоядерных реакций. Плазма не должна соприкасаться со стенками

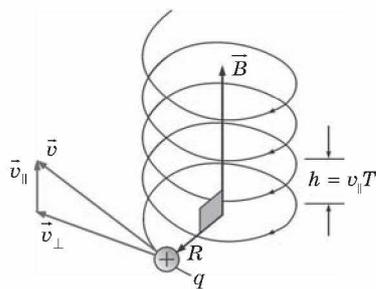


Рис. 4.20

камеры. Термоизоляция достигается путем создания магнитного поля специальной конфигурации. В качестве примера на рисунке 4.21 изображена траектория движения заряженной частицы в магнитной «ловушке».

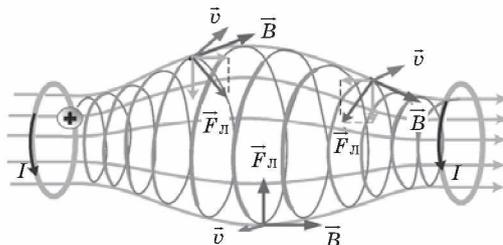


Рис. 4.21. Заряженные частицы не выходят за пределы «ловушки». Магнитное поле «ловушки» может быть создано с помощью двух круглых катушек с током.

**Магнитное поле Земли** является защитой для всего живого от потоков заряженных частиц из космического пространства. Быстрые заряженные частицы, в основном электроны и протоны, из космоса (главным образом от Солнца) «захватываются» магнитным полем Земли и образуют так называемые **радиационные пояса** (рис. 4.22).

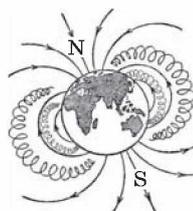


Рис. 4.22

В радиационных поясах частицы, как в магнитных ловушках, перемещаются туда и обратно по спиралеобразным траекториям между северным и южным магнитными полюсами за время порядка доли секунды.

Лишь в полярных областях некоторая часть частиц вторгается в верхние слои атмосферы, вызывая полярные сияния. Радиационные пояса Земли простираются от расстояний порядка 500 км до десятков земных радиусов. Заметим, что Южный магнитный полюс Земли находится вблизи Северного географического полюса (на северо-западе Гренландии).

### § 32. Магнитное поле в веществе

Все вещества в большей или меньшей степени обладают магнитными свойствами. Если два витка с токами поместить в какую-либо среду, то сила магнитного взаимодействия между токами изменяется. Этот опыт показыва-

ет, что индукция магнитного поля, создаваемого электрическими токами в веществе, отличается от индукции магнитного поля, создаваемого теми же токами в вакууме.

**Магнитной проницаемостью**  $\mu$  называется физическая величина, показывающая, во сколько раз индукция  $\vec{B}$  магнитного поля в однородной среде отличается по модулю от индукции  $\vec{B}_0$  магнитного поля в вакууме,  $\mu = \frac{B}{B_0}$ .

Магнитные свойства веществ определяются магнитными свойствами атомов или элементарных частиц (электронов, протонов и нейтронов), входящих в состав атомов. В настоящее время установлено, что магнитные свойства протонов и нейтронов почти в 1000 раз слабее магнитных свойств электронов. Поэтому магнитные свойства веществ в основном определяются электронами, входящими в состав атомов.

Одним из важнейших свойств электрона является наличие у него не только электрического, но и собственного магнитного поля. Собственное магнитное поле электрона называют **спином** (spin — вращение). Электрон создает магнитное поле также и за счет орбитального движения вокруг ядра, которое можно уподобить круговому микро-току. Спиновые поля электронов и магнитные поля, обусловленные их орбитальными движениями, и определяют широкий спектр магнитных свойств веществ.

У большинства веществ магнитные свойства выражены слабо. **Слабомагнитные вещества** делятся на две большие группы — **парамагнетики** и **диамагнетики**. При внесении во внешнее магнитное поле парамагнитные образцы намагничиваются так, что их собственное магнитное поле оказывается направленным по внешнему полю, а диамагнитные образцы намагничиваются против внешнего поля. Поэтому у парамагнетиков  $\mu > 1$ , а у диамагнетиков  $\mu < 1$ . Отличие  $\mu$  от единицы у пара- и диамагнетиков чрезвычайно мало. Например, у алюминия, который относится к парамагнетикам,  $\mu - 1 \approx 2,1 \cdot 10^{-5}$ , у хлористого железа ( $\text{FeCl}_3$ )  $\mu - 1 \approx 2,5 \cdot 10^{-3}$ . К парамагнетикам относятся также платина, воздух и многие другие вещества. К диамагнетикам относятся медь ( $\mu - 1 \approx -3 \cdot 10^{-6}$ ), вода ( $\mu - 1 \approx -9 \cdot 10^{-6}$ ), висмут ( $\mu - 1 \approx -1,7 \cdot 10^{-3}$ ) и другие вещества. Образцы из пара- и диамагнетика, помещенные в неоднородное магнитное поле между полюсами электромагнита, ведут себя

по-разному — парамагнетики втягиваются в область сильного поля (рис. 4.23, а), диамагнетики — выталкиваются (рис. 4.23, б).

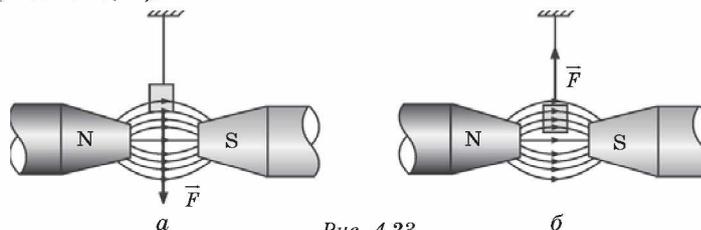


Рис. 4.23

Пара- и диамагнетизм объясняется поведением электронных орбит во внешнем магнитном поле. У атомов диамагнитных веществ в отсутствие внешнего поля собственные магнитные поля электронов и поля, создаваемые их орбитальным движением, полностью скомпенсированы. Возникновение диамагнетизма связано с действием силы Лоренца на электронные орбиты. Под действием этой силы изменяется характер орбитального движения электронов и нарушается компенсация магнитных полей. Возникающее при этом собственное магнитное поле атома оказывается направленным против индукции внешнего поля.

В атомах парамагнитных веществ магнитные поля электронов скомпенсированы не полностью, и атом оказывается подобным маленькому орбитальному току. В отсутствие внешнего поля эти круговые микротоки ориентированы произвольно, так что суммарная магнитная индукция равна нулю. Внешнее магнитное поле оказывает ориентирующее действие — микротоки стремятся сориентироваться так, чтобы их собственные магнитные поля оказались направленными по индукции внешнего поля. Из-за теплового движения атомов ориентация микротоков никогда не бывает полной. При усилении внешнего поля ориентационный эффект возрастает, так что индукция собственного магнитного поля парамагнитного образца растет прямо пропорционально индукции внешнего магнитного поля. Полная индукция магнитного поля в образце складывается из индукции внешнего магнитного поля и индукции собственного магнитного поля, возникшего в процессе намагничивания.

**Ферромагнетиками** называются вещества, способные сильно намагничиваться в магнитном поле. Магнитная проницаемость ферромагнетиков лежит в пределах  $10^2$ – $10^5$ .

Например, у стали  $\mu \approx 8000$ , у сплава железа с никелем магнитная проницаемость достигает значений 250000.

К группе ферромагнетиков относятся четыре химических элемента: *железо, никель, кобальт, гадолиний*. Из них наибольшей магнитной проницаемостью обладает железо.

Ферромагнетиками могут быть различные сплавы, содержащие ферромагнитные элементы. Широкое применение в технике получили керамические ферромагнитные материалы – ферриты.

Для каждого ферромагнетика существует определенная температура, так называемая *точка Кюри*, выше которой ферромагнитные свойства исчезают, и вещество становится парамагнетиком. У железа температура Кюри равна  $770^\circ\text{C}$ , у кобальта  $1130^\circ\text{C}$ , у никеля  $360^\circ\text{C}$ .

Ферромагнитные материалы делятся на две большие группы — на *магнито-мягкие* и *магнито-жесткие* материалы. Магнито-мягкие ферромагнитные материалы почти полностью размагничиваются, когда внешнее магнитное поле становится равным нулю. К магнито-мягким материалам относится чистое железо, электротехническая сталь и некоторые сплавы. Эти материалы применяются в приборах переменного тока, в которых происходит непрерывное *перемагничивание* (трансформаторы, электродвигатели и т. п.).

Магнито-жесткие материалы сохраняют свою намагниченность и после удаления их из магнитного поля. Примерами могут служить углеродистая сталь и ряд специальных сплавов. Магнито-жесткие материалы используются для *изготовления постоянных магнитов*.

Магнитная проницаемость  $\mu$  ферромагнетиков не является постоянной величиной; она сильно зависит от индукции  $B_0$  внешнего поля (в таблицах приводятся значения максимальной магнитной проницаемости).

Непостоянство магнитной проницаемости приводит к сложной нелинейной зависимости индукции  $B$  магнитного поля в ферромагнетике от индукции  $B_0$  внешнего магнитного поля. Особенностью процесса намагничивания ферромагнетиков является *гистерезис*, то есть зависимость намагничивания от предыстории образца. Кривая намагничивания  $B (B_0)$  ферромагнитного образца представляет собой петлю сложной формы, которая называется *петлей гистерезиса* (рис. 4.24).

Стрелками указано направление процессов намагничивания и размагничивания ферромагнитного образца при изменении индукции  $B_0$  внешнего магнитного поля.

При  $|B_0| > B_{0s}$  наступает магнитное насыщение — намагниченность образца достигает максимального значения. Если теперь уменьшать магнитную индукцию  $B_0$

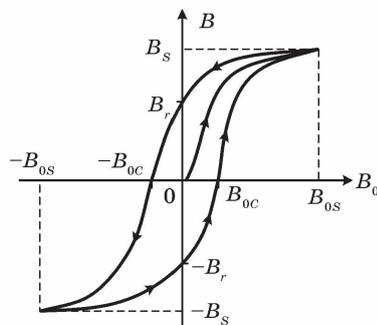


Рис. 4.24

внешнего поля и довести ее вновь до нулевого значения, то ферромагнетик сохранит остаточную намагниченность — поле внутри образца будет равно  $B_r$ .

Остаточная намагниченность образцов позволяет создавать постоянные магниты. Для того чтобы полностью размагнитить образец, необходимо, изменив знак внешнего поля, довести магнитную индукцию  $B_0$  до значения  $-B_{0c}$ , которое принято называть *коэрцитивной силой*. Далее процесс перемагничивания может быть продолжен, как это указано стрелками.

У магнито-мягких материалов значения коэрцитивной силы  $B_{0c}$  невелико — петля гистерезиса таких материалов достаточно «узкая». Материалы с большим значением коэрцитивной силы, то есть имеющие «широкую» петлю гистерезиса, относятся к магнито-жестким материалам.

Качественно ферромагнетизм объясняется наличием собственных (спиновых) магнитных полей у электронов. В кристаллах ферромагнитных материалов возникают условия, при которых, вследствие сильного взаимодействия спиновых магнитных полей соседних электронов, энергетически выгодной становится их параллельная ориентация. В результате такого взаимодействия внутри кристалла ферромагнетика возникают самопроизвольно намагниченные области, *домены*, размером порядка  $10^{-2}$ – $10^{-4}$  см. Каждый домен представляет собой небольшой постоянный магнит.

В отсутствие внешнего магнитного поля  $B_0 = 0$  направления векторов индукции магнитных полей в различных доменах ориентированы хаотически (рис. 4.25, а). Такой кристалл, в среднем, окажется ненамагниченным.

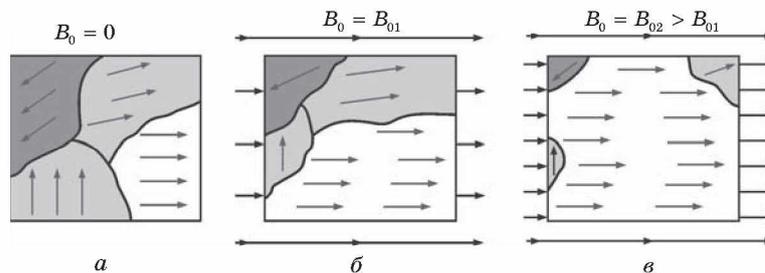


Рис. 4.25

При наложении внешнего магнитного поля  $B_0 = B_{01}$  происходит смещение границ доменов так, что объем доменов, ориентированных по внешнему полю, увеличивается (рис. 4.25, б). С увеличением индукции внешнего поля возрастает магнитная индукция намагниченного вещества. В очень сильном внешнем поле  $B_0 = B_{02} > B_{01}$ , домены, в которых собственное магнитное поле совпадает по направлению с внешним полем, поглощают все остальные домены (рис. 4.25, в) и наступает магнитное насыщение.

#### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ К ГЛАВЕ IV

1. Как возникает магнитное поле в пространстве?
2. В чем суть гипотезы Ампера?
3. Что принимается за положительное направление вектора магнитной индукции?
4. Укажите способы определения направления вектора  $B$ .
5. Назовите основные свойства линий магнитной индукции.
6. Какие поля называются вихревыми?
7. Какая сила называется силой Ампера?
8. Как определяется направление силы Ампера?
9. Когда сила Ампера достигает максимального по модулю значения?
10. Как взаимодействуют параллельные проводники с током?
11. Выведите формулу суммарного вращательного момента, действующего на рамку с током в магнитном поле.
12. В чем суть принципа работы электрического двигателя постоянного тока?
13. Дайте определение единицы магнитной индукции В, принятой в системе единиц СИ.
14. Что принято за единицу силы тока в системе единиц СИ?
15. Какую силу называют силой Лоренца?
16. Что представляет собой траектория движения заряженной частицы в однородном магнитном поле?

17. В каких случаях заряженная частица будет двигаться в однородном магнитном поле по спирали?
18. От чего зависит период обращения частицы в однородном магнитном поле?
19. Чему равна работа силы Лоренца при движении заряженной частицы в магнитном поле?
20. Каков принцип работы циклотрона?
21. Каков физический смысл магнитной проницаемости?
22. Как называются группы сильно- и слабомагнитных веществ?
23. Какая температура называется точкой Кюри?
24. Как называется кривая намагничивания ферромагнитного образца?
25. Объясните механизм намагничивания ферромагнитного образца.

### ТЕСТОВЫЕ ЗАДАНИЯ К ГЛАВЕ IV

1. (01/2-30). Единица физической величины, размерность которой в системе СИ можно представить как  $\frac{\text{Н} \cdot \text{с}}{\text{Кл} \cdot \text{м}}$ , называется ...

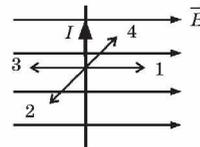
- А) ампер. В) вебер. С) тесла. D) вольт. E) джоуль.

2. (01/2-31). Единица физической величины, размерность которой в системе СИ можно представить как  $\frac{\text{Н}}{\text{Тл} \cdot \text{м}}$ , называется ...

- А) вебер. В) ампер. С) ом. D) вольт. E) джоуль.

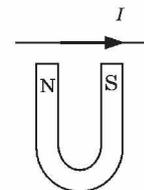
3. (98/ 2-43). Проводник с током расположен перпендикулярно силовым линиям магнитного поля. Определите направление действующей на проводник силы.

- А) 1. В) 2. С) 3. D) 4.  
E) в этом случае на проводник сила не действует.



4. (97/2-41). По проводнику, расположенному над полюсами U-образного постоянного магнита, начал течь ток по направлению, показанному на рисунке. Как при этом начинает двигаться проводник, если магнит установлен жестко?

- А) не движется.  
B) притягивается к полюсам.  
C) отталкивается от полюсов.  
D) поворачивается на  $90^\circ$  в горизонтальной плоскости и притягивается вниз.  
E) поворачиваясь на  $90^\circ$  в горизонтальной плоскости, отталкивается вверх.



5. (97/1-49). В магнитном поле с индукцией 1,5 Тл расположена рамка длиной 4 см и шириной 2 см. Через рамку проходит ток силой 0,5 А. Определить максимальный момент силы (в Н·м), которая действует на рамку.

А) 6. В) 0,75. С)  $6 \cdot 10^{-4}$ . D) 0,03. E) НПО.

6. (97/6-37). На рамку с площадью  $S = 2 \text{ м}^2$  и с током силой в 2 А действует максимальный вращающий момент 4 Н·м. Какова индукция однородного магнитного поля (в теслах), в котором находится рамка?

А) 16. В) 4. С) 1. D) 8. E) 5.

7. (98/6-58). Проводник длиной 10 см и током силой 0,5 А помещен в однородное магнитное поле с индукцией 0,1 Тл параллельно линиям индукции. Найдите силу, с которой магнитное поле действует на проводник (в ньютонах).

А) 0. В) 0,005. С) 0,05. D) 0,5. E) 1.

8. (03/9-56). В однородном магнитном поле с индукцией 2 Тл расположен проводник длиной 0,2 м. Каковы максимальная и минимальная силы, которые могут действовать на проводник со стороны магнитного поля (Н)? Сила тока в проводнике равна 5 А.

А) 2; 0. В) 2; 1. С) 10; 2. D) 1; 0. E) 0,1; 0.

9. (01/1-70). По горизонтальному проводнику длиной 20 см и массой 5 г течет ток силой 5 А. Определите направление и индукцию магнитного поля (Тл), в которое нужно поместить проводник, чтобы он удерживался этим полем в подвешенном состоянии.

А) 0,02, вертикальное. D) 0,25, горизонтальное.  
В) 0,02, горизонтальное. E) 0,05, горизонтальное.  
С) 0,05, вертикальное.

10. (03/7-55). На проводник, расположенный перпендикулярно линиям магнитной индукции, действует сила, равная 2,8 Н. Какой будет эта сила (Н), когда угол между проводником и линиями индукции станет равным  $30^\circ$ ?

А) 0,7. В) 1,4. С) 1,96. D) 2,4. E) 5,6.

11. (01/2-28). Если угол  $30^\circ$  между вектором магнитной индукции однородного магнитного поля и прямолинейным проводником с током, помещенным в это поле, увеличить в 2 раза, то сила Ампера, действующая на проводник, ...

А) увеличится в  $\sqrt{2}$  раз. D) уменьшится в  $\sqrt{3}$  раз.  
В) уменьшится в 2 раза. E) увеличится в  $\sqrt{3}$  раз.  
С) увеличится в 4 раза.

12. (98/11-22). Через провод, имеющий активную длину 10 см и находящийся в однородном магнитном поле с индукцией 0,08 Тл, течет ток силой 2 А. Найдите работу (в мДж), совершаемую внешними силами, при перемещении провода перпендикулярно самому себе и силовым линиям на расстояние 10 см.

А) 32. В) 0,8. С) 3,2. D) 16. E) 1,6.

13. (99/7-53). По какой траектории движется заряженная частица, влетевшая в магнитное поле параллельно линиям индукции?  
 А) винтообразной. С) параболической. Е) эллиптической.  
 В) круговой. Д) прямой.

14. (03/9-54). Первый электромагнит имеет 100 витков и потребляет ток 50А. Второй электромагнит имеет 200 витков и потребляет ток 20 А. Оба электромагнита имеют одинаковые размеры и одинаковые железные сердечники. Каково соотношение между магнитными индукциями  $B_1$  и  $B_2$  в этих электромагнитах?

- А)  $B_2=1,25B_1$ . С)  $B_1=B_2$ . Е)  $B_2=2,5B_1$ .  
 В)  $B_1=2,5B_2$ . Д)  $B_1=1,25B_2$ .

15. (03/9-5). Направление каких величин определяется с помощью правила левой руки?

- А) сил Ампера и Лоренца. В) только силы Ампера.  
 С) только силы Лоренца.  
 Д) индукционного тока в прямом проводнике, движущемся в магнитном поле.  
 Е) индукции магнитных полей, создаваемых электрическим током в проводниках различной формы.

16. (98/5-42). Какое направление имеет вектор силы, действующей со стороны магнитного поля на неподвижный отрицательный электрический заряд?

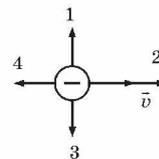
- А) может иметь любое направление.  
 В) совпадает с направлением вектора индукции.  
 С) противоположно вектору индукции.  
 Д) перпендикулярно вектору индукции.  
 Е) на заряд сила не действует ( $F = 0$ ).

17. (98/1-51). Положительно заряженная частица влетела в магнитное поле в направлении силовых линий. Каково направление действующей на частицу силы?

- А) в этом случае сила не действует.  
 В) вдоль силовых линий поля.  
 С) противоположно направлению силовых линий.  
 Д) перпендикулярно силовым линиям вверх.  
 Е) перпендикулярно силовым линиям вниз.

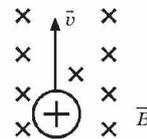
18. (98/4-59). Отрицательно заряженная частица движется в однородном магнитном поле по указанному на рисунке направлению. Определите направление силы Лоренца, действующей на эту частицу. Силовые линии магнитного поля направлены от нас за чертеж.

- А) 1. В) 3. С) 4. Д) 2. Е)  $F=0$ .

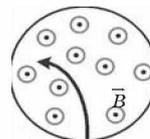


19. (99/4-27). Определите направление силы Лоренца, действующей на положительно заряженную частицу, движущуюся в магнитном поле. Вектор индукции магнитного поля перпендикулярен плоскости чертежа и направлен за чертеж.

- А) вверх. В) вниз. С) влево Д) вправо. Е) НПО.

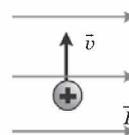


20. 99/4-52). На рисунке показан след (трек) заряженной частицы в камере Вильсона, помещенной в магнитное поле. Вектор индукции магнитного поля перпендикулярен плоскости чертежа и направлен на нас. Определите знак заряда частицы.



- А) частица нейтральна.    С) положительный.  
 В) отрицательный.        D) данных недостаточно.  
 Е) такого трека не может быть.

21. (98/3-48). Положительно заряженная частица влетает в однородное магнитное поле перпендикулярно линиям индукции. Как будет двигаться эта частица в поле?



- А) вдоль силовой линии.  
 В) противоположно силовой линии.  
 С) против часовой стрелки по окружности, если смотреть вдоль линии магнитной индукции.  
 D) по окружности в плоскости чертежа.  
 Е) по прямой, перпендикулярной силовым линиям.

22. (98/11-23). Если электрон и протон, движущиеся в одном направлении с одинаковой скоростью, влетают в однородное магнитное поле перпендикулярно силовым линиям, то ...

- А) на них действуют равные по величине и противоположно направленные силы.  
 В) под действием магнитного поля они будут двигаться прямолинейно и равноускоренно.  
 С) на них действуют противоположно направленные силы, при этом на протон действует большая сила.  
 D) под действием магнитного поля они будут двигаться прямолинейно и равнозамедленно.  
 Е) под действием магнитного поля они будут двигаться по окружностям с равными радиусами.

23. (98/4-57). В однородное магнитное поле в перпендикулярном к нему направлении влетают два электрона, причем скорость первого электрона в 2 раза меньше, чем второго. Определите соотношение их периодов вращения.

- А)  $T_1 = 2T_2$     В)  $T_1 = T_2$     С)  $T_1 = 4T_2$     D)  $T_1 = 0,5T_2$     Е)  $T_1 = 0,25T_2$ .

24. (98/7-62). Как изменится радиус траектории заряженной частицы, влетающей в магнитное поле перпендикулярно линиям индукции, при увеличении кинетической энергии частицы в 4 раза?

- А) уменьшится в 2 раза.        С) уменьшится в 4 раза.  
 В) увеличится в 4 раза.        D) увеличится в 2 раза.  
 Е) не изменится.

25. (98/7-61). Протон и  $\alpha$ -частица с одинаковыми кинетическими энергиями влетают в однородное магнитное поле перпендикулярно его линиям индукции. Какое соотношение справедливо

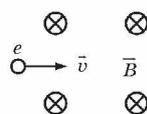
для радиусов  $R_1$  и  $R_2$  их траекторий?  $\alpha$ -частица имеет в 2 раза больший заряд и в 4 раза большую массу, чем протон.

А)  $R_1 = 8R_2$ . В)  $R_2 = 2R_1$ . С)  $R_2 = 8R_1$ . D)  $R_1 = 2R_2$ . E)  $R_1 = R_2$ .

26. (01/2-23). Если протон (массой  $m$ ), влетевший в однородное магнитное поле со скоростью  $v$ , вылетает из этого поля со скоростью, измененной на противоположную, то поле совершило над протоном работу ...

А)  $mv^2/2$ . В)  $mv^2$ . С)  $-mv^2/2$ . D)  $-mv^2$ . E) 0.

27. (01/2-17). Если электрон влетает в область пространства, занятую однородным магнитным полем, то кинетическая энергия электрона с течением времени ...

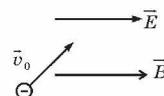


А) изменяется по периодическому закону.  
В) равномерно убывает. С) равномерно возрастает.  
D) остается постоянной. E) изменяется от  $mv^2/2$  до 0.

28. (03/11-30). Какова траектория протона, влетающего в однородное магнитное поле под углом  $45^\circ$  к вектору магнитной индукции?

А) прямая линия. В) парабола. С) винтовая линия. D) синусоида. E) окружность.

29. (01/1-64). Опишите характер движения электрона в вакууме в параллельных электрическом и магнитном полях. Начальная скорость электрона направлена под некоторым углом к направлению полей.



А) по винтовой линии с уменьшающимся шагом.  
В) прямолинейно с ускорением. С) по окружности.  
D) по винтовой линии с увеличивающимся шагом.  
E) зависит от соотношения  $E$  и  $B$ .

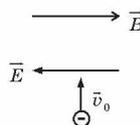
30. (03/5-43). Электрон, прошедший разность потенциалов в 500 В, влетает в однородное магнитное поле перпендикулярно линиям индукции. Каков радиус (см) круговой траектории электрона, если магнитная индукция равна  $10^{-3}$  Тл?

А) 15. В) 10. С) 7,5. D) 3,7. E) 1,4.

31. (01/2-29). Если заряженная частица во взаимно перпендикулярных электрическом (напряженность  $E$ ) и магнитном (индукция  $B$ ) полях движется с постоянной скоростью  $v$ , то величины  $E$ ,  $B$  и  $v$  взаимосвязаны соотношением ...

А)  $v = B/E$ . В)  $v = E/B$ . С)  $v = \frac{E}{\sqrt{E^2 + B^2}}$ . D)  $v = E \cdot B$ . E)  $v = \frac{B}{\sqrt{E^2 + B^2}}$ .

32. (01/2-41). Электрон, влетевший перпендикулярно силовым линиям в область параллельных однородных электрического и магнитного полей, направленных в противоположные стороны, будет двигаться ...



- А) равномерно и прямолинейно.  
 В) по параболе с увеличивающейся скоростью.  
 С) по винтовой линии влево с растущим шагом винта.  
 D) по винтовой линии вправо с растущим шагом винта.  
 E) по окружности с увеличивающейся скоростью.
- 33.** (01/1-57). Если увеличить в 4 раза разность потенциалов, ускоряющую протон, который затем влетает в однородное магнитное поле перпендикулярно линиям индукции, то радиус окружности, по которой будет двигаться протон в поле:  
 А) увеличится в 16 раз.      D) увеличится в 2 раза.  
 В) увеличится в 4 раза.      E) уменьшится в 2 раза.  
 С) уменьшится в 4 раза.
- 34.** (96/8-50). Как нужно изменить скорость кругового движения протона в магнитном поле, чтобы сохранить значение силы Лоренца при увеличении магнитной индукции в 4 раза?  
 А) увеличить в 2 раза.      D) увеличить в 2 раза.  
 В) увеличить в 4 раза.      E) уменьшить в 4 раза.  
 С) уменьшить в 2 раза.
- 35.** (00/4-21). Как изменится период обращения заряженной частицы в циклотроне при увеличении кинетической энергии частицы в 9 раз?  
 А) уменьшится в 3 раза.      D) увеличится в 3 раза.  
 В) увеличится в 9 раз.      E) не изменится.  
 С) уменьшится в 9 раз.
- 36.** (98/4-66). Магнитная индукция внутри металлического тела  $B = 5$  Тл, а индукция внешнего намагничивающего поля  $B_0 = 2,5$  мТл. Какова магнитная проницаемость данного металла?  
 А) 1000.    В) 2500.    С) 5000.    D) 2000.    E) 2.
- 37.** (00/3-22). Температурой Кюри называют температуру, при которой ...  
 А) исчезает разница в плотности газа и жидкости.  
 В) исчезают ферромагнитные свойства вещества.  
 С) газ, жидкость и твердое тело данного вещества находятся в равновесии.  
 D) начинается процесс ионизации газа.  
 E) исчезает разница в плотности пара, жидкости и твердого тела.
- 38.** (96/5-113). Проводник длиной 8 см, по которому течет ток силой 50 А, переместился в однородном магнитном поле с индукцией 20 мТл и совершил при этом работу, равную 8 мДж. На какое расстояние переместился проводник, если он двигался под углом  $45^\circ$  к вектору индукции и самому себе? Он расположен перпендикулярно линиям индукции.  
 А) 10,2.    В) 13,2.    С) 14,1.    D) 15,2.    E) 16,2.
- 39.** (96/8-48). Электрон влетает в однородное магнитное поле индукцией 5,6 мТл перпендикулярно линиям магнитной индукции со скоростью 107 м/с. Чему равен радиус (см) окружности, по которой будет двигаться электрон?  
 А) 0,2.    В) 1.    С) 2.    D) 3.    E) 4.

## Глава V. ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ИНДУКЦИЯ

### § 33. Явление электромагнитной индукции

**Магнитный поток.** Магнитным потоком  $\Phi$  через площадь  $S$  контура называют величину, равную  $\Phi = BS \cos \alpha$ , где  $B$  — модуль вектора магнитной индукции,  $\alpha$  — угол между вектором  $\vec{B}$  и нормалью  $\vec{n}$  к плоскости контура (рис. 5.1).

Направление нормали  $\vec{n}$  и выбранное положительное направление  $\vec{l}$  обхода контура связаны правилом правого буравчика.

Единица магнитного потока в системе СИ называется **вебером** (Вб). Магнитный поток, равный 1 Вб, создается магнитным полем с индукцией 1 Тл, пронизывающим по направлению нормали плоский контур площадью 1 м<sup>2</sup>:  
 $1 \text{ Вб} = 1 \text{ Тл} \cdot 1 \text{ м}^2$ .

**Опыты Фарадея.** Явление *электромагнитной индукции* открыто английским физиком М. Фарадеем в 1831 г. Оно заключается в *возникновении электрического тока в замкнутом проводящем контуре при изменении во времени магнитного потока, пронизывающего контур*.

В опытах магнитное поле может создаваться либо постоянным магнитом (рис. 5.2), либо катушкой с током (рис. 5.3). Изменение магнитного потока, пронизывающего индикаторную катушку, достигается перемещением источника магнитного поля или самой катушки. Явление электромагнитной индукции в обоих случаях протекает одинаково. Магнитный поток, пронизывающий индикаторную катушку, изменяется также при включении или

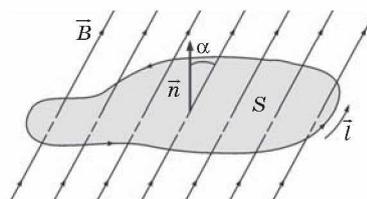


Рис. 5.1

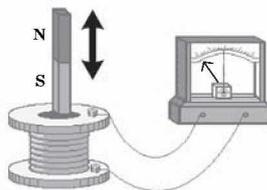


Рис. 5.2

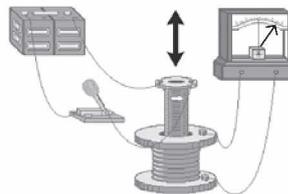


Рис. 5.3

выключении тока в первичной катушке, создающей магнитное поле. В этом случае в цепи индикаторной катушки также протекает короткий импульс тока.

Фарадей экспериментально установил, что при изменении магнитного потока в проводящем контуре возникает ЭДС индукции  $\mathcal{E}_{\text{инд}}$ , равная скорости изменения магнитного потока через поверхность, ограниченную контуром, взятой со знаком минус:

$$\mathcal{E}_{\text{инд}} = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}, \text{ или } \mathcal{E}_{\text{инд}} = -\frac{d\Phi}{dt} = -\Phi',$$

то есть ЭДС индукции равна первой производной магнитного потока по времени, взятой со знаком минус.

Для катушки (соленоида) с числом витков  $N$ :  $\mathcal{E}_{\text{инд}} = -N \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$ .

Знак минус в формуле отражает правило Ленца.

**Правило Ленца** (1833 г.): индукционный ток, возбуждаемый в замкнутом контуре при изменении магнитного потока, всегда направлен так, что создаваемое им магнитное поле препятствует изменению магнитного потока, вызывающего индукционный ток.

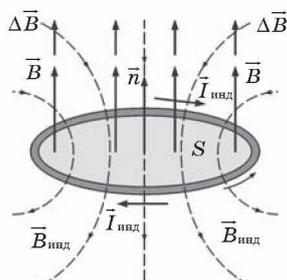


Рис. 5.4

Неподвижный проводящий контур находится в однородном магнитном поле (рис. 5.4), модуль индукции которого увеличивается во времени:  $\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} > 0$ , а  $\mathcal{E}_{\text{инд}} < 0$ .

Индукционный ток  $I_{\text{инд}}$  течет навстречу выбранному положительному направлению  $\vec{l}$  обхода контура.

Правило Ленца отражает тот экспериментальный факт, что  $\mathcal{E}_{\text{инд}}$  и  $\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$  всегда имеют противоположные знаки (знак «минус» в формуле Фарадея). Правило Ленца имеет глубокий физический смысл — оно выражает закон сохранения энергии.

Применение правила Ленца для нахождения направления индукционного тока  $I_i$  в контуре:

1. Установить направление линий магнитной индукции  $\vec{B}$  внешнего магнитного поля.

2. Выяснить, увеличивается ли поток магнитной индукции этого поля через площадь контура ( $\Delta\Phi > 0$ ) или уменьшается ( $\Delta\Phi < 0$ ).

3. Установить направление линий вектора магнитной индукции  $\vec{B}'$  магнитного поля индукционного тока  $I_i$ . Эти линии должны быть согласно правилу Ленца направлены противоположно линиям  $\vec{B}$  при  $\Delta\Phi > 0$  и иметь одинаковое с ними направление при  $\Delta\Phi < 0$ .

4. Зная направление линий магнитной индукции  $\vec{B}'$ , найти направление индукционного тока  $I_i$  пользуясь правилом буравчика.

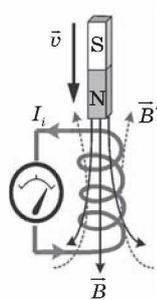


Рис. 5.5

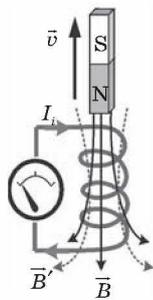


Рис. 5.6

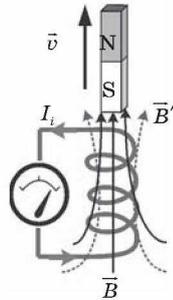


Рис. 5.7

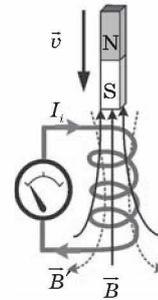


Рис. 5.8

Примените данную последовательность рассуждений для определения направления индукционного тока в примерах на рисунках 5.5, 5.6, 5.7, 5.8.

### § 34. Причины изменения магнитного потока

Изменение магнитного потока, пронизывающего замкнутый контур, может происходить по двум причинам.

1. Магнитный поток изменяется вследствие перемещения контура или его частей в постоянном во времени магнитном поле. Это случай, когда проводники, а вместе с ними и свободные носители заряда, движутся в магнитном поле. Возникновение ЭДС индукции объясняется действием силы Лоренца на свободные заряды в движущихся проводниках. Сила Лоренца играет в этом случае роль сторонней силы.

Рассмотрим возникновение ЭДС индукции в прямоугольном контуре, помещенном в однородное магнитное поле

$\vec{B}$ , перпендикулярное плоскости контура. Пусть одна из сторон контура длиной  $l$  скользит со скоростью  $\vec{v}$  по двум другим сторонам (рис. 5.9).

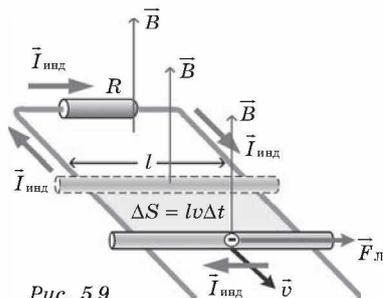


Рис. 5.9

На свободные заряды на этом участке контура действует сила Лоренца. Одна из составляющих этой силы, связанная с переносной скоростью  $\vec{v}$  зарядов, направлена вдоль проводника. Она играет роль сторонней силы. Ее модуль равен  $F_{\text{Л}} = evB$ .

Работа силы  $F_{\text{Л}}$  на пути  $l$  равна  $A = F_{\text{Л}} l = evBl$ .

По определению ЭДС  $\mathcal{E}_{\text{инд}} = \frac{A}{e} = vBl$ .

В других неподвижных частях контура сторонняя сила равна нулю, так как  $v = 0$ .

В общем случае ЭДС индукции в движущихся проводниках определяется по формуле:  $\mathcal{E}_{\text{инд}} = Blv \sin \alpha$ , где  $\alpha$  — угол между вектором магнитной индукции  $\vec{B}$  и направлением скорости  $\vec{v}$  движения проводника.

За время  $\Delta t$  площадь контура изменяется на  $\Delta S = lv \Delta t$ . Изменение магнитного потока за это время равно  $\Delta \Phi =$

$$= Blv \Delta t. \text{ Следовательно, } \left| \mathcal{E}_{\text{инд}} \right| = \left| \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} \right|.$$

Если сопротивление всей цепи равно  $R$ , то по ней будет протекать индукционный ток, равный  $I_{\text{инд}} = \mathcal{E}_{\text{инд}}/R$ .

2. Вторая причина изменения магнитного потока, пронизывающего контур, — изменение во времени магнитного поля при неподвижном контуре. В этом случае возникновение ЭДС индукции уже нельзя объяснить действием силы Лоренца. Электроны в неподвижном проводнике могут приводиться в движение только электрическим полем. Это электрическое поле порождается изменяющимся во времени магнитным полем. Работа этого поля при перемещении единичного положительного заряда по замкнутому контуру равна ЭДС индукции в неподвижном проводнике. Следовательно, электрическое поле, порожденное изменяющимся магнитным полем, не является потенциальным. Его называют **вихревым электрическим полем**.

Представление о вихревом электрическом поле было введено в физику английским физиком Дж. Максвеллом (1861 г.).

Явление электромагнитной индукции в неподвижных проводниках, возникающее при изменении окружающего магнитного поля, также описывается формулой Фарадея. Таким образом, явления индукции в движущихся и неподвижных проводниках протекают одинаково, но физическая причина возникновения индукционного тока оказывается в этих двух случаях различной: в случае движущихся проводников ЭДС индукции обусловлена силой Лоренца; в случае неподвижных проводников ЭДС индукции является следствием действия на свободные заряды вихревого электрического поля, возникающего при изменении магнитного поля.

### § 35. Самоиндукция. Индуктивность. Энергия магнитного поля

Самоиндукция является важным частным случаем электромагнитной индукции, когда изменяющийся магнитный поток, вызывающий ЭДС индукции, создается током в самом контуре. Если ток в рассматриваемом контуре по каким-то причинам изменяется, то изменяется и магнитное поле этого тока, а, следовательно, и собственный магнитный поток, пронизывающий контур. В контуре возникает ЭДС самоиндукции, которая согласно правилу Ленца препятствует изменению тока в контуре.

Собственный магнитный поток  $\Phi$ , пронизывающий контур или катушку с током, пропорционален силе тока  $I$ :

$$\Phi = LI.$$

Коэффициент пропорциональности  $L$  в этой формуле называется *индуктивностью катушки*. Единица индуктивности в СИ называется *генри* (Гн). Индуктивность контура или катушки равна 1 Гн, если при силе постоянного тока 1 А собственный поток равен 1 Вб:  $1 \text{ Гн} = 1 \text{ Вб}/1 \text{ А}$ .

В качестве примера рассчитаем индуктивность длинного соленоида, имеющего  $N$  витков, площадь сечения  $S$  и длину  $l$ . Магнитное поле соленоида определяется формулой  $B = \mu_0 In$ , где  $I$  — ток в соленоиде,  $n = N/l$  — число витков на единицу длины соленоида.

Магнитный поток, пронизывающий все  $N$  витков соленоида, равен:

$$\Phi = B S N = \mu_0 n^2 S I l.$$

Следовательно, индуктивность соленоида равна:

$$L = \mu_0 n^2 Sl = \mu_0 n^2 V,$$

где  $V = Sl$  — объем соленоида, в котором сосредоточено магнитное поле. Полученный результат не учитывает краевых эффектов, поэтому он приближенно справедлив только для достаточно длинных катушек. Если соленоид заполнен веществом с магнитной проницаемостью  $\mu$ , то при заданном токе  $I$  индукция магнитного поля возрастает по модулю в  $\mu$  раз, поэтому индуктивность катушки с сердечником также увеличивается в  $\mu$  раз:  $L_\mu = \mu L = \mu_0 \mu n^2 V$ .

**ЭДС самоиндукции**, возникающая в катушке с постоянным значением индуктивности, согласно формуле Фарадея равна:  $\mathcal{E}_{\text{инд}} = \mathcal{E}_L = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = -\frac{\Delta(LI)}{\Delta t} = -L \frac{\Delta I}{\Delta t}$ .

ЭДС самоиндукции прямо пропорциональна индуктивности катушки и скорости изменения силы тока в ней. В общем случае в дифференциальном виде:  $\mathcal{E}_{\text{инд}} = -L \frac{dI}{dt} = -LI'$ .

*ЭДС самоиндукции равна произведению индуктивности на первую производную тока по времени, взятого со знаком минус.*

**Индуктивность** — это физическая величина, численно равная ЭДС самоиндукции, возникающей в контуре при изменении силы тока на 1А за 1с.

Индуктивность проводника равна 1Гн, если в нем при изменении силы тока на 1А за 1с возникает ЭДС самоиндукции 1В.

**Энергия магнитного поля.** Магнитное поле обладает энергией. Подобно тому как в заряженном конденсаторе имеется запас электрической энергии, в катушке, по виткам которой протекает ток, имеется запас магнитной энергии. Если включить электрическую лампу параллельно катушке с большой индуктивностью в электрическую цепь постоянного тока, то при размыкании

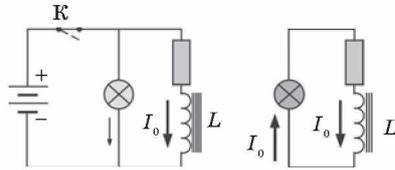


Рис. 5.10

Источником энергии, выделяющейся при этом в электрической цепи, является магнитное поле катушки.

Из закона сохранения энергии следует, что вся энергия, запасенная в катушке, выделится в виде джоулева тепла. Если обозначить через  $R$  полное сопротивление цепи, то за время  $\Delta t$  выделится количество теплоты  $\Delta Q = I^2 R \Delta t$ .

Ток в цепи равен:

$$I = \frac{\mathcal{E}_L}{R} = -\frac{L \Delta I}{R \Delta t}.$$

Выражение для  $\Delta Q$  можно записать в виде:

$$\Delta Q = -LI \Delta I = -\Phi \Delta I.$$

В этом выражении  $\Delta I < 0$ ; ток в цепи постепенно убывает от первоначального значения  $I_0$  до нуля. Полное количество теплоты, выделившейся в цепи, можно получить, выполнив операцию интегрирования в пределах от  $I_0$  до 0.

Это дает  $Q = \frac{LI_0^2}{2}$ .

Эту формулу можно получить графически, изобразив на графике зависимость магнитного потока  $\Phi(I)$  от тока  $I$  (рис. 5.11). Полное количество выделившейся теплоты, равное первоначальному запасу энергии магнитного поля, определяется площадью изображенного треугольника.

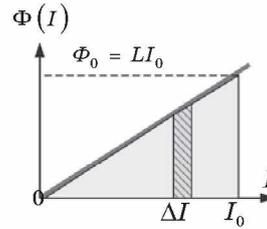


Рис. 5.11

Таким образом, энергия  $W_m$  магнитного поля катушки с индуктивностью  $L$ , создаваемого током  $I$ , равна:

$$W_m = \frac{\Phi I}{2} = \frac{LI^2}{2} = \frac{\Phi^2}{2L}.$$

Применим полученное выражение для энергии катушки к длинному соленоиду с магнитным сердечником. Используя приведенные выше формулы для коэффициента самоиндукции  $L_\mu$  соленоида и для магнитного поля  $B$ , создаваемого током  $I$ , можно получить:

$$W_m = \frac{\mu_0 \mu n^2 I^2}{2} V = \frac{B^2}{2\mu_0 \mu} V,$$

где  $V$  — объем соленоида. Это выражение показывает, что магнитная энергия локализована не в витках катушки, по которым протекает ток, а рассредоточена по всему объему, в котором создано магнитное поле.

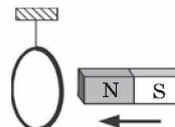
Физическая величина  $w_m = \frac{B^2}{2\mu_0\mu}$ , равная энергии магнитного поля в единице объема, называется **объемной плотностью магнитной энергии**. Дж. Максвелл показал, что выражение для объемной плотности магнитной энергии, выведенное здесь для случая длинного соленоида, справедливо для любых магнитных полей.

### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ К ГЛАВЕ V

1. Что называют магнитным потоком? Единица его измерения.
2. В чем суть явления электромагнитной индукции?
3. Объясните опыты Фарадея по наблюдению явления электромагнитной индукции.
3. Сформулируйте закон Фарадея для электромагнитной индукции.
4. Что можно определить по правилу Ленца? Сформулируйте правило Ленца.
5. Назовите причины возникновения ЭДС в замкнутом контуре.
6. Выведите формулу ЭДС индукции в проводнике, движущемся в постоянном магнитном поле.
7. В чем суть явления самоиндукции?
8. Что называют индуктивностью катушки? Единица измерения.
9. От чего зависит индуктивность катушки?
10. Выведите формулу ЭДС самоиндукции.
11. Каков физический смысл величины 1 Гн?
12. Как вычисляется энергия магнитного поля катушки?
13. Что называется объемной плотностью магнитной энергии?

### ТЕСТОВЫЕ ЗАДАНИЯ К ГЛАВЕ V

1. (98/2-46). Прямой магнит северным полюсом приближается к металлическому кольцу. Кольцо притягивается к магниту или отталкивается от него? Каково направление индукционного тока?



- А) притягивается, противоположно направлению часовой стрелки.
  - В) отталкивается, противоположно направлению часовой стрелки.
  - С) отталкивается, в направлении часовой стрелки.
  - Д) притягивается, в направлении часовой стрелки.
  - Е) не притягивается и не отталкивается, сила тока равна нулю.
2. (98/10). Магнитный поток, пронизывающий замкнутый контур, за 0,4 с изменяется на  $4 \cdot 10^{-5}$  Вб. Определите ЭДС индукции (в вольтах).
- А)  $4 \cdot 10^{-4}$ .    В)  $10^{-5}$ .    С)  $10^{-4}$ .    Д)  $4 \cdot 10^{-5}$ .    Е)  $2 \cdot 10^{-4}$ .

3. (96/5-2). Прямой постоянный магнит падает сквозь горизонтально расположенное алюминиевое кольцо. Сравните ускорение магнита  $a$  в момент прохождения кольца, с ускорением свободного падения  $g$ .

- А)  $a < g$ .    В)  $a > g$ .    С)  $a = g$ .    Д)  $a = 0$ .    Е)  $a = g/2$ .

4. (98/4-62). В катушке индуктивности имеется 100 витков. Магнитный поток, пронизывающий катушку, равномерно изменили за 1 с от  $5 \cdot 10^{-5}$  Вб до  $15 \cdot 10^{-5}$  Вб. Какова ЭДС индукции?

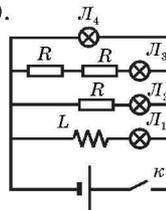
- А) 100.    В) 0,01.    С) 0,1.    Д) 1.    Е) 10.

5. (99/10-67). Магнитный поток в соленоиде в течение 2 мс изменяется с 3 до 9 мВб. Каково число витков соленоида, если ЭДС, создаваемая в нем, равна 60 В?

- А) 5.    В) 20.    С) 180.    Д) 200.    Е) 300.

6. (98/5-44). В какой лампе после замыкания ключа  $K$  сила тока достигает своего максимального значения позже всех остальных?

- А) 4.    В) 3.    С) 2.    Д) 1.  
Е) во всех достигает одновременно.



7. (98/1-52). Укажите выражение для ЭДС самоиндукции.

- А)  $\mathcal{E} = \mathcal{E}_0 \sin \omega t$ .    В)  $\mathcal{E} = -\frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$ .    С)  $\mathcal{E} = -L \frac{\Delta I}{\Delta t}$ .  
Д)  $\mathcal{E} = I(R + r)$ .    Е)  $\mathcal{E} = \frac{A}{q}$ .

8. (00/5-55). Какие из приведенных единиц являются единицами индуктивности: 1)  $\frac{\text{В} \cdot \text{с}}{\text{А}}$ ; 2)  $\frac{\text{А} \cdot \text{В}}{\text{Кл}}$ ; 3)  $\text{А} \cdot \text{с}$ ; 4)  $\frac{\text{Вб}}{\text{А}}$ ; 5) Гн?

- А) 3;4;5.    В) 1;3;5.    С) 2;3;4.    Д) 1;4;5.    Е) 1;3;4.

9. (99/7-52). Чему равна ЭДС самоиндукции (в вольтах) в катушке индуктивностью 100 мГн, если ток в ней за 2 с изменяется на 40 А?

- А) 2.    В) 5.    С) 10.    Д) 20.    Е) 40.

10. (98/7-60). При силе тока через катушку 5 А магнитный поток через нее равен 2 Вб. Определите энергию магнитного поля (в джоулях).

- А) 2,5.    В) 3.    С) 25.    Д) 12,5.    Е) 5.

11. (99/7-43). Найдите силу тока (в амперах) в соленоиде (катушке индуктивности), если магнитный поток через соленоид равен 2 Вб, а энергия магнитного поля 5 Дж.

- А) 5.    В) 7.    С) 10.    Д) 3.    Е) 2,5

**12.** (03/9-55). Прямой проводник длиной 0,1 м движется со скоростью 10 м/с в однородном магнитном поле с индукцией 1 Тл. Скорость, линии индукции и проводник взаимно перпендикулярны. Определите ЭДС индукции, возникающую в проводнике (В).

А) 0,01. В) 0,1. С) 1. D) 10. E) 100.

**13.** (03/9-3). Какова должна быть длина проводника (м), движущегося со скоростью 6 м/с в магнитном поле с индукцией 0,5 Тл перпендикулярно линиям индукции, чтобы возникла ЭДС 12 В? Проводник перпендикулярен линиям поля.

А) 1. В) 2. С) 3. D) 4. E) 6.

**14.** (03/5-44). Какой должна быть скорость (м/с) медной проволоки, движущейся перпендикулярно линиям индукции в однородном магнитном поле с индукцией 1 Тл, чтобы в ней возник индукционный ток силой 1 А? Сечение проволоки равно 0,017 мм<sup>2</sup>, удельное сопротивление меди  $1,7 \cdot 10^{-8}$  Ом·м.

А) 0,5. В) 1. С) 1,5. D) 2. E) 3.

**15.** (03/1-65). Какова скорость изменения силы тока (в А/с) в катушке с индуктивностью 30 мГн, если ЭДС самоиндукции в катушке равна 0,3 В?

А) 0,01. В) 0,1. С) 1. D) 100. E) 10.

**16.** (03/9-57). Какова индуктивность катушки (мГн), если при силе тока 4 А в ней возникает магнитный поток 2 мВб?

А) 0,5. В) 1. С) 2. D) 4. E) 8.

**17.** (03/4-29). Какова ЭДС самоиндукции (В) в катушке с индуктивностью 20 мГн, если скорость изменения силы тока в катушке равна 15 А/с?

А) 0,03. В) 0,3. С) 3. D) 30. E) 300.

**18.** (03/7-56). В результате равномерного изменения силы тока от 0 до 30 А в катушке индуктивностью 0,5 Гн возникла ЭДС индукции, равная 2 В. Определите интервал времени (с), в течение которого произошло это изменение силы тока.

А) 1,5. В) 2. С) 7,5. D) 15. E) 30.

**19.** (03/4-28). Какова ЭДС индукции (мВ) в катушке с индуктивностью 5 мГн, если скорость изменения магнитного потока сквозь катушку равна 10 мВб/с?

А) 50. В) 2. С) 5. D) 10. E) 20.

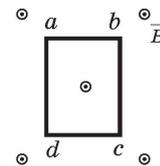
**20.** (03/6-47). Какой должна быть сила тока (А) в катушке индуктивностью 0,01 Гн, чтобы энергия магнитного поля катушки была равна 2 Дж?

А) 20. В) 40. С) 200. D) 400. E) 10.

**21.** (03/9-58). Какова сила тока (А) через катушку индуктивностью 2 Гн, если энергия магнитного поля катушки равна 100 Дж?

А) 1. В) 100. С) 200. D) 50. E) 10.

22. (01/1-73). В однородном магнитном поле с индукцией  $B$  находится прямоугольная рамка площадью  $S$ . Нормаль к плоскости рамки и вектор магнитной индукции направлены на нас. Рамку повернули вокруг оси  $bc$  на  $90^\circ$ . Изменение магнитного потока через рамку при таком повороте равно:

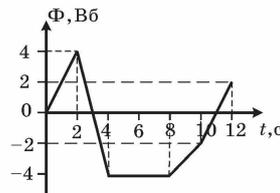


- А)  $-BS/2$ . В)  $-BS$ . С)  $2BS$ . D)  $BS/4$ . E) 0.

23. (01/1-76). В однородном магнитном поле, индукция которого равна  $4/\pi$  Тл, находится круговой виток диаметром 10 см, по которому течет ток силой 1 А. Виток расположен так, что его плоскость параллельна вектору магнитной индукции. Какую работу (Дж) нужно совершить, чтобы повернуть виток на  $90^\circ$  вокруг оси, совпадающей с диаметром витка, так, чтобы его плоскость оказалась перпендикулярной вектору магнитной индукции?

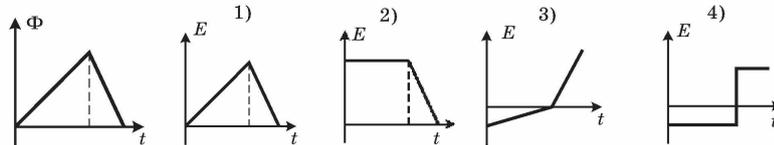
- А)  $10^{-2}$ . В)  $\pi \cdot 10^{-4}$ . С)  $10^{-4}$ . D)  $\pi \cdot 10^{-2}$ . E)  $10^{-4}/\pi$ .

24. На рисунке представлена зависимость магнитного потока, пронизывающего некоторый замкнутый контур, от времени. Максимальная ЭДС индукции возникает в контуре в интервале (с) ...



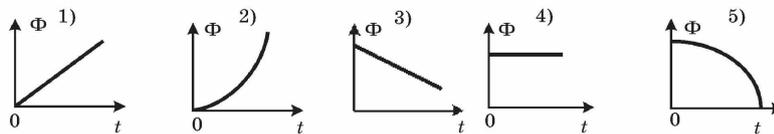
- А) 0–2. В) 2–4. С) 10–12.  
D) 8–10. E) 4–8.

25. (01/1-71). На рисунке изображен график зависимости магнитного потока, пронизывающего катушку, от времени. Какой из графиков зависимости ЭДС индукции от времени правильный?



- А) 4. В) 3. С) 2. D) 1. E) НПО.

26. (01/1-74). На рисунках 1–5 изображены графики зависимости магнитного потока  $\Phi$  сквозь некоторый контур от времени. Постоянная и положительная ЭДС индукции возникает в случае:



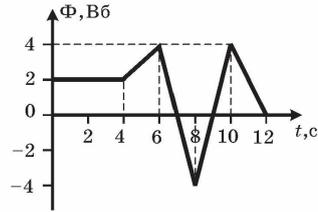
- А) 1. В) 2. С) 3. D) 4. E) 5.

27. (01/2-39). Если металлический стержень длиной  $L$  вращается с частотой  $\nu$  в горизонтальной плоскости в вертикальном однородном магнитном поле с индукцией  $B$  вокруг оси, проходящей через один из концов стержня, то ЭДС индукции, возникающей на этом стержне, равна ...

- А)  $L^2B\nu/2$ . В)  $L^2B\nu$ . С)  $\pi L^2B\nu$ . D)  $2\pi L^2B/\nu$ . E)  $2\pi L^2B\nu$ .

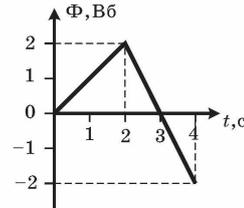
28. (01/2-20). При изменении пронизывающего замкнутый контур магнитного потока в зависимости от времени, как показано на графике, минимальная по модулю ЭДС индукции в контуре возникает в промежутке времени (с) ...

- А) 10–12. С) 6–8. E) 0–4.  
В) 4–6. D) 8–10.



29. (01/2-32). Если магнитный поток, пронизывающий виток с сопротивлением 5 Ом, изменяется с течением времени, как показано на рисунке, то сила тока (А) в витке в интервале 2–4 с, равна ...

- А) 2. С) 0,2. E) 0.  
В) 0,4. D) 0,1.



30. (96/15-59). Магнитное поле, пронизывающее проволочную рамку площадью  $100 \text{ см}^2$  перпендикулярно ее поверхности, изменяется со временем по закону  $B = 0,1 + 0,01t$ ;  $B$  (Тл);  $t$  (с). Определите ЭДС индукции, возникающую в рамке (мВ).

- А) 0,01. В) 0,1. С) 1. D) 10. E) 100.

31. (02/12-16) Сила тока в катушке индуктивностью 2 Гн меняется по закону  $i = 0,3\sin 30t$  (А). Каково амплитудное значение колебаний ЭДС самоиндукции (В) в этой катушке?

- А) 18. В) 180. С) 45. D) 6. E) 0,2.

32. (03/1-69). Каково амплитудное значение ЭДС самоиндукции (в вольтах) на катушке индуктивностью 7 мГн, если сила тока в катушке меняется по закону  $i = \cos 500t$  (А)?

- А) 7. В) 3,5. С) 2,8. D) 1,4. E) 0,5.

## Глава VI. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ КОЛЕБАНИЯ

### § 36. Колебательный контур

**Квазистационарные процессы.** В цепях постоянного тока распределение электрических зарядов на проводниках и токов на участках цепи *стационарно*, то есть неизменно во времени. Электромагнитное поле в таких цепях состоит из электростатического поля неподвижных зарядов и магнитного поля постоянных токов. Эти поля существуют независимо друг от друга.

Если на каком-то участке цепи происходят изменения силы тока или напряжения, то другие участки цепи могут «почувствовать» эти изменения через некоторое время  $\tau$ . Так как электромагнитные возмущения распространяются с конечной скоростью, равной скорости света  $c$ , то  $\tau \approx \frac{l}{c}$ , где  $l$  — расстояние между наиболее удаленными точками цепи. Если время  $\tau$  много меньше длительности процессов, происходящих в цепи, то можно считать, что в каждый момент времени сила тока одинакова во всех последовательно соединенных участках цепи. Такие процессы называются *квазистационарными*.

Квазистационарные процессы можно исследовать с помощью законов постоянного тока, если применять эти законы к *мгновенным значениям сил токов ( $i$ ) и напряжений ( $u$ ) на участках цепи*.

К квазистационарным можно отнести многие достаточно быстрые в обычном смысле процессы. Например, быстрые колебания в радиотехнических цепях с частотами порядка миллиона колебаний в секунду и даже выше. Простыми примерами квазистационарных процессов могут служить процессы, происходящие в RC-, RL- и RLC-цепях.

**Колебательный контур.** В электрических цепях, так же как и в механических системах (пружинном маятнике или математическом маятнике) могут возникать свободные колебания.

Периодические изменения заряда, силы тока и напряжения называют *электрическими колебаниями*.

*Колебательным контуром* называется система, состоящая из конденсатора и катушки, способная совершать свободные электрические колебания.

Рассмотрим последовательный RLC-контур (рис. 6.1).

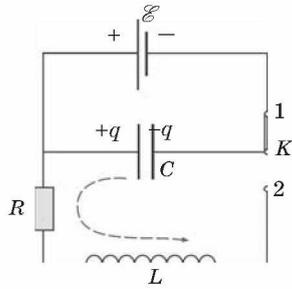


Рис. 6.1

Когда ключ  $K$  находится в положении 1, конденсатор заряжается до напряжения  $\mathcal{E}$ .

После переключения ключа в положение 2 начинается процесс разрядки конденсатора через резистор  $R$  и катушку индуктивности  $L$ . В контуре потечет возрастающий со временем ток. В результате энергия электрического поля конденсатора будет уменьшаться, а энергия магнитного поля катушки будет возрастать.

В момент  $t = \frac{1}{4}T$ , когда конденсатор полностью разрядится, энергия электрического поля обращается в нуль, а энергия магнитного поля и ток достигают наибольшего значения. С этого момента ток в контуре будет убывать, начнет ослабевать магнитное поле катушки и в ней индуцируется ток, который течет согласно правилу Ленца в том же направлении, что и ток разрядки конденсатора. Конденсатор начнет перезаряжаться. При определенных условиях этот процесс имеет колебательный характер.

Для замкнутого  $RLC$ -контурa, не содержащего внешнего источника тока, применим второе правило Кирхгофа (сумма падений напряжений на всех участках контура равна сумме ЭДС этого контура):

$$u_R + u_C = \mathcal{E}_{\text{инд}} \quad \text{или} \quad iR + U = -L \frac{di}{dt},$$

где  $U = \frac{q}{C}$  — напряжение на конденсаторе,  $q$  — заряд конденсатора. В правой части этого соотношения стоит ЭДС самоиндукции катушки.

$$\text{Если } i = \frac{dq}{dt} = \dot{q} \text{ — ток в цепи, то } \frac{di}{dt} = \ddot{q}.$$

Уравнение, описывающее свободные колебания в  $RLC$ -контуре, может быть приведено к следующему виду, если в качестве переменной величины выбрать заряд конденсатора  $q(t)$ :

$$\ddot{q} + \frac{R}{L} \dot{q} + \frac{1}{LC} q = 0.$$

Случай, когда в контуре нет потерь электромагнитной энергии ( $R = 0$ ),  $\ddot{q} + \frac{1}{LC}q = 0$ .

Принято обозначение:  $\frac{1}{LC} = \omega_0^2$ ,  $\Rightarrow \ddot{q} + \omega_0^2 q = 0$ .

Уравнение  $\ddot{q} + \omega_0^2 q = 0$  описывает свободные колебания в LC-контуре в отсутствие затухания. Оно совпадает по виду с уравнением свободных механических колебаний (например, груза на пружине) в отсутствие сил трения и является дифференциальным уравнением гармонических колебаний. Решением этого уравнения является уравнение вида:

$$q(t) = q_0 \cos(\omega t + \varphi_0).$$

Таким образом, в отсутствие затухания свободные колебания в электрическом контуре являются *гармоническими*.

Параметры  $L$  и  $C$  колебательного контура определяют только собственную циклическую частоту свободных колебаний  $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$  и период  $T = 2\pi\sqrt{LC}$  (формула Томсона).

Амплитуда  $q_0$  и начальная фаза  $\varphi_0$  определяются *начальными условиями*, то есть тем способом, с помощью которого система была выведена из состояния равновесия. Для процесса колебаний в контуре (рис. 6.1) после переключения ключа  $K$  в положение 2:  $q_0 = C\mathcal{E}$ ,  $\varphi_0 = 0$ .

При свободных колебаниях происходит периодическое превращение электрической энергии  $W_э$ , запасенной в конденсаторе, в магнитную энергию  $W_м$  катушки и наоборот. Если в колебательном контуре нет потерь энергии, то полная электромагнитная энергия системы остается неизменной:

$$W = W_э + W_м = \frac{q^2}{2C} + \frac{Li^2}{2} = \frac{q_0^2}{2C} = \frac{LI^2}{2} = \text{const},$$

где  $q$ ,  $i$  — мгновенные значения заряда и силы тока;  $q_0$ ,  $I$  — максимальные значения заряда и силы тока.

**Аналогия процессов свободных электрических и механических колебаний.** На рисунке 6.2 приведены графики изменения заряда  $q(t)$  конденсатора и смещения  $x(t)$  груза от положения равновесия, а также графики тока  $i(t)$  и скорости груза  $v(t)$  за один период  $T = \frac{2\pi}{\omega_0}$  колебаний.

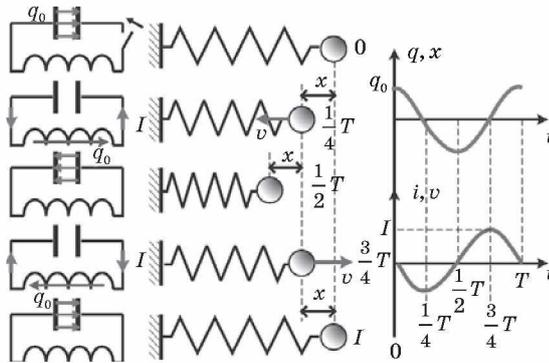


Рис. 6.2

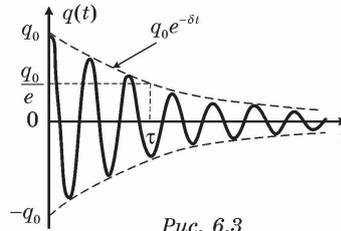
Аналогии между электрическими и механическими величинами

Электрические величины		Механические величины	
Заряд конденсатора	$q(t)$	Координата	$x(t)$
Ток в цепи	$i = \frac{dq}{dt}$	Скорость	$v = \frac{dx}{dt}$
Индуктивность	$L$	Масса	$m$
Величина, обратная емкости	$\frac{1}{C}$	Жесткость	$k$
Напряжение на конденсаторе	$U = \frac{q}{C}$	Упругая сила	$kx$
Энергия электрического поля конденсатора	$\frac{q^2}{2C}$	Потенциальная энергия пружины	$\frac{kx^2}{2}$
Магнитная энергия катушки	$\frac{Li^2}{2}$	Кинетическая энергия	$\frac{mv^2}{2}$
Магнитный поток	$Li$	Импульс	$mv$

### § 37. Затухающие электрические колебания

Все реальные контуры имеют электрическое сопротивление  $R \neq 0$ . Процесс свободных колебаний в таком контуре уже не подчиняется гармоническому закону. За каждый период колебаний часть электромагнитной энергии, запасенной в контуре, превращается в джоулево тепло, и колебания становятся *затухающими* (рис. 6.3).

Затухающие колебания в электрическом контуре аналогичны затухающим колебаниям груза на пружине при наличии вязкого трения, когда сила трения изменяется прямо пропорционально скорости тела:  $F_{\text{тр}} = -\beta v$ . Коэффициент



$\beta$  в этой формуле аналогичен сопротивлению  $R$  в электрическом контуре.

Уравнение свободных колебаний в контуре при наличии затухания имеет вид:

$$\ddot{q} + \frac{R}{L} \dot{q} + \frac{1}{LC} q = 0, \text{ или } \ddot{q} + 2\delta \dot{q} + \omega_0^2 q = 0.$$

Решением этого дифференциального уравнения является функция:

$$q(t) = q_0 e^{-\delta t} \cos(\omega t + \varphi_0).$$

Физическая величина  $\delta = R/2L$  называется **коэффициентом затухания**, множитель  $\exp(-\delta t)$ , описывает затухание амплитуды колебаний.

Скорость затухания зависит от электрического сопротивления  $R$  контура. Интервал времени  $\tau = \frac{1}{\delta}$ , в течение которого амплитуда колебаний уменьшается в  $e \approx 2,7$  раза, называется **временем затухания**.

При изучении затухающих механических колебаний было введено понятие **добротности**  $Q$  колебательной системы:

$$Q = \pi N = \pi \frac{\tau}{T},$$

где  $N$  — число полных колебаний, совершаемых системой за время затухания  $\tau$ . Добротности  $Q$  любой колебательной системы, способной совершать свободные колебания, может быть дано энергетическое определение:

$$Q = 2\pi \frac{\text{запас энергии в колебательной системе}}{\text{потеря энергии за 1 период}}$$

Для  $RLC$ -контура добротность  $Q$  выражается формулой:

$$Q = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}}.$$

Добротность электрических контуров, применяемых в радиотехнике, обычно порядка нескольких десятков и даже сотен. Собственная частота  $\omega$  свободных колебаний в контуре с не очень высокой добротностью несколько меньше собственной частоты  $\omega_0$  идеального контура с теми же значениями  $L$  и  $C$ . Но при  $Q \geq (5 + 10)$  этим различием можно пренебречь.

### § 38. Вынужденные колебания. Переменный ток

Процессы, возникающие в электрических цепях под действием внешнего источника тока, напряжение которого изменяется периодически, называются *вынужденными колебаниями*.

Вынужденные колебания, в отличие от собственных колебаний в электрических цепях, являются незатухающими. Внешний источник периодически обеспечивает приток энергии к системе и не дает колебаниям затухать, несмотря на наличие неизбежных потерь.

Когда внешний источник, напряжение которого изменяется по гармоническому закону с частотой  $\omega$ , включен в электрическую цепь, способную совершать собственные свободные колебания на некоторой частоте  $\omega_0$ , то *установившиеся вынужденные колебания всегда происходят на частоте  $\omega$  внешнего источника*.

Электрические цепи, в которых происходят установившиеся вынужденные колебания под действием источника переменного тока, называются *цепями переменного тока*.

Рассмотрим последовательный колебательный контур (рис. 6.4), то есть  $RLC$ -цепь, в которую включен источник тока, напряжение которого изменяется по периодическому закону:

$$e(t) = \mathcal{E}_0 \cos \omega t,$$

где  $e$  — мгновенное значение напряжения,  $\mathcal{E}_0$  — амплитуда напряжения,  $\omega$  — циклическая частота.

Предполагается, что выполнено условие квазистационарности, поэтому закон Ома можно записать для мгновенных значений токов и напряжений.

Применяя второе правило Кирхгофа, получим:

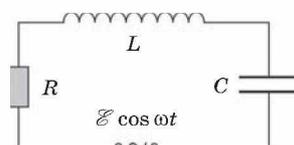


Рис. 6.4

$$Ri + \frac{q}{C} = \mathcal{E}_0 \cos \omega t - L \frac{di}{dt}, \text{ или } Ri + \frac{q}{C} + L \frac{di}{dt} = \mathcal{E}_0 \cos \omega t.$$

Величина  $L \frac{di}{dt}$  — это ЭДС самоиндукции катушки. Эту величину принято называть *напряжением на катушке индуктивности*.

Уравнение вынужденных колебаний можно записать в виде:

$$u_R + u_C + u_L = e(t) = \mathcal{E}_0 \cos \omega t,$$

где  $u_R(t)$ ,  $u_C(t)$  и  $u_L(t)$  — мгновенные значения напряжений на резисторе, конденсаторе и катушке соответственно. Амплитуды этих напряжений будем обозначать буквами  $U_R$ ,  $U_C$  и  $U_L$ .

**а) Резистор в цепи переменного тока (рис. 6.5).**

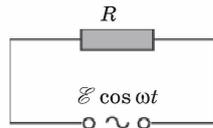


Рис. 6.5



Рис. 6.6

$$i_R R = u_R = U_R \cos \omega t; \quad i_R = \frac{U_R}{R} \cos \omega t = I_R \cos \omega t.$$

Здесь через  $I_R$  обозначена амплитуда тока, протекающего через резистор. Связь между амплитудами тока и напряжения на резисторе выражается соотношением:

$$RI_R = U_R \Rightarrow I_R = \frac{U_R}{R},$$

то есть справедлив закон Ома,  $R$  — активное сопротивление.

*Фазовый сдвиг между током и напряжением на резисторе равен нулю* (векторная диаграмма токов и напряжений изображена на рисунке 6.6).

**б) Конденсатор в цепи переменного тока (рис. 6.7)**

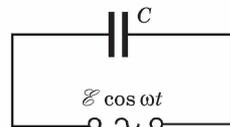


Рис. 6.7

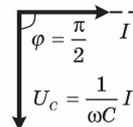


Рис. 6.8

$$u_c = \frac{q}{C} = U_c \cos \omega t; \quad i_c = \frac{dq}{dt} = C \frac{du_c}{dt} =$$

$$= CU_c(-\omega \sin \omega t) = \omega CU_c \cos\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) = I_c \cos\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right).$$

Соотношение между амплитудами тока  $I_c$  и напряжения  $U_c$ :

$$I_c = U_c \omega C, \text{ или } I_c = \frac{U_c}{X_C},$$

то есть справедлив закон Ома,  $X_C = \frac{1}{\omega C}$  — емкостное (реактивное) сопротивление в цепи переменного тока.

Ток опережает по фазе напряжение на  $\frac{\pi}{2}$  (векторная диаграмма токов и напряжений изображена на рисунке 6.8).

**в) Катушка в цепи переменного тока** (рис. 6.9).

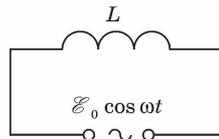


Рис. 6.9

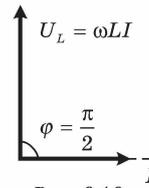


Рис. 6.10

$$u_L = L \frac{di_L}{dt} = U_L \cos \omega t; \quad i_L = \int \frac{U_L}{L} \cos \omega t dt = \frac{U_L}{\omega L} \sin \omega t =$$

$$= \frac{U_L}{\omega L} \cos\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right) = I_L \cos\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right),$$

Соотношение между амплитудами тока  $I_L$  и напряжения  $U_L$ :

$$I_L = \frac{U_L}{\omega L}, \text{ или } I_L = \frac{U_L}{X_L},$$

то есть справедлив закон Ома,  $X_L = \omega L$  — индуктивное (реактивное) сопротивление в цепи переменного тока.

Ток отстает по фазе от напряжения на  $\frac{\pi}{2}$  (векторная диаграмма токов и напряжений изображена на рисунке 6.10).

**г) Полная цепь переменного тока** (рис. 6.11).

Построим векторную диаграмму для последовательного  $RLC$ -контура, в котором происходят вынужденные колебания на частоте  $\omega$  (рис. 6.12). Поскольку ток, протекаю-

щий через последовательно соединенные участки цепи, один и тот же, векторную диаграмму удобно строить относительно вектора тока в цепи. Амплитуду тока обозначим через  $I$ . Начальная фаза тока принимается равной нулю.

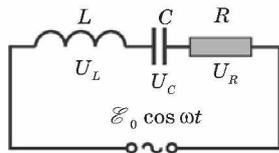


Рис. 6.11

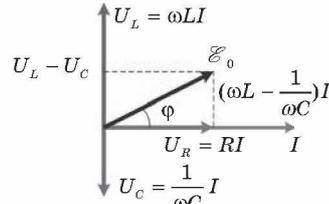


Рис. 6.12

Векторная диаграмма построена для случая, когда  $\omega L > \frac{1}{\omega C}$ , или  $\omega^2 > \omega_0^2 = \frac{1}{LC}$ . В этом случае напряжение внешнего источника опережает по фазе ток, текущий в цепи, на некоторый угол  $\varphi$ .

Из рисунка 6.12 видно, что  $\mathcal{E}_0^2 = U_R^2 + (U_L - U_C)^2$ , откуда следует:

$$I = \frac{\mathcal{E}_0}{\sqrt{R^2 + (\omega L - \frac{1}{\omega C})^2}} \quad \text{— это соотношение называют}$$

*законом Ома для полной цепи переменного тока.*

$Z = \sqrt{R^2 + (\omega L - \frac{1}{\omega C})^2}$ . Величину  $Z$  называют *полным сопротивлением цепи переменного тока*, или *импедансом цепи*.

$R_L - R_C = \omega L - \frac{1}{\omega C}$  — *реактивное сопротивление цепи переменного тока*, или *реактанс*.

$\operatorname{tg} \varphi = \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R}$ . Величина  $\varphi$  — *разность фаз между током и напряжением*.

### § 39. Явление электрического резонанса

Из закона Ома для полной цепи переменного тока видно, что амплитуда тока  $I$  принимает максимальное значение при условии:

$$\omega L - \frac{1}{\omega C} = 0, \text{ или } \omega^2 = \omega_{\text{рез}}^2 = \omega_0^2 = \frac{1}{LC}.$$

Явление возрастания амплитуды колебаний тока при совпадении частоты  $\omega$  внешнего источника с собственной частотой  $\omega_0$  электрической цепи называется *электрическим резонансом*.

При резонансе  $I_{\text{рез}} = \frac{\mathcal{E}_0}{R}$ . Сдвиг фаз  $\phi$  между приложенным напряжением и током в цепи обращается в нуль. (рис. 6.13).

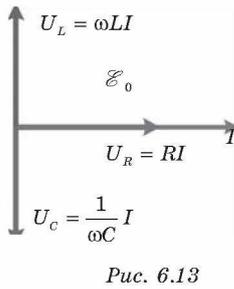


Рис. 6.13

Резонанс в последовательной  $RLC$ -цепи (рис. 6.11) называется *резонансом напряжений*.

При последовательном резонансе ( $\omega = \omega_0$ ) амплитуды  $U_C$  и  $U_L$  напряжений на конденсаторе и катушке резко возрастают и равны друг другу:

$$(U_L)_{\text{рез}} = (U_C)_{\text{рез}} = \omega_0 LI = I \sqrt{\frac{L}{C}} = \frac{\mathcal{E}_0}{R} \sqrt{\frac{L}{C}}.$$

Добротность  $RLC$ -контура:  $Q = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}}.$

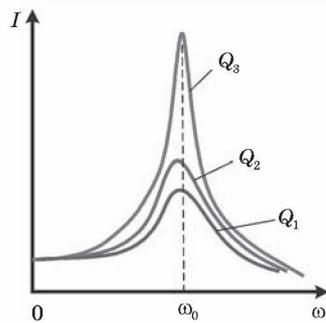


Рис. 6.14

Таким образом, при резонансе амплитуды напряжений на конденсаторе и катушке в  $Q$  раз превышают амплитуду напряжения внешнего источника:

$$|U_L|_{\text{рез}} = |U_C|_{\text{рез}} = \mathcal{E}_0 Q.$$

На рисунке 6.14 изображены резонансные кривые для последовательных контуров с различными значениями добротности:  $Q_3 > Q_2 > Q_1$ .

При резонансе последовательный  $RLC$ -контур оказывает малое сопротивление переменному току.

**Резонанс токов.** Рассмотрим параллельный  $RLC$ -контур, подключенный к внешнему источнику переменного тока (рис. 6.15).

При параллельном соединении напряжение на всех элементах  $R$ ,  $C$  и  $L$  одно и то же и равно напряжению внешнего источника. Токи, текущие в разных ветвях цепи, отличаются не только по значениям амплитуд, но и по фазовым сдвигам относительно приложенного напряжения. Токи в ветвях  $L$  и  $C$  противоположны по фазе, разность фаз равна  $\pi$  (рис. 6.16). Для простоты допустим, что активное сопротивление  $R$  мало и им можно пренебречь. Амплитуда тока во внешней цепи равна:

$$I = |I_L - I_C| = \mathcal{E} \left| \omega C - \frac{1}{\omega L} \right|.$$

Если  $\omega = \omega_{\text{рез}} = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ , то  $I_L = I_C$  и  $I = 0$ .

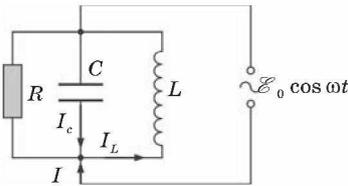


Рис. 6.15

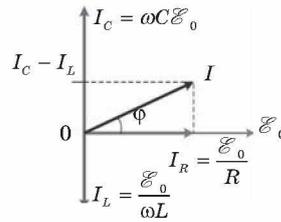


Рис. 6.16

Явление резкого уменьшения амплитуды силы тока во внешней цепи, питающей параллельно включенные конденсатор и катушку индуктивности, при приближении частоты  $\omega$  приложенного напряжения к резонансной частоте  $\omega_{\text{рез}}$  называется **резонансом токов (параллельным резонансом)**. Если учесть сопротивление  $R$ , то из диаграммы следует:

$$I = \mathcal{E}_0 \sqrt{\left(\frac{1}{R}\right)^2 + \left(\omega C - \frac{1}{\omega L}\right)^2}.$$

Поэтому полное сопротивление параллельного  $RLC$ -контурa выражается соотношением:

$$Z = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{1}{R}\right)^2 + \left(\omega C - \frac{1}{\omega L}\right)^2}}.$$

При параллельном резонансе ( $\omega^2 = 1/LC$ ) полное сопротивление цепи принимает значение, равное активному сопротивлению резистора:  $Z = R$ .

Фазовый сдвиг  $\varphi$  между током и напряжением при параллельном резонансе равен нулю, так как

$$\operatorname{tg}\varphi = \frac{I_C - I_L}{I_R} = R\left(\frac{1}{R_C} - \frac{1}{R_L}\right) = R\left(\omega C - \frac{1}{\omega L}\right) = 0.$$

При резонансе параллельный контур оказывает большое сопротивление переменному току.

#### § 40. Мощность в цепи переменного тока

При протекании переменного тока по участку цепи электромагнитное поле совершает работу, и в цепи выделяется джоулево тепло. Мгновенная мощность в цепи переменного тока равна произведению мгновенных значений тока и напряжения:  $p = iu$ . Практический интерес представляет среднее за период переменного тока значение мощности

$$P = P_{cp} = IU \overline{\cos \omega t \cos(\omega t + \varphi)},$$

где  $I$  и  $U$  — амплитудные значения тока и напряжения на данном участке цепи,  $\varphi$  — фазовый сдвиг между током и напряжением. Черта означает знак усреднения. Если участок цепи содержит только резистор с сопротивлением  $R$ , то фазовый сдвиг  $\varphi = 0$ :

$$P_R = I_R U_R \overline{\cos^2 \omega t} = \frac{I_R U_R}{2} = \frac{I_R^2 R}{2}, \text{ так как } \overline{\cos^2 \omega t} = \frac{1}{2}.$$

Для того чтобы это выражение по виду совпадало с формулой для мощности постоянного тока, вводятся понятия действующих, или эффективных, значений силы тока и напряжения:

$$I_d = \frac{I_0}{\sqrt{2}}; \quad U_d = \frac{U_0}{\sqrt{2}}.$$

Средняя мощность переменного тока на участке цепи, содержащем резистор, равна:

$$P_R = I_d U_d.$$

Если участок цепи содержит только конденсатор емкости  $C$ , то фазовый сдвиг между током и напряжением  $\varphi = \frac{\pi}{2}$ ,

поэтому  $P_C = I_C U_C \cos \omega t \cos(\omega t + \frac{\pi}{2}) = I_C U_C \overline{\cos \omega t (-\sin \omega t)} = 0$ .

Аналогично можно показать, что  $P_L = 0$ .

Таким образом, мощность в цепи переменного тока выделяется только на активном сопротивлении. Средняя мощность переменного тока на конденсаторе и катушке индуктивности равна нулю.

Рассмотрим теперь электрическую цепь, состоящую из последовательно соединенных резистора, конденсатора и катушки. Цепь подключена к источнику переменного тока частоты  $\omega$ . На всех последовательно соединенных участках цепи протекает один и тот же ток. Между напряжением внешнего источника  $e(t)$  и током  $i(t)$  возникает фазовый сдвиг на некоторый угол  $\varphi$ . Поэтому можно записать:

$$i(t) = I \cos \omega t; \quad e(t) = \mathcal{E}_0 \cos(\omega t + \varphi).$$

Такая запись мгновенных значений тока и напряжения соответствует построениям на векторной диаграмме (рис. 6.12). Средняя мощность, развиваемая источником переменного тока, равна:

$$P = I \mathcal{E}_0 \cos \omega t \cos(\omega t + \varphi) = \frac{I \mathcal{E}_0}{2} \cos \varphi = I_d \mathcal{E}_d \cos \varphi.$$

При выводе воспользовались тригонометрической формулой

$$\cos \alpha \cos \beta = \frac{1}{2} \cos(\alpha - \beta) + \frac{1}{2} \cos(\alpha + \beta),$$

тогда  $P = \frac{1}{2} I \mathcal{E}_0 \cos \varphi + \frac{1}{2} I \mathcal{E}_0 \cos(2\omega t + \varphi)$ , при усреднении второе слагаемое превращается в нуль. Таким образом, мощность в цепи переменного тока вычисляется по формуле

$$P = I_d \mathcal{E}_d \cos \varphi,$$

где  $\cos \varphi$  — коэффициент мощности. На практике стремятся увеличить  $\cos \varphi$ , наименьшее допустимое значение которого для промышленных установок  $\sim 0,85$ .

Как видно из векторной диаграммы (рис. 6.12),

$U_R = \mathcal{E}_0 \cos \varphi$ , поэтому  $P = \frac{I U_R}{2}$ . Следовательно, вся мощность, развиваемая источником, выделяется в виде джоулева тепла на резисторе, что подтверждает сделанный ранее вывод.

## § 41. Генератор переменного тока

**Генератор** — устройство, преобразующее энергию того или иного вида в электрическую энергию. Существуют различные типы генераторов. Преобладающую роль играют электромеханические индукционные генераторы переменного тока. Их действие основано на явлении электромагнитной индукции. В этих генераторах механическая энергия превращается в электрическую. Принцип действия электромеханического индукционного генератора заложен в поведении вращающейся рамки в однородном магнитном поле.

**Вращение рамки в однородном магнитном поле.** Рассмотрим получение синусоидального переменного тока при равномерном вращении рамки в однородном магнитном поле (рис. 6.17).

Пусть рамка (ABCD), концы которой присоединены к металлическим кольцам 3, находится в однородном магнитном поле с индукцией  $\vec{B}$ . К кольцам прижаты щетки 4, соединенные с потребителем электрической энергии Л. Если рамку привести во вращение вокруг оси  $OO_1$  по часовой стрелке с постоянной угловой скоростью  $\omega$ , то в отрезках провода AB и CD возникнут ЭДС индукции  $\mathcal{E}$ .

Выведем формулу для ЭДС индукции  $\mathcal{E}$ , возникающей в рамке. Поток магнитной индукции  $\Phi$ , пронизывающий рамку площадью  $S$  (рис. 6.18), пропорционален косинусу угла  $\alpha$  между нормалью к рамке и вектором магнитной индукции  $B$ :  $\Phi = BS \cos \alpha$ .

При равномерном вращении рамки с угловой скоростью  $\omega$  угол  $\alpha$  увеличивается пропорционально времени:  $\alpha = \omega t$ . Следовательно,  $\Phi = BS \cos \omega t$ .

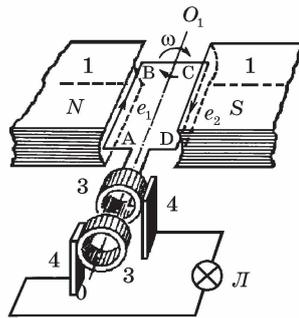


Рис. 6.17

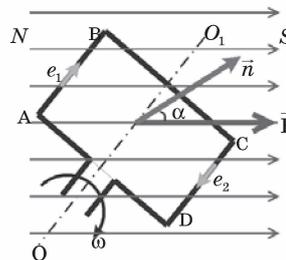


Рис. 6.18

Согласно закону электромагнитной индукции, ЭДС индукции в рамке равна взятой со знаком «минус» скорости изменения потока магнитной индукции, то есть производной потока магнитной индукции по времени:

$$e = - \Phi' = BS\omega \sin \omega t = \mathcal{E}_m \sin \omega t,$$

где  $\mathcal{E}_m = BS\omega$  — амплитуда ЭДС индукции.

Полученное выражение является законом, по которому изменяется напряжение в цепях переменного тока:

$$u = U_m \sin \omega t, \text{ или } u = U_m \cos \omega t.$$

Сила тока в общем случае в любой момент времени не совпадает по фазе с колебаниями напряжения, поэтому мгновенное значение силы тока:

$$i = I_m \sin(\omega t + \varphi),$$

где  $\varphi$  — сдвиг фаз между током и напряжением.

В изображенной на рисунке 6.17 модели генератора вращается проволочная рамка, которая является ротором. Магнитное поле создает неподвижный постоянный магнит. Разумеется, можно было бы поступить и наоборот — вращать магнит, а рамку оставить неподвижной. Именно так и поступают в больших промышленных генераторах. Дело в том, что отводить ток из обмотки ротора во внешнюю цепь приходится при помощи скользящих контактов-колец и щеток. Скользящий контакт неудобен с электротехнической точки зрения. При больших токах в скользящем контакте образуется искра, что ведет к потерям энергии, выгоранию контактов и повышает пожароопасность. Поэтому вращается именно электромагнит, который является ротором, в то время как обмотки, в которых наводится ЭДС, уложены в пазах статора и остаются неподвижными (рис. 6.19).

Генерируемый ток удобнее снимать с неподвижных обмоток, а через скользящие контакты подводить сравнительно слабый ток к вращающемуся электромагниту.

Этот ток вырабатывается отдельным генератором постоянного тока (возбудителем), расположенным на том же валу.

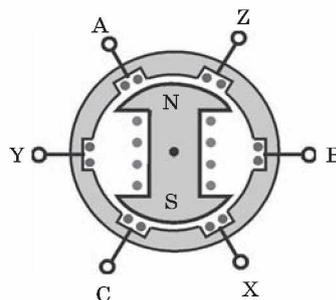


Рис. 6.19

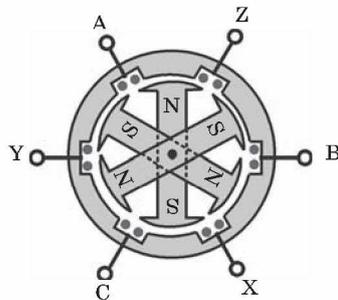


Рис. 6.20

об/с, т. е. 3000 об/мин. Такая же частота вращения потребуется и в случае вращения двухполюсного постоянно-го магнита или двухполюсного электромагнита (рис. 6.19).

Скорость вращения можно уменьшить, если использовать в качестве ротора электромагнит, имеющий несколько пар полюсов. Например, на рисунке 6.20 ротор можно вращать в 3 раза медленнее. Это важно, когда генератор приводится во вращение тихоходными двигателями, например, гидравлическими турбинами. Так, например, роторы генераторов Угличской ГЭС на Волге делают 62,5 об/мин и имеют 48 пар полюсов.

## § 42. Трансформаторы.

### Передача электрической энергии

**Трансформатор** — это устройство, применяемое для повышения или понижения напряжения (тока) переменного тока в широком диапазоне.

Принцип действия трансформаторов основан на явлении электромагнитной индукции. Простейший трансформатор состоит из сердечника замкнутой формы из магнитомягкого материала, на который намотаны две обмотки: первичная и вторичная (рис. 6.21).

Первичная обмотка подсоединяется к источнику переменного тока с ЭДС  $e_1(t)$ , поэтому в ней возникает ток  $i_1(t)$ , создающий в сердечнике трансформатора переменный магнитный поток  $\Phi$ , который практически без рассеяния циркулирует по замкнутому магнитному сердечнику и, следовательно, пронизывает все витки первичной и вторичной обмоток. В режиме *холостого хода*, то есть при разомк-

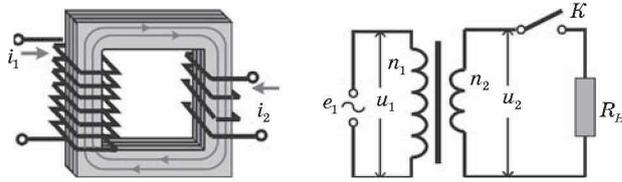


Рис. 6.21. Простейший трансформатор и его условное изображение в схемах;  $n_1$  и  $n_2$  — числа витков в обмотках.

нутой цепи вторичной обмотки, ток в первичной обмотке весьма мал из-за большого индуктивного сопротивления обмотки. В этом режиме трансформатор потребляет небольшую мощность.

Ситуация изменяется, когда в цепь вторичной обмотки включается сопротивление нагрузки  $R_H$ , и в ней возникает переменный ток  $i_2(t)$ . Теперь полный магнитный поток  $\Phi$  в сердечнике создается обоими токами. Но согласно правилу Ленца, магнитный поток  $\Phi_2$ , создаваемый индуцированным во вторичной обмотке током  $i_2$ , направлен навстречу потоку  $\Phi_1$ , создаваемому током  $i_1$  в первичной обмотке:  $\Phi = \Phi_1 - \Phi_2$ . Отсюда следует, что токи  $i_1$  и  $i_2$  изменяются в противофазе, то есть имеют фазовый сдвиг, равный  $180^\circ$ .

Ток  $i_1$  в первичной обмотке в режиме нагрузки значительно больше тока холостого хода. Это следует из того, что полный магнитный поток  $\Phi$  в сердечнике должен быть в режиме нагрузки таким же, как и в режиме холостого хода, так как напряжение  $u_1$  на первичной обмотке в обоих случаях одно и то же. Это напряжение равно ЭДС источника  $e_1$  переменного тока. Так как магнитные потоки, пронизывающие обмотки, пропорциональны числу  $n_1$  и  $n_2$  витков в них, можно записать для первичной обмотки:

$$e_1 + e_{1\text{инд}} = 0, \quad u_1 = e_1 = -e_{1\text{инд}} = n_1 \frac{d\Phi}{dt};$$

$$\text{для вторичной обмотки: } u_2 = i_2 R_H = e_{2\text{инд}}, \quad u_2 = -n_2 \frac{d\Phi}{dt}.$$

$$\text{Следовательно, } u_2 = -\frac{n_2}{n_1} u_1.$$

Знак минус означает, что напряжения  $u_1$  и  $u_2$  находятся в противофазе, так же как и токи  $i_1$  и  $i_2$  в обмотках. Поэтому фазовый сдвиг  $\varphi_1$  между напряжением  $u_1$  и током  $i_1$  в первичной обмотке равен фазовому сдвигу  $\varphi_2$  между на-

пряжением  $u_2$  и током  $i_2$  во вторичной обмотке. Если нагрузкой вторичной обмотки является активное сопротивление  $R_n$ , то  $\varphi_1 = \varphi_2 = 0$ . Для амплитудных значений на-

пряжений на обмотках можно записать:  $\frac{U_1}{U_2} = \frac{n_1}{n_2} = K$ .

Коэффициент  $K = n_1/n_2$  есть коэффициент трансформации. При  $K < 1$  трансформатор называется *повышающим*, при  $K > 1$  — *понижающим*.

Написанные выше соотношения, строго говоря, применимы только к *идеальному трансформатору*, в котором нет рассеяния магнитного потока и отсутствуют потери энергии на джоулево тепло. Эти потери могут быть связаны с наличием активного сопротивления самих обмоток и возникновением индукционных токов (*токов Фуко*) в сердечнике. Для уменьшения токов Фуко сердечники трансформатора изготавливают из тонких стальных листов, изолированных друг от друга. У хороших современных трансформаторов потери энергии при нагрузках, близких к номинальным, не превышает 1–2 %, поэтому к ним приближенно применима теория идеального трансформатора.

Если пренебречь потерями энергии, то мощность  $P_1$ , потребляемая идеальным трансформатором от источника переменного тока, равна мощности  $P_2$  передаваемой нагрузке:

$$\frac{U_1 I_1}{2} = \frac{U_2 I_2}{2}, \quad \cos \varphi_1 = \cos \varphi_2 = 1.$$

Отсюда следует, что  $\frac{I_2}{I_1} = \frac{U_1}{U_2} = \frac{n_1}{n_2} = K$ , то есть, токи в

обмотках обратно пропорциональны числу витков.

**Передача электрической энергии.** Для уменьшения потерь на нагревания проводов необходимо уменьшить силу тока в линии передачи, и, следовательно, увеличить напряжение. Обычно линии электропередачи строятся в расчете на напряжение 400–500 кВ, при этом в линиях используется трехфазный ток частотой 50 Гц.

На рисунке 6.22 представлена схема линии передачи электроэнергии от электростанции до потребителя. Схема дает представление об использовании трансформаторов при передаче электроэнергии.

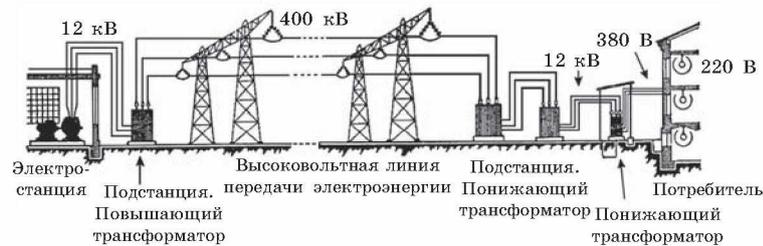


Рис. 6.22. Условная схема высоковольтной линии передачи. Трансформаторы изменяют напряжение в нескольких точках линии.

Следует отметить, что при повышении напряжения в линиях передачи увеличиваются утечки энергии через воздух. Коэффициент полезного действия линии передач не превышает 90 %.

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ К ГЛАВЕ VI

1. Что называется электрическими колебаниями?
2. Что собой представляет электрическая система, способная совершать свободные колебания? Как она называется?
3. Запишите уравнение гармонических колебаний в отсутствие затуханий.
4. Какие колебания называются гармоническими?
5. Начертите график гармонических колебаний  $q(t)$ .
6. По какой формуле определяется период свободных колебаний в электрическом контуре?
7. Запишите закон сохранения энергии для колебательного контура.
8. Какой вид имеет уравнение свободных колебаний в контуре при наличии затухания?
9. На какой частоте происходят установившиеся вынужденные колебания в электрической цепи, когда внешний источник, напряжение которого изменяется с частотой  $\omega$ , подключен к системе с собственной частотой свободных колебаний  $\omega_0$ ?
10. Запишите формулы закона Ома для участка цепи переменного тока, содержащего один из элементов  $R$ ,  $L$  и  $C$ .
11. Начертите векторные диаграммы для участка цепи переменного тока, содержащего один из элементов  $R$ ,  $L$  и  $C$ .
12. Выведите формулу закона Ома для цепи переменного тока, содержащей  $R$ ,  $L$  и  $C$ .
13. В чем суть явления электрического резонанса?
14. Что называют резонансной кривой? Начертите и объясните ее вид для последовательного колебательного контура.

15. Дайте определения понятиям действующих (или эффективных) значений силы тока и напряжения.
16. Чему равна мощность в цепи переменного тока, выделяемая на активном сопротивлении, на конденсаторе и катушке индуктивности?
17. Какое устройство называется генератором? В чем суть принципа работы генератора переменного тока?
18. Объясните принцип работы трансформатора. Что такое коэффициент трансформации?

### ТЕСТОВЫЕ ЗАДАНИЯ К ГЛАВЕ VI

1. (98/5-45). Период колебаний колебательного контура увеличится, если ... 1) увеличить емкость; 2) уменьшить емкость; 3) увеличить индуктивность; 4) уменьшить индуктивность.

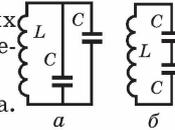
- A) 2; 3.    B) 2; 4.    C) 1; 4.    D) 1; 3.    E) 4.

2. (98/2-47). Как изменится период электромагнитных колебаний при увеличении индуктивности и емкости колебательного контура в 4 раза?

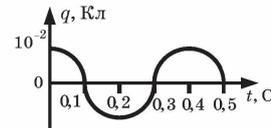
- A) не изменится.    D) уменьшится в 16 раз.  
 B) уменьшится в 4 раза.    E) увеличится в 4 раза.  
 C) увеличится в 16 раз.

3. (98/6-48). Как изменится период свободных электромагнитных колебаний в контуре при переходе от схемы *a* к схеме *б*?

- A) уменьшится в 2 раза.    D) уменьшится в 4 раза.  
 B) увеличится в 4 раза.    E) не изменится.  
 C) увеличится в 2 раза.

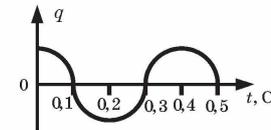


4. (99/1-48). На рисунке представлен график зависимости от времени заряда конденсатора колебательного контура. Каков закон изменения заряда?



- A)  $q = 10^{-2} \cos 9\pi t$ .    C)  $q = 10^{-2} \cos 5\pi t$ .    E) НПО.  
 B)  $q = 10^{-2} \cos 10\pi t$ .    D)  $q = 10^{-2} \cos 20\pi t$ .

5. (98/1-47) На рисунке изображен график зависимости заряда конденсатора колебательного контура от времени. Определите частоту изменения заряда.



- A) 5 Гц.    C) 3,3 Гц.    E) НПО.  
 B) 2,5 Гц.    D) 10 Гц.

6. (98/1-48). Ток в колебательном контуре изменяется со временем по закону  $I = 0,01 \cos 1000t$  (А). Какова индуктивность контура, если емкость конденсатора равна  $21 \cdot 10^{-5}$  Ф?

- A) 0,01 Гн.    B) 0,02 Гн.    C) 0,05 Гн.    D) 0,04 Гн.    E) 0,03 Гн.

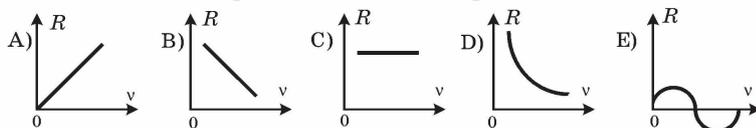
7. (98/4-61). Энергию какого типа имеет идеальный колебательный контур через полпериода после начала разряда конденсатора?

- А) магнитную. В) тепловую. С) электрическую.  
 D) энергия равна нулю. Е) электрическую + магнитную.

8. (98/4-63). Сила тока изменяется по закону  $i = 0,3 \cos(100\pi t + \pi/2)$ . Определите период изменения тока (в секундах).

- А) 1. В) 0,3. С) 0,03. D) 0,02. Е) 0,01.

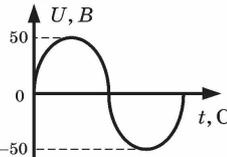
9. (98/5-41). Какой из приведенных графиков выражает зависимость активного сопротивления в цепи переменного тока от частоты?



10. (99/7-49) Напряжение изменяется по закону  $U = 310 \cos 100\pi t$  (В). Определите эффективное значение напряжения (в вольтах).

- А) 50. В) 100. С) 127. D) 220. Е) 310.

11. (98/2-45). На рисунке представлен график зависимости напряжения на участке цепи переменного тока от времени. Чему равно действующее значение напряжения (В)?



- А)  $50/\sqrt{2}$ . В) 50. С) 0. D)  $50\sqrt{2}$ . Е) НПО.

12. (98/4-65). Найдите отношение мощностей  $N_1$  и  $N_2$ , выделяющиеся на резисторе при прохождении через него переменного тока  $i_1 = I_0 \sin \omega t$  и постоянного тока  $I_2 = I_0/2$  соответственно.

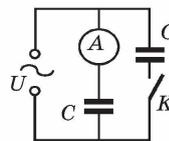
- А) 4. В) 0,25. С) 0,5. D) 1. Е) 2.

13. (98/1-50). Как изменится амплитудное значение силы тока в цепи переменного тока, состоящего из конденсатора, если амплитудное значение напряжения оставить неизменным, а частоту увеличить в 2 раза?

- А) не изменится. D) уменьшится в 4 раза.  
 В) уменьшится в 2 раза. Е) увеличится в 4 раза.  
 С) увеличится в 2 раза.

14. Как изменится показание амперметра, если замкнуть ключ  $K$ ?

- А) уменьшится в 2 раза. D) увеличится в 4 раза.  
 В) не изменится. Е) увеличится в 2 раза.  
 С) уменьшится в 4 раза.



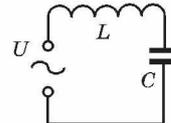
15. (98/7-63). При подключении в цепь переменного тока двух одинаковых конденсаторов последовательно, сила тока в цепи равна  $I_1$ , а при их параллельном соединении  $I_2$ . Определите соотношение между  $I_1$  и  $I_2$ .

- А)  $I_1 = 4I_2$ . В)  $I_2 = 2I_1$ . С)  $I_2 = I_1$ . D)  $I_2 = 4I_1$ . Е)  $I_1 = 2I_2$ .

16. (03/8-45). Какова сила тока (А) в колебательном контуре в момент полной разрядки конденсатора? Индуктивность катушки 2 Гн, максимальная энергия магнитного поля  $2 \cdot 10^{-4}$  Дж.

- А) 0,014. В) 0,1. С) 0,2. D) 1. E) 2.

17. (98/9-42). Каково напряжение сети (В), если напряжение на катушке индуктивности и конденсаторе, показанных на рисунке, равны  $U_L = 80$  В,  $U_C = 60$  В соответственно?



- А) 100. В) 140. С)  $\sqrt{140}$ . D) 20. E) 10.

18. (03/8-42). Максимальная энергия конденсатора колебательного контура равна 2 мкДж. Чему будет равна его энергия (мкДж) через половину периода?

- А) 0. В) 1. С) 2. D) 4. E) НПО.

19. (99/4-36). В цепь переменного тока последовательно подключены катушка, конденсатор и активное сопротивление. Чему равна разность фаз между током и напряжением в этой цепи при резонансе?

- А) 0.  
 В) ток опережает напряжение на  $\pi/2$ .  
 С) ток отстает от напряжения на  $\pi/2$ .  
 D) ток опережает напряжение на  $\pi$ .  
 E) ток отстает от напряжения на  $\pi$ .

20. (03/6-49). Колебательный контур состоит из конденсатора емкостью 2500 пФ и катушки индуктивностью 10 мГн. Каково максимальное значение силы тока (А) в контуре, если максимальное значение напряжения на конденсаторе равно 200 В?

- А) 0,05. В) 0,11. С) 0,2. D) 1,25. E) 2,5.

21. (01/2-15). Во сколько раз уменьшается энергия заряженного конденсатора в идеальном колебательном контуре через  $1/6$  периода свободных колебаний после подключения конденсатора к катушке индуктивности?

- А) 6. В) 4. С) 3. D) 2. E)  $\sqrt{3}$ .

22. (03/9-60). Чем различаются электромагнитные колебания двух одинаковых колебательных контуров, если их конденсаторы заряжаются от двух разных источников питания?

- А) амплитудой. С) периодом. E) не различаются.  
 В) циклической частотой. D) частотой.

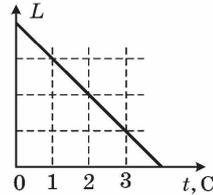
23. (03/9-64). Как изменится период свободных колебаний колебательного контура, если расстояние между пластинами воздушного конденсатора контура увеличить в 4 раза?

- А) увеличится в 2 раза. С) увеличится в 4 раза. E) НПО.  
 В) уменьшится в 2 раза. D) уменьшится в 4 раза.

24. (03/8-43). Чему равно действующее значение напряжения (В), если напряжение в цепи переменного тока изменяется по закону  $U = 141 \sin(100 \pi t)$  (В)?

- А) 360.    В) 220.    С) 140.    D) НПО.    E) 100.

25. (01/1-77). Индуктивность  $L$  колебательного контура изменяется со временем  $t$  согласно зависимости, показанной на рисунке. Емкость  $C$  остается постоянной. Чему равна частота (МГц) колебаний в момент  $t = 2$  с, если в момент  $t = 0$  она равнялась 1 МГц?



- А) 0,5.    В)  $1\sqrt{2}$ .    С)  $\sqrt{2}$ .    D) 2.    E) 1.

26. (03/7-59). Каково максимальное значение силы тока (А), меняющегося по закону косинуса, если в момент  $T/3$  сила тока равна 2,5 А?

- А) 1,25.    В) 2,5.    С) 3.    D) 5.    E) 7,5.

27. (03/9-61). Напряжение в цепи переменного тока меняется по закону  $U=140 \sin 314t$  (В). Найдите действующее значение напряжения (В) и частоту тока (Гц).

- А) 100; 3,14.    С) 140; 314.    E) 100; 6,28.  
В) 140; 50.    D) 100; 50.

28. (03/9-65). Сила тока в цепи переменного тока изменяется по закону  $i = 5 \cos(100\pi t + \pi/3)$  (А). Определите амплитудное значение напряжения (В) на резисторе с активным сопротивлением 20 Ом.

- А) 1000.    В) 500.    С) 100.    D) 50.    E) 5.

29. (03/5-46). Какова частота переменного тока (Гц), если конденсатор емкостью 2 мкФ оказывает этому току сопротивление 8 Ом?

- А)  $10^6$ .    В)  $10^8$ .    С)  $10^3$ .    D)  $10^2$ .    E)  $10^4$ .

30. (03/4-33). Каково действующее значение силы тока (А) через конденсатор, включенный в цепь переменного тока, если заряд конденсатора изменяется по закону  $q=1,4 \cdot 10^{-3} \cos 500t$  (Кл)?

- А) 0,5.    В) 0,7.    С) 1,4.    D) 2,8.    E) 5.

31. (03/9-12). Определите сопротивление (Ом) катушки индуктивностью 2 Гн, включенной в цепь переменного тока частотой 100 Гц.

- А) 50.    В) 200.    С) 314.    D) 628.    E) 1256.

32. (03/9-66). В цепь переменного тока с частотой 50 Гц последовательно включены резистор сопротивлением 5 Ом и катушка индуктивностью 0,01 Гн. Каково действующее значение силы тока (А) в этой цепи, если действующее значение напряжения равно 220 В ( $\pi^2 \approx 10$ )?

- А) 44.    В) 37.    С) 27.    D) 22.    E) 54.

33. (03/8-41). Какой формулой выражается полное сопротивление катушки в цепи переменного тока?

- А)  $\omega C$ .    В)  $\omega L$ .    С)  $\rho \frac{l}{S}$ .    D)  $\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}$ .    E) НПО.

34. (00/6-51). Магнитный поток однородного поля, пересекающий вращающуюся рамку сопротивлением 1 Ом, изменяется по закону  $\Phi = 0,1 \cos 60t$  (Вб). Какова максимальная сила тока, возникающего в рамке (в амперах)?

- А) 3.    В) 6.    С) 30.    D) 60.    E) 0,1.

35. (99/9-33). При вращении проволочной рамки в однородном магнитном поле, пронизывающем рамку, магнитный поток изменяется в зависимости от времени по закону  $\Phi = 5 \cos 942t$ . Сопротивление рамки 471 Ом. Укажите формулу зависимости тока от времени  $i = i(t)$ .

- А)  $i = \sin 942t$ .    С)  $i = 100 \sin 942t$ .    E)  $i = 10 \sin 942t$ .  
В)  $i = 10 \cos 942$ .    D)  $i = 5 \sin 942t$ .

36. (99/7-51). При вращении проволочной рамки в однородном магнитном поле поток магнитной индукции изменяется по закону  $\Phi = 0,1 \cos 30t$  (Вб). Чему равно максимальное значение ЭДС индукции в рамке (в вольтах)?

- А) 30.    В) 3.    С) 1,5.    D) 0,3.    E) 0,1.

37. (99/6-36). Количество витков в якоре генератора уменьшили с 1000 до 400. Как нужно изменить частоту вращения якоря, чтобы максимальное значение ЭДС индукции не изменилось?

- А) увеличить в 5 раз.    D) уменьшить в 2,5 раза.  
В) уменьшить в 5 раз.    E) не надо изменять.  
С) увеличить в 2,5 раза.

38. (98/1-44). В электрической цепи трансформатор используется как: 1) выпрямитель; 2) преобразователь частоты тока; 3) преобразователь напряжения переменного тока; 4) преобразователь силы тока.

- А) 3.    В) 1.    С) 2.    D) 2,3.    E) 3,4.

39. (98/9-41). Принцип работы трансформатора основан на законе...

- А) Джоуля-Ленца.    С) Кулона.    D) Ома.    E) НПО.  
В) электромагнитной индукции.

40. (03/9-67). Трансформатор имеет в первичной обмотке 400 витков, а во вторичной — 200. Каково напряжение (В) во вторичной обмотке, если в первичной оно равно 220 В?

- А) 110.    В) 100.    С) 200.    D) 220.    E) 360.

41. (03/5-28). Первичная обмотка понижающего трансформатора включена в сеть с напряжением 220 В. Каков коэффициент трансформации, если напряжение на концах вторичной обмотки равно 20 В, сопротивление этой обмотки — 1 Ом, а сила тока в ней — 2 А?

- А) 0,09.    В) 5.    С) 8.    D) 0,1.    E) 11.

42. (03/5-58). Напряжение на выходе понижающего трансформатора равно 30 В. К трансформатору подключены параллельно 100 ламп, каждая из которых потребляет ток в 0,8 А. Какова мощность на входе трансформатора (кВт), если его КПД равен 96%?

- А) 1,5.    В) 2.    С) 4.    D) 3.    E) 2,5.

## Глава VII. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ВОЛНЫ

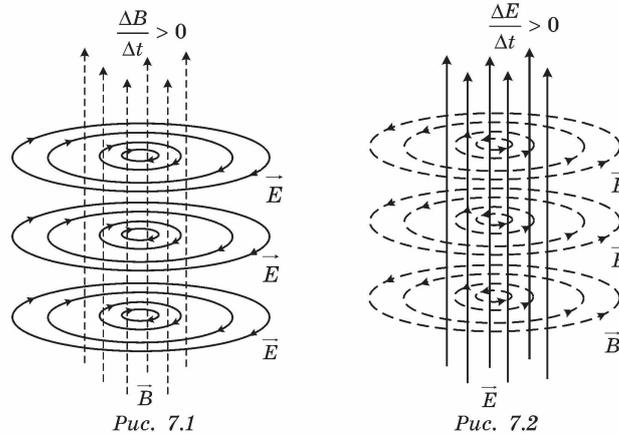
### § 43. Основные свойства электромагнитных волн

Существование электромагнитных волн было теоретически предсказано английским физиком Дж. Максвеллом в 1864 году. Максвелл проанализировал все известные к тому времени законы электродинамики и сделал попытку применить их к изменяющимся во времени электрическому и магнитному полям.

Максвелл ввел в физику понятие вихревого электрического поля и предложил новую трактовку закона электромагнитной индукции, открытой Фарадеем в 1831 г.: *любое изменение магнитного поля порождает в окружающем пространстве вихревое электрическое поле, силовые линии которого замкнуты.*

Максвелл высказал гипотезу о существовании и обратного процесса: *изменяющееся во времени электрическое поле порождает в окружающем пространстве магнитное поле.*

Рисунки 7.1 и 7.2 иллюстрируют взаимное превращение и направления электрического и магнитного полей.



#### Основные выводы теории Максвелла

1. Существуют электромагнитные волны, то есть распространяющееся в пространстве и во времени электромагнитное поле. Электромагнитные волны *поперечны* — векторы  $\vec{E}$  и  $\vec{B}$  перпендикулярны друг другу и лежат в плоскости, перпендикулярной направлению распространения волны ( $\vec{E} \perp \vec{B}$ ,  $\vec{E} \perp \vec{v}$ ,  $\vec{B} \perp \vec{v}$ ) (рис. 7.3).

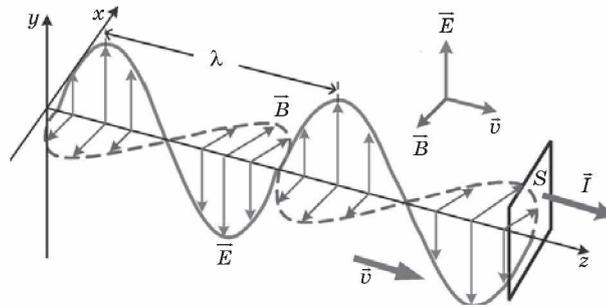


Рис. 7.3

Направления векторов  $\vec{E}$ ,  $\vec{B}$  и  $\vec{v}$  связаны правилом буравчика. При вращении вектора  $\vec{E}$  к вектору  $\vec{B}$ , по кратчайшему пути, поступательное движение буравчика совпадает с направлением скорости электромагнитной волны  $\vec{v}$ .

2. Электромагнитные волны распространяются в веществе с конечной скоростью:

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon\epsilon_0\mu\mu_0}}.$$

Здесь  $\epsilon$  и  $\mu$  — диэлектрическая и магнитная проницаемости вещества;  $\epsilon_0$  и  $\mu_0$  — электрическая и магнитная постоянные:  $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$  Ф/м,  $\mu_0 = 1,256 \cdot 10^{-6}$  Гн/м.

Скорость электромагнитных волн в вакууме ( $\epsilon = \mu = 1$ ):

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0\mu_0}} = 2,99792458 \cdot 10^8 \text{ м/с} \approx 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}.$$

Скорость  $c$  распространения электромагнитных волн в вакууме является одной из фундаментальных физических постоянных. Таким образом,

$$v = \frac{c}{\sqrt{\mu\epsilon}} = \frac{c}{n},$$

где  $n = \sqrt{\mu\epsilon}$  — абсолютный показатель преломления среды.

**Абсолютным показателем преломления среды** называется величина  $n$ , показывающая, во сколько раз скорость распространения электромагнитных волн в среде меньше, чем в вакууме:

$$n = \frac{c}{v}.$$

Для многих прозрачных сред магнитная проницаемость вещества  $\mu = 1$ .

Для электромагнитных волн в вакууме справедливо:

$c = \frac{\lambda}{T} = \lambda\nu$ . Используя формулу Томсона, получим выражение для длины волны:  $\lambda = cT = 2\pi c\sqrt{LC}$ .

3. В электромагнитной волне происходят взаимные превращения электрического и магнитного полей. Эти процессы идут одновременно: и электрическое и магнитное поля выступают как равноправные «партнеры». Поэтому объемные плотности электрической и магнитной энергии равны друг другу:

$$w_{\text{э}} = w_{\text{м}} \quad \text{или} \quad \frac{\varepsilon\varepsilon_0 E^2}{2} = \frac{B^2}{2\mu\mu_0}.$$

Отсюда следует, что в электромагнитной волне модули индукции магнитного поля  $\vec{B}$  и напряженности электрического поля  $\vec{E}$  в каждой точке пространства связаны соотношением:

$$B = \frac{\sqrt{\varepsilon\mu}}{c} E \quad \text{или} \quad E = \nu B.$$

4. Электромагнитные волны переносят энергию. При распространении волн возникает поток электромагнитной энергии. Если выделить площадку  $S$  (рис. 7.3), ориентированную перпендикулярно направлению распространения волны, то за малое время  $\Delta t$  через площадку протечет энергия  $\Delta W_{\text{эм}}$ , равная:

$$\Delta W_{\text{эм}} = (w_{\text{э}} + w_{\text{м}}) \nu S \Delta t.$$

**Плотностью потока, или интенсивностью  $I$** , называют электромагнитную энергию, переносимую волной за единицу времени через поверхность единичной площади:

$$I = \frac{1}{S} \frac{\Delta W_{\text{эм}}}{\Delta t} = (w_{\text{эм}} + w_{\text{м}}) \nu.$$

Подставляя сюда выражения для  $w_{\text{э}}$ ,  $w_{\text{м}}$  и  $\nu$ , можно получить:

$$I = \sqrt{\frac{\varepsilon\varepsilon_0}{\mu\mu_0}} \cdot E^2 = \frac{EB}{\mu\mu_0}.$$

Вектор плотности потока электромагнитной энергии  $\vec{I}$ , совпадающий с направлением распространения электромагнитной волны, модуль которого равен  $EB/\mu\mu_0$ , называют **вектором Умова–Пойнтинга**.

В синусоидальной (гармонической) волне в вакууме среднее значение  $I_{\text{cp}}$  плотности потока электромагнитной энергии равно:

$$I_{\text{cp}} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} \cdot E_0^2 \quad (*)$$

где  $E_0$  — амплитуда колебаний напряженности электрического поля.

Плотность потока энергии в СИ измеряется в ваттах на квадратный метр (Вт/м<sup>2</sup>).

Из формулы (\*) следует, что плотность тока электромагнитной энергии пропорциональна  $E^2$ . В свою очередь напряженность  $E$  пропорциональна ускорению  $a$ , а значит, пропорциональна квадрату частоты  $\omega^2$ . Отсюда следует, что *плотность потока электромагнитной энергии пропорциональна четвертой степени частоты  $\omega^4$*  (если увеличить частоты в 2 раза, то излучаемая энергия возрастает в 16 раз).

5. *Электромагнитные волны могут возбуждаться только ускоренно движущимися зарядами.* Цепи постоянного тока, в которых носители заряда движутся с неизменной скоростью, не являются источником электромагнитных волн.

6. Из теории Максвелла следовало, что электромагнитные волны должны оказывать давление на поглощающее или отражающее тело. Давление электромагнитного излучения объясняется тем, что под действием электрического поля волны в веществе возникают слабые токи, то есть упорядоченное движение заряженных частиц. На эти токи действует сила Ампера со стороны магнитного поля волны, направленная в толщу вещества. Эта сила и создает результирующее давление. Обычно давление электромагнитного излучения ничтожно мало. Так, например, давление солнечного излучения, приходящего на Землю, на абсолютно поглощающую поверхность, составляет примерно 5 мкПа. Первые эксперименты по определению давления излучения на отражающие и поглощающие тела, подтвердившие вывод теории Максвелла, были выполнены П. Н. Лебедевым (1900 г.). опыты Лебедева имели огромное значение для утверждения электромагнитной теории Максвелла.

Существование давления электромагнитных волн позволяет сделать вывод о том, что электромагнитному полю присущ *механический импульс*. Импульс электромагнитного поля в единичном объеме выражается соотношением

$$p_{\text{эм}} = \frac{w_{\text{эм}}}{c},$$

где  $w_{\text{эм}}$  — объемная плотность электромагнитной энергии,  $c$  — скорость распространения волн в вакууме. Наличие электромагнитного импульса позволяет ввести понятие электромагнитной массы.

$$\text{Для поля в единичном объеме } m_{\text{эм}} = \frac{p_{\text{эм}}}{c} = \frac{w_{\text{эм}}}{c^2}.$$

Отсюда следует:  $w_{\text{эм}} = m_{\text{эм}} c^2$ .

Это соотношение между массой и энергией электромагнитного поля является универсальным законом природы. Согласно специальной теории относительности, оно справедливо для любых тел, независимо от их природы и внутреннего строения.

Таким образом, электромагнитное поле обладает всеми признаками материальных тел — энергией, конечной скоростью распространения, импульсом, массой. Это говорит о том, что электромагнитное поле является одной из форм существования материи.

#### § 44. Излучение электромагнитных волн

Первое экспериментальное подтверждение электромагнитной теории Максвелла было дано примерно через 15 лет после создания теории в опытах Г. Герца (1888 г.).

Простейшей системой, излучающей электромагнитные волны, является небольшой по размерам электрический диполь, дипольный момент  $p(t)$  которого быстро изменяется во времени. Такой элементарный диполь называют **диполем Герца (вibrator Герца)** (рис. 7.4).

В радиотехнике диполь Герца эквивалентен небольшой антенне, размер которой много меньше длины волны  $\lambda$ .

Вибратор Герца представляет собой *открытый колебательный контур*. К открытому контуру можно перейти от *закрытого*, увеличивая расстояния между обкладками конденсатора и заменой соленоида линейным проводником (рис. 7.5).

В открытом контуре верхняя обкладка конденсатора заменена

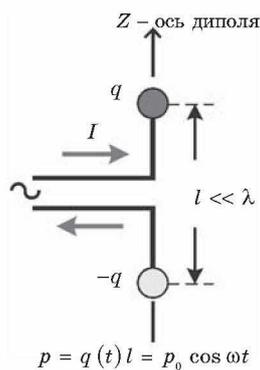


Рис. 7.4

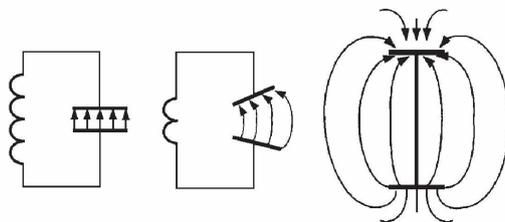


Рис. 7.5

проводом, расположенным высоко над землей. Другая обкладка заменяется нижним проводом, расположенным у самой земли или заменяется землей.

В *закрытом колебательном контуре* электрические и магнитные поля не совпадают в пространстве, электрическое поле сосредоточено между пластинами конденсатора, магнитное поле — внутри катушки. В *открытом колебательном контуре* электрические и магнитные поля совмещены в пространстве и образуют единую электромагнитную волну.

Герц не только экспериментально доказал существование электромагнитных волн, но впервые начал изучать их свойства — *поглощение и преломление в разных средах, отражение от металлических поверхностей, дифракцию* и т. п. Ему удалось измерить на опыте длину волны и скорость распространения электромагнитных волн, которая оказалась равной скорости света.

Герц использовал элементарный диполь в качестве излучающей и приемной антенн при экспериментальном доказательстве существования электромагнитных волн.

В современной радиотехнике излучение электромагнитных волн производится с помощью антенн различных конструкций, в которых возбуждаются токи с высокими и сверхвысокими частотами.

## § 45. Применение электромагнитных волн

Опыты Герца сыграли решающую роль для доказательства и признания электромагнитной теории Максвелла. Через семь лет после этих опытов электромагнитные волны нашли применение в беспроволочной (радио) связи (А. С. Попов, 1895 г.).

**Основы радиосвязи.** Передача и прием электромагнитного сигнала в принципе — это связь, но важно, чтобы

этот сигнал нес информацию. Простейший способ передачи информации — передача коротких и длинных импульсов (азбука Морзе), применяемая в радиотелеграфе. Более сложной задачей является передача звука и изображения. Принцип решения этой задачи заключается в следующем: любую информацию (звук, изображение) необходимо преобразовать в электромагнитные колебания, но этот *информационный сигнал* будет низкочастотным ( $F$ ) и непосредственно передаваться в пространство на большие расстояния не может. Для излучения радиоволн необходимы высокие частоты ( $f$ ), получаемые с помощью генераторов высокой частоты. Процесс наложения (кодирования) *высокочастотного несущего сигнала* и *низкочастотного информационного* называется *модуляцией*. Этот процесс осуществляется в передающих устройствах. В приемных устройствах необходимо произвести выделение информационного сигнала — демодуляцию, или *детектирование*. На рисунке 7.6 представлена простейшая блок-схема линии радиосвязи.

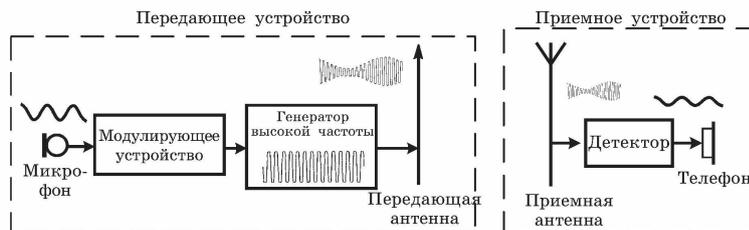


Рис. 7.6.

Существует три основных вида модуляции: амплитудная, частотная и фазовая. Рассмотрим наиболее простую из них — амплитудную модуляцию.

*Амплитудной модуляцией* называется процесс изменения высокочастотных колебаний, в результате которого периодически изменяется амплитуда этих колебаний в соответствии со звуковыми сигналами.

Амплитудная модуляция осуществляется следующим образом: в цепи микрофона возбуждают колебания электрического тока, которые соответствуют звуковым колебаниям, действующим на микрофон (рис. 7.7, б). Эти колебания накладываются на основной ток радиопередатчика (рис. 7.7, а). В результате амплитуда высокочастотных колебаний периодически изменяется и такие колебания являются *модулированными* (рис. 7.7, в).

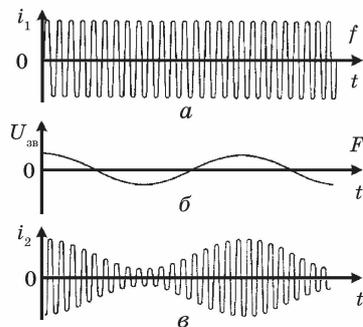


Рис. 7.7. Амплитудная модуляция

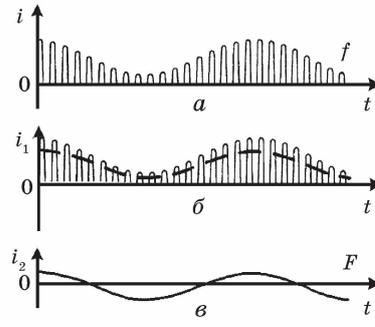


Рис. 7.8. Детектирование

Чтобы обеспечить получение звука в радиоприемной установке, необходимо преобразовать модулированные высокочастотные колебания (рис. 7.8, а) в колебания звуковой частоты (рис. 7.8, в). Такой процесс называется **детектированием**.

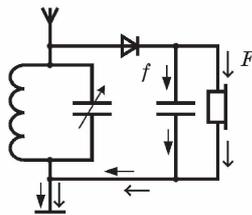


Рис. 7.9

Детектирование производится при помощи полупроводниковых диодов, обладающих односторонней проводимостью. Для разделения высокочастотных колебаний и тока звуковой частоты в цепи детектора создается разветвление: конденсатор и телефон. Через конденсатор проходят высокочастотные токи, а через обмотки телефона — токи звуковой частоты (рис. 7.9).

Таким образом, в телефоне будут воспроизводиться колебания, соответствующие частоте передаваемых звуковых колебаний.

В параграфе рассмотрены только принципы и простейшие устройства, практическое осуществление радиосвязи требует создание сложных высокотехнологичных передающих и приемных устройств.

**Радиолокация** — это обнаружение и точное определение места нахождения объектов с помощью радиоволн.

Радиолокатор состоит из передающей и приемной частей. Мощный генератор СВЧ ( $10^8 - 10^{11}$  Гц) связан с антенной, которая излучает остро направленную волну. Отраженная волна улавливается приемной антенной (рис. 7.10).

Радиолокатор работает в импульсном режиме излучения. Длительность каждого импульса составляет милли-

3. (03/4-38). Каков период (мкс) колебаний магнитной индукции электромагнитной волны, если частота колебаний напряженности электрического поля этой волны равна  $10^6$  Гц?  
 А) 10. В) 6. С) 5. D) 2. E) 1.
4. (03/4-40). Определите скорость электромагнитной волны (м/с) с частотой  $8 \cdot 10^{14}$  Гц и длиной 200 нм.  
 А)  $4 \cdot 10^7$ . В)  $1,6 \cdot 10^8$ . С)  $2,5 \cdot 10^7$ . D)  $2 \cdot 10^8$ . E)  $2,5 \cdot 10^8$ .
5. (03/9-13). Определите длину электромагнитной волны (м) частотой 10 МГц в вакууме.  
 А) 3. В) 5. С) 10. D) 30. E) 100.
6. (03/10-41). Сотовый телефон работает на частоте 100 МГц. Какова длина его рабочей волны (м)?  
 А) 1. В) 3. С) 10. D) 30. E) 100.
7. (03/5-47). На какую длину волны (м) настроен колебательный контур, состоящий из конденсатора емкостью 200 пФ и катушки индуктивностью  $2 \cdot 10^{-4}$  Гн?  
 А) 288. В) 300. С) 314. D) 377. E) 628.
8. (03/4-34). Закон изменения силы тока в колебательном контуре радиоприемника имеет вид  $i = 10^{-3} \cos 5 \cdot 10^5 \pi t$  (А). Определите длину волны (м) принимаемого радиоприемником сигнала.  
 А) 300. В) 450. С) 1000. D) 1200. E) 1800.
9. (03/4-36). На какую длину волны (м) настроен радиоприемник, если заряд конденсатора его колебательного контура изменяется по закону  $q = 500 \cos 2 \cdot 10^6 \pi t$  (нКл)?  
 А) 100. В) 250. С) 300. D) 500. E) 1500.
10. (03/4-39). Какова емкость конденсатора (пФ) колебательного контура, настроенного на волну длиной 1884 м, если индуктивность контура равна 2 мГн?  
 А) 500. В) 188,4. С) 314. D) 942. E) 1000.
11. (00/5-60). Какова частота электромагнитных колебаний (в Гц), если длина электромагнитной волны в вакууме равна  $\lambda = 6 \cdot 10^{-7}$  м?  
 А)  $6 \cdot 10^{15}$ . В)  $5 \cdot 10^{15}$ . С)  $1,8 \cdot 10^{15}$ . D)  $5 \cdot 10^{14}$ . E)  $6 \cdot 10^7$ .
12. (03/9-69). Как изменится мощность, излучаемая открытым колебательным контуром, если частота электромагнитных колебаний увеличится в 2 раза при неизменной амплитуде силы тока?  
 А) не изменится. D) увеличится в 4 раза.  
 В) увеличится в 2 раза. E) увеличится в 16 раз.  
 С) уменьшится в 2 раза.
13. (00/5-61). Длины волн электромагнитных излучений равны соответственно  $\lambda_1 = 8 \cdot 10^{-7}$  м и  $\lambda_2 = 4 \cdot 10^{-7}$  м. Определите соотношение их частот  $\nu_1 / \nu_2$ .  
 А) 0,32. В) 0,5. С) 2. D) 4. E) 32.

14. (99/2-48). Скорость распространения электромагнитных волн в вакууме...

- A) равна скорости их распространения в среде.
- B) меньше скорости их распространения в среде.
- C) больше скорости их распространения в среде.
- D) равна нулю, так как электромагнитные волны в вакууме не распространяются.
- E) НПО.

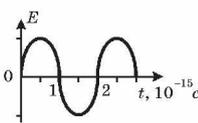
15. (96/ 5-47). Длина излучаемой электромагнитной волны  $1,2 \cdot 10^8$  м. Каков закон изменения тока в антенне радиоприемника?

- A)  $i = I \sin 15,7t$ .
- B)  $i = I \sin 12t$
- C)  $i = I \sin 2\pi t$ .
- D)  $i = I \sin 31,47t$ .
- E)  $i = I \sin 4\pi t$ .

16. (96/15-103). Какова длина электромагнитной волны в вакууме, если ее частота  $3 \cdot 10^{13}$  Гц?

- A)  $10^{-8}$  м.
- B)  $9 \cdot 10^{13}$  м.
- C) 0,01 м.
- D)  $10^{-3}$  м.
- E) 0,01 мм.

17. (01/8-59). На рисунке приведен график зависимости изменения напряженности электрического поля волны, распространяющейся в вакууме, от времени. Определите длину волны (м).



- A)  $3 \cdot 10^{-7}$ .
- B)  $5 \cdot 10^{-6}$ .
- C)  $6 \cdot 10^{-10}$ .
- D)  $6 \cdot 10^{-7}$ .
- E)  $6 \cdot 10^{-8}$ .

18. (02/9-7). Какое число длин волн с частотой  $4 \cdot 10^{14}$  Гц помещается на отрезке длиной 0,75 мм?

- A) 400.
- B) 750.
- C) 1000.
- D) 1500.
- E) 3000.

19. ( 96/7-105). Какова длина радиоволн (м), излучаемых космическим кораблем на частоте 20 МГц?

- A) 5.
- B) 10.
- C) 15.
- D) 20.
- E) 25.

20. (96/7-113). Какую частоту имеет монохроматическое излучение (Гц), если в интервале 0,5 м в вакууме располагается  $2 \cdot 10^6$  длин волн?

- A)  $12 \cdot 10^{14}$ .
- B)  $14 \cdot 10^2$ .
- C)  $1,3 \cdot 10^{14}$ .
- D)  $12 \cdot 10^{12}$ .
- E)  $12 \cdot 10^4$ .

21. (96/3-42). Чему равна длина электромагнитной волны в вакууме, если ее период колебаний  $1,5 \cdot 10^{-12}$  с?  $c = 3 \cdot 10^8$  м/с.

- A)  $2 \cdot 10^{17}$  мм.
- B) 0,45 мм.
- C) 2 м.
- D)  $4,5 \cdot 10^{-7}$  см.
- E) 0,45 м.

22. (96/15-84). Колебательный контур радиоприемника состоит из катушки с индуктивностью  $L=0,1$  мГн и конденсатора переменной емкости от 1000 до 10000 пФ. Каков интервал длин волн, на которое можно настроить этот приемник?

- A)  $60 \div 600$  м.
- B)  $600 \div 6000$  м.
- C)  $189 \div 1885$  м.
- D)  $189 \div 600$  м.
- E)  $600 \div 1885$  м.

23. (03/9-68). На каком расстоянии (км) находится объект, если сигнал, посланный радиолокатором, возвратился через  $3 \cdot 10^{-4}$  с?

- A) 45.
- B) 90.
- C) 180.
- D) 270.
- E) 450.

## Глава VIII. ГЕОМЕТРИЧЕСКАЯ ОПТИКА

**Оптика** — раздел физики, изучающий свойства и физическую природу света, а также его взаимодействие с веществом. Учение о свете принято делить на три части:

— **геометрическая**, или **лучевая, оптика**, в основе которой лежит представление о световых лучах;

— **волновая оптика**, изучающая явления, в которых проявляются волновые свойства света;

— **квантовая оптика**, изучающая взаимодействие света с веществом, при котором проявляются корпускулярные свойства света.

### § 46. Основные законы геометрической оптики

Основные законы геометрической оптики были известны задолго до установления физической природы света.

**Закон прямолинейного распространения света:**  
*в оптически однородной среде свет распространяется прямолинейно.*

Опытным доказательством этого закона могут служить резкие тени, отбрасываемые непрозрачными телами при освещении светом источника достаточно малых размеров («точечный источник»).

Другим доказательством может служить опыт по прохождению света далекого источника сквозь небольшое отверстие, в результате чего образуется узкий световой пучок. Этот опыт приводит к представлению о *световом луче* как о геометрической линии, вдоль которой распространяется свет. Отметим, что закон прямолинейного распространения света нарушается и понятие светового луча утрачивает смысл, если свет проходит через малые отверстия, размеры которых сравнимы с длиной волны. Границы применимости геометрической оптики будут рассмотрены в разделе о дифракции света.

На границе раздела двух прозрачных сред свет может частично отразиться так, что часть световой энергии будет распространяться после отражения по новому направлению, а частично пройти через границу и распространяться во второй среде.

**Закон отражения света:**

1. Падающий и отраженный лучи, а также перпендикуляр к границе раздела двух сред, восстановленный в точке падения луча, лежат в одной плоскости.

2. Угол отражения  $\beta$  равен углу падения  $\alpha$ , т. е.  $\beta = \alpha$ .

**Закон преломления света:** 1. Падающий и преломленный лучи, а также перпендикуляр к границе раздела двух сред, восстановленный в точке падения луча, лежат в одной плоскости (рис. 8.1).

2. Отношение синуса угла падения  $\alpha$  к синусу угла преломления  $\gamma$  есть величина, постоянная для двух данных сред:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \gamma} = n \text{ или } n_1 \sin \alpha = n_2 \sin \gamma.$$

Закон преломления был экспериментально установлен голландским ученым В. Снеллиусом (1621 г.).

Постоянную величину  $n$  называют **относительным показателем преломления** второй среды относительно первой.

Показатель преломления среды относительно вакуума называют **абсолютным показателем преломления**.

Относительный показатель преломления двух сред равен отношению их абсолютных показателей преломления:

$$n = \frac{n_2}{n_1}.$$

Законы отражения и преломления находят объяснение в волновой физике. Согласно волновым представлениям, преломление является следствием изменения скорости распространения волн при переходе из одной среды в другую. Физический смысл показателя преломления — это отношение скорости распространения волн в первой среде  $v_1$  к скорости их распространения во второй среде  $v_2$ :  $n = \frac{v_1}{v_2}$ .

Абсолютный показатель преломления равен отношению скорости света  $c$  в вакууме к скорости света  $v$  в среде:  $n = \frac{c}{v}$ .

Среду с меньшим абсолютным показателем преломления называют оптически менее плотной. При переходе света из оптически более плотной среды в оптически менее плотную, луч отклоняется от перпендикуляра. При переходе

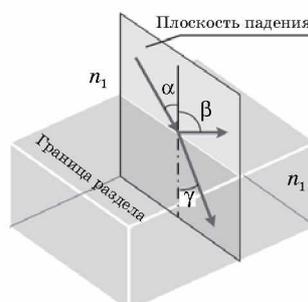


Рис. 8.1

света из оптически менее плотной среды в оптически более плотную, луч прижимается к перпендикуляру.

**Явление полного отражения.** При переходе света из оптически более плотной среды в оптически менее плотную  $n_2 < n_1$  (например, из воды в воздух) можно наблюдать явление *полного отражения*, то есть исчезновение преломленного луча (рис. 8.2). Это явление наблюдается при углах падения, превышающих некоторый критический угол  $\alpha_{\text{пр}}$ , который называется *предельным углом полного внутреннего отражения*.

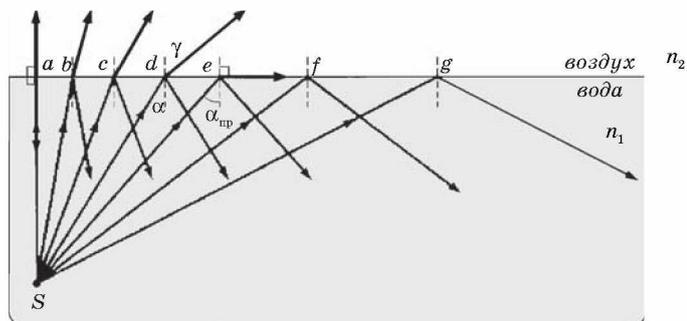


Рис. 8.2

Для угла падения  $\alpha = \alpha_{\text{пр}}$ ,  $\sin \gamma = 1$ , значение  $\sin \alpha_{\text{пр}} = n_2/n_1 < 1$ . Если второй средой является воздух ( $n_2 \approx 1$ ), то формулу удобно переписать в виде:

$$\sin \alpha_{\text{пр}} = 1/n,$$

где  $n = n_1 > 1$  — абсолютный показатель преломления первой среды.

Для границы раздела стекло–воздух ( $n = 1,5$ ) критический угол равен  $\alpha_{\text{пр}} = 42^\circ$ ; для границы вода–воздух ( $n = 1,33$ ) —  $\alpha_{\text{пр}} = 48,7^\circ$ ; для алмаза–воздух ( $n = 2,42$ ) —  $\alpha_{\text{пр}} = 24^\circ 40'$ .

Практически важным применением явления полного внутреннего отражения является создание *волоконных световодов*, которые представляют собой тонкие (от нескольких микрон до миллиметров), произвольно изогнутые нити из оптически прозрачного материала (стекло, кварц) (рис. 8.3).

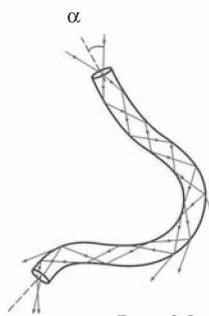


Рис. 8.3

Свет, попадающий на торец световода, может распространяться по нему на большие расстояния за счет полного внутреннего отражения от боковых поверхностей. При сильном изгибе волокна закон полного внутреннего отражения нарушается, и свет частично выходит из волокна через боковую поверхность.

Научно-техническое направление, занимающееся разработкой и применением оптических световодов, называется *волоконной оптикой*.

### § 47. Прохождение света через пластинку с параллельными гранями

Пусть на пластинку толщиной  $h$  из вещества с показателем преломления  $n$  падает из воздуха узкий пучок света  $AO_1$  под углом  $\alpha$  (рис. 8.4).

После преломления на верхней грани этот пучок идет внутри пластинки по пути  $O_1O_2$ , вторично преломляется на нижней грани и идет в воздухе по пути  $O_2B$ . Сравним углы  $\alpha$  и  $\alpha'$ . Для верхней грани формула закона преломления принимает вид  $\frac{\sin \alpha}{\sin \gamma} = n$ , а

для нижней грани  $\frac{\sin \gamma}{\sin \alpha'} = \frac{1}{n}$ .

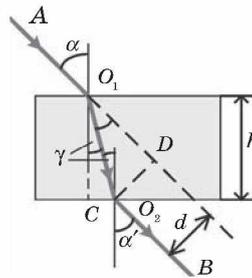


Рис. 8.4

После умножения этих равенств друг на друга получим  $\frac{\sin \alpha}{\sin \alpha'} = 1$ , откуда  $\sin \alpha = \sin \alpha'$  и  $\alpha = \alpha'$ . Это означает, что луч  $AO_1$  параллелен лучу  $O_2B$ . Следовательно, лучи света после прохождения через пластинку с плоскими и параллельными гранями смещаются параллельно самим себе на расстояние  $d$ .

Из треугольника  $O_1O_2D$ :  $\Rightarrow \sin(\alpha - \gamma) = \frac{d}{O_1O_2}$ ;

Из треугольника  $O_1CO_2$ :  $\Rightarrow \cos \gamma = \frac{h}{O_1O_2}$ ;

После почленного деления имеем:

$$\frac{\sin(\alpha - \gamma)}{\cos \gamma} = \frac{d}{h} \Rightarrow d = \frac{\sin(\alpha - \gamma)}{\cos \gamma} h.$$

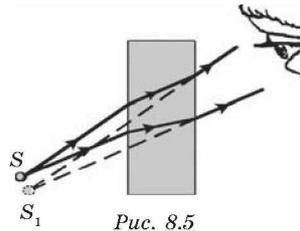


Рис. 8.5

Расстояние, на которое смещается луч после прохождения пластинки, тем больше, чем толще пластинка и чем больше показатель преломления этого вещества.

При наблюдении через пластинку с параллельными гранями предмет кажется смещенным (рис. 8.5).

### § 48. Прохождение света через трехгранную призму

Две грани призмы, сквозь которые лучи входят в призму и выходят из нее, называют **преломляющими гранями**, а двугранный угол  $\varphi$ , составленный этими гранями, называют **преломляющим углом призмы**.

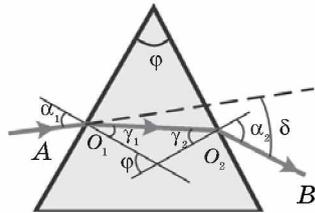


Рис. 8.6

На призму из материала оптически более плотного, чем среда, с показателем преломления  $n$  (рис. 8.6) падает узкий монохроматический (одного цвета) пучок света  $AO_1$  (из воздуха на стеклянную призму). В призме он идет по пути  $O_1O_2$ . При выходе из призмы он удаляется от перпендикуляра к грани и идет по пути  $O_2B$ .

В результате прохождения сквозь призму пучок света отклоняется к ее широкой части (основанию).

До призмы свет шел по направлению  $AO_1$ , а после призмы идет по направлению  $O_2B$ , смещение пучка произошло на угол  $\delta$ , который называют **углом отклонения**.

$$\delta = (\alpha_1 - \gamma_1) + (\alpha_2 - \gamma_2), \text{ так как } \gamma_1 + \gamma_2 = \varphi, \delta = \alpha_1 + \alpha_2 - \varphi.$$

Запишем закон преломления для точек  $O_1$  и  $O_2$ , приняв что для малых углов отношение синусов можно заменить отношением значения этих углов:

$$\text{для } O_1 \quad n = \frac{\sin \alpha_1}{\sin \gamma_1} \approx \frac{\alpha_1}{\gamma_1} \Rightarrow \alpha_1 \approx n\gamma_1;$$

$$\text{для } O_2 \quad \frac{1}{n} = \frac{\sin \gamma_2}{\sin \alpha_2} \approx \frac{\gamma_2}{\alpha_2} \Rightarrow \alpha_2 \approx n\gamma_2.$$

$$\alpha_1 + \alpha_2 \approx n(\gamma_1 + \gamma_2) \approx n\varphi \text{ или } \delta + \varphi \approx n\varphi \Rightarrow \delta \approx \varphi(n - 1).$$

Угол отклонения  $\delta$  тем больше, чем больше показатель преломления вещества призмы  $n$  и ее преломляющий угол  $\varphi$ .

Если трехгранную призму поместить в среду, показатель преломления которой больше показателя преломления вещества призмы (рис. 8.7), то, пройдя призму, луч  $AO_1$  будет отклоняться в сторону преломляющего угла  $\varphi$  на угол  $\delta$ . Параллельные лучи, падающие на призму, остаются параллельными.

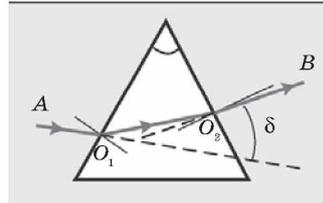


Рис. 8.7

Предельный угол для стекла составляет около  $42^\circ$ . Поэтому в призмах с углами  $45^\circ$  получается полное внутреннее отражение света.

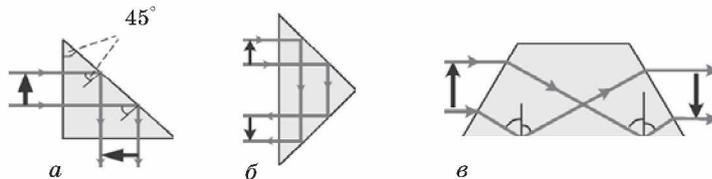


Рис. 8.8. *a* — поворотная призма; *б* — оборотная призма; *в* — призма прямого зрения.

На рис. 8.8, *a* показан поворот лучей на  $90^\circ$  в призме, на рис. 8.8, *б* показано, как поворачивается изображение в такой же призме, если лучи падают на другую грань. На рис. 8.8, *в* изображена призма прямого зрения, верхние и нижние лучи меняются местами, но продолжают распространяться в прежнем направлении.

## § 49. Плоское зеркало

Простейшим оптическим устройством, способным создавать изображение предмета, является **плоское зеркало** (рис. 8.9).

Изображение предмета, даваемое плоским зеркалом, формируется за счет лучей, отраженных от зеркальной поверхности. Это изображение является мнимым, так

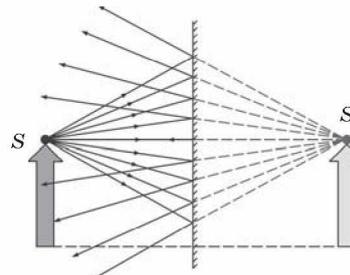


Рис. 8.9

как оно образуется пересечением не самих отраженных лучей, а их продолжений в «зазеркалье». Точка  $S'$  является мнимым изображением точки  $S$ .

Вследствие закона отражения света *мнимое изображение предмета располагается симметрично относительно зеркальной поверхности. Размер изображения равен размеру самого предмета.*

## § 50. Сферическое зеркало

*Сферическим зеркалом* называют зеркально отражающую поверхность, имеющую форму сферического сегмента. Центр сферы, из которой вырезан сегмент, называют *оптическим центром зеркала*. Вершину сферического сегмента называют *полюсом*. Прямая, проходящая через оптический центр и полюс зеркала, называется *главной оптической осью сферического зеркала*. Главная оптическая ось является осью симметрии зеркала.

Сферические зеркала бывают *вогнутыми* и *выпуклыми*.

Если на вогнутое сферическое зеркало падает пучок лучей, параллельный главной оптической оси (рис. 8.10), то после отражения от зеркала лучи пересекутся в точке, которая называется *главным фокусом* зеркала  $F$ . Расстояние от фокуса до полюса зеркала называют *фокусным расстоянием* и обозначают той же буквой  $F$ . У вогнутого сферического зеркала главный фокус действительный. Он расположен посередине между центром и полюсом зеркала.

Отраженные лучи пересекаются в одной точке только в том случае, если падающий параллельный пучок был достаточно узким, так называемый *параксиальный пучок*. Ход лучей, при котором все лучи, вышедшие из одной точки, собираются в одной точке, называется *стигматическим*.

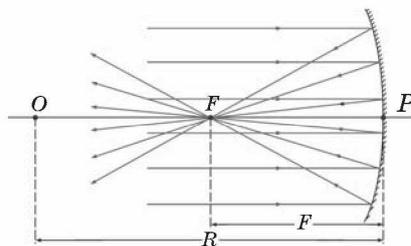


Рис. 8.10.  $O$  — оптический центр;  $P$  — полюс;  $F$  — главный фокус зеркала;  $OP$  — главная оптическая ось;  $R$  — радиус кривизны зеркала.

Главный фокус выпуклого зеркала является мнимым. Если на выпуклое зеркало падает пучок лучей, параллельных главной оптической оси, то после отражения в фокусе не сами лучи, а их продолжения (рис. 8.11).

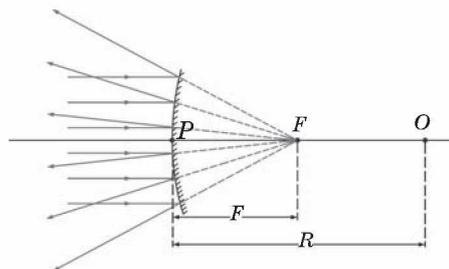


Рис. 8.11.  $F$  — мнимый фокус зеркала;  $O$  — оптический центр;  $OP$  — главная оптическая ось.

Фокусным расстояниям сферических зеркал приписывается определенный знак: для вогнутого зеркала  $F = \frac{R}{2}$ , для выпуклого  $F = -\frac{R}{2}$ , где  $R$  — радиус кривизны зеркала.

Изображение какой-либо точки  $A$  предмета в сферическом зеркале можно построить с помощью любой пары стандартных лучей:

луч  $AOC$ , проходящий через оптический центр зеркала; отраженный луч  $COA$  идет по той же прямой;

луч  $AFD$ , идущий через фокус зеркала; отраженный луч идет параллельно главной оптической оси;

луч  $AP$ , падающий на зеркало в его полюсе; отраженный луч симметричен с падающим относительно главной оптической оси.

луч  $AE$ , параллельный главной оптической оси; отраженный луч  $EFA_1$  проходит через фокус зеркала.

На рисунке 8.12 построено изображение предмета  $AB$  в вогнутом зеркале. Изображение  $A'B'$  — действительное, уменьшенное, перевернутое.

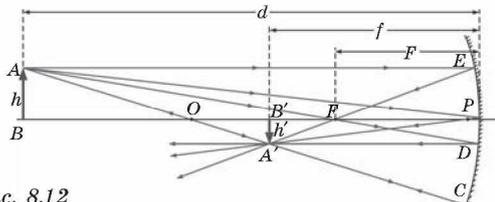


Рис. 8.12

На рисунке 8.13 построено изображение предмета  $AB$  в выпуклом зеркале. Изображение  $A'B'$  — мнимое, уменьшенное, прямое.

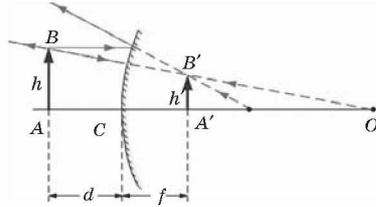


Рис. 8.13

Линейное увеличение сферического зеркала  $\Gamma$  определяется как отношение линейных размеров изображения  $h'$  и предмета  $h$ . Формулу линейного увеличения сферического зеркала можно получить из рисунка 8.12:

$$\Gamma = \frac{h'}{h} = -\frac{f}{d}.$$

$h' > 0$ , если изображение является прямым;  
 $h' < 0$ , если изображение является перевернутым;  
 $h > 0$  всегда считается положительной.

## § 51. Тонкие линзы

**Линзой** называется прозрачное тело, ограниченное двумя сферическими поверхностями. Если толщина самой линзы мала по сравнению с радиусами кривизны сферических поверхностей, то линзу называют **тонкой**.

Линзы бывают *собирающими* и *рассеивающими*.

Собирающая линза (рис. 8.14, а) в середине толще, чем у краев, рассеивающая линза (рис. 8.14, б), наоборот, в средней части тоньше.



Рис. 8.14

Прямая, проходящая через центры кривизны  $O_1$  и  $O_2$  сферических поверхностей, называется **главной оптической осью линзы**. Главная оптическая ось пересекается с линзой в точке  $O$ , которую называют **оптическим центром линзы**. Луч света проходит через оптический центр линзы, не отклоняясь от первоначального направления (рис. 8.15).

Все прямые, проходящие через оптический центр, называются **побочными оптическими осями**.

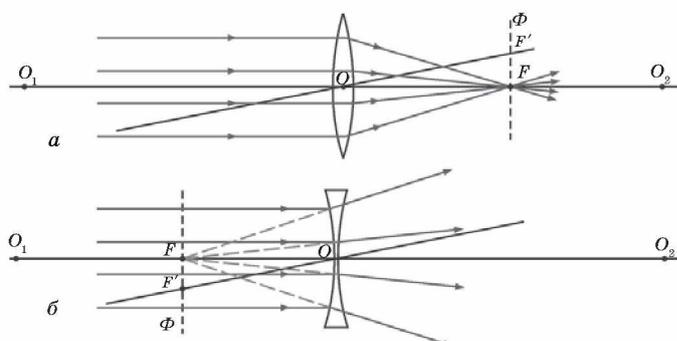


Рис. 8.15. Преломление параллельного пучка лучей в собирающей (а) и рассеивающей (б) линзах. Точки  $O_1$  и  $O_2$  — центры сферических поверхностей;  $O_1O_2$  — главная оптическая ось;  $O$  — оптический центр;  $F$  — главный фокус;  $F'$  — побочный фокус;  $O F'$  — побочная оптическая ось;  $\Phi$  — фокальная плоскость.

Если на линзу направить пучок лучей, параллельных главной оптической оси, то после прохождения через линзу лучи (или их продолжения) соберутся в одной точке  $F$ , которая называется **главным фокусом линзы**. У тонкой линзы имеются два главных фокуса, симметрично расположенных относительно линзы на главной оптической оси. У собирающих линз фокусы действительные, у рассеивающих — мнимые.

Пучки лучей, параллельных одной из побочных оптических осей, также фокусируются после прохождения через линзу в точку  $F'$ , которая расположена при пересечении побочной оси с **фокальной плоскостью**  $\Phi$ , то есть плоскостью, перпендикулярной главной оптической оси и проходящей через главный фокус. Расстояние между оптическим центром линзы  $O$  и главным фокусом  $F$  называется **фокусным расстоянием**. Оно обозначается той же буквой  $F$ .

**Изображения в тонких линзах.** Изображения предметов бывают *прямыми* и *перевернутыми*, *действительными* и *мнимыми*, *увеличенными* и *уменьшенными*.

Для геометрических построений используют свойства стандартных лучей, ход которых известен. Это лучи, проходящие через оптический центр или один из фокусов линзы, а также лучи, параллельные главной или одной из побочных оптических осей.

**Построение изображения в собирающей линзе, когда предмет находится за двойным фокусом линзы (рис. 8.16).**

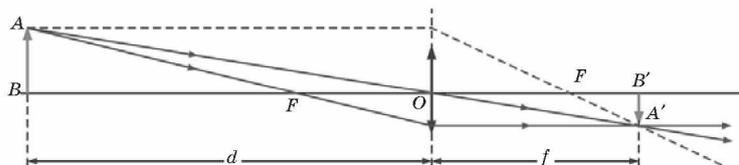


Рис. 8.16

Изображение в этом случае получается действительным, уменьшенным, перевернутым (фотоаппарат).

**Построение изображения в собирающей линзе, когда предмет находится между фокусом и двойным фокусом линзы (рис. 8.17).**

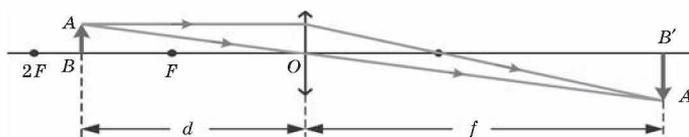


Рис. 8.17

Изображение в этом случае получается действительным, увеличенным, перевернутым (проекционный аппарат).

**Построение изображения предмета, расположенного между фокусом  $F$  и собирающей линзой (рис. 8.18).**

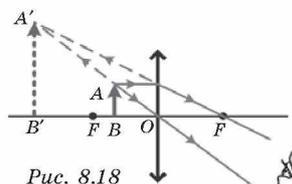


Рис. 8.18

Изображение  $A'B'$  получается мнимым, увеличенным, прямым (лупа).

**Построение изображения в рассеивающей линзе (рис. 8.19).**

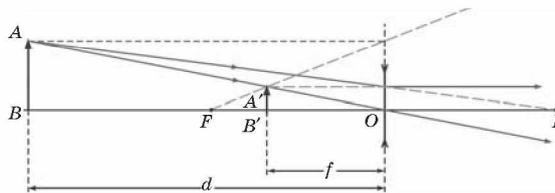


Рис. 8.19

Рассеивающая линза дает мнимое, уменьшенное, прямое изображение.

Некоторые из стандартных лучей, использованных на рис. 8.16 и 8.19 для построения изображений, не проходят через линзу. Эти лучи реально не участвуют в образовании изображения, но они могут быть использованы для построений.

**Формула тонкой линзы.** Если расстояние от предмета до линзы обозначить через  $d$ , а расстояние от линзы до изображения через  $f$ , то формулу тонкой линзы можно записать в виде:

$$\frac{1}{d} + \frac{1}{f} = \frac{1}{F} = D.$$

Величину  $D$ , обратную фокусному расстоянию, называют **оптической силой линзы**. Единица измерения оптической силы является 1 *диоптрия* (дптр). Диоптрия — оптическая сила линзы с фокусным расстоянием 1 м: 1 дптр = м<sup>-1</sup>.

Формула тонкой линзы аналогична формуле сферического зеркала. Ее можно получить из подобия треугольников на рисунках 8.16–8.19.

$F > 0$  для собирающей линзы;

$F < 0$  для рассеивающей линзы;

$d > 0$  и  $f > 0$  — для действительных предметов и изображений;

$d < 0$  и  $f < 0$  — для мнимых источников и изображений.

**Линейным увеличением линзы  $\Gamma$**  называют отношение линейных размеров изображения  $h'$  и предмета  $h$ .

Величина  $h$  всегда считается положительной. Для прямых изображений  $h' > 0$  и  $\Gamma > 0$ , для перевернутых изображений  $h' < 0$  и  $\Gamma < 0$ . Из подобия треугольников на рисунках 8.16–8.19 можно получить формулу для линейного увеличения тонкой линзы:

$$\Gamma = \frac{h'}{h} = -\frac{f}{d}.$$

Оптическая сила  $D$  линзы зависит как от радиусов кривизны  $R_1$  и  $R_2$  ее сферических поверхностей, так и от показателя преломления  $n$  материала, из которого изготовлена линза:

$$D = \frac{1}{F} = (n - 1) \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right).$$

Радиус кривизны выпуклой поверхности считается положительным, вогнутой — отрицательным. Когда  $R_1 = R_2 = R$ ,  $D = \frac{1}{F} = \frac{2 \cdot (n - 1)}{R}$ . Следовательно,  $D \sim n$  и  $D \sim \frac{1}{R}$ .

Во многих оптических приборах свет последовательно проходит через две или несколько линз. Изображение предмета, даваемое первой линзой, служит предметом (действительным или мнимым) для второй линзы, которая строит второе изображение предмета. Это второе изображение также может быть действительным или мнимым. Общее линейное увеличение  $\Gamma$  системы из двух линз равно произведению линейных увеличений обеих линз:  $\Gamma = \Gamma_1 \cdot \Gamma_2$ . Оптическая сила системы двух (нескольких) линз равна сумме оптических сил каждой линзы  $D = D_1 + D_2$ .

Если предмет или его изображение находятся в бесконечности, то линейное увеличение утрачивает смысл. Частным случаем является телескопический ход лучей в системе из двух линз, когда и предмет, и второе изображение находятся на бесконечно больших расстояниях. Телескопический ход лучей реализуется в зрительных трубах — *астрономической трубе Кеплера* и *земной трубе Галилея*.

**Недостатки (абберации) тонких линз.** Искажения, возникающие при формировании изображения, называются *абберациями*, которые не позволяют получать высококачественные изображения. Главные из них — сферическая и хроматическая абберации. Сферическая абберация проявляется в том, что в случае широких световых пучков лучи, далекие от оптической оси, пересекают ее не в фокусе. Формула тонкой линзы справедлива только для лучей, близких и параллельных к оптической оси (*параксиальный пучок*). Изображение удаленного точечного источника, создаваемое широким пучком лучей, преломленных линзой, оказывается размытым. *Хроматическая* абберация возникает вследствие того, что показатель преломления материала линзы зависит от длины волны света  $\lambda$ , то

есть  $n = n(\lambda)$  и  $n \sim \frac{1}{\lambda}$ . Это свойство прозрачных сред называется *дисперсией*. Фокусное расстояние линзы оказывается различным для света с разными длинами волн, что приводит к размытию изображения при использовании монохроматического света.

Поэтому в современных оптических приборах применяются не тонкие линзы, а сложные многолинзовые системы, в которых удается приближенно устранить различные абберации.

## § 52. Оптические приборы

**Фотоаппарат** представляет собой замкнутую светонепроницаемую камеру. Изображение фотографируемых предметов создается на фотопленке системой линз, которая называется **объективом** (рис.8.20). Специальный затвор позволяет открывать объектив на время экспозиции.

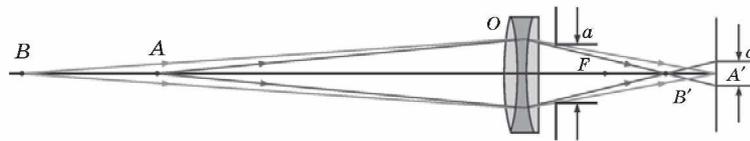


Рис. 8.20

Особенностью работы фотоаппарата является то, что на плоской фотопленке должны получаться достаточно резкими изображения предметов, находящихся на разных расстояниях.

В плоскости фотопленки получаются резкими только изображения предметов, находящихся на определенном расстоянии. Наводка на резкость достигается перемещением объектива относительно пленки. Изображения точек, не лежащих в плоскости резкой наводки, получаются нерезкими в виде кружков рассеяния. Размер  $d$  этих кружков может быть уменьшен путем диафрагмирования объектива, т. е. уменьшения относительного отверстия  $a/F$ . Это приводит к увеличению глубины резкости.

**Проекционный аппарат** (рис. 8.21) предназначен для получения крупномасштабных изображений.

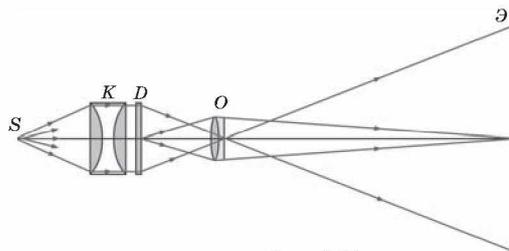


Рис. 8.21

Объектив  $O$  проектора фокусирует изображение плоского предмета (диапозитив  $D$ ) на удаленном экране  $\mathcal{E}$ .

Система линз  $K$ , называемая **конденсором**, предназначена для того, чтобы сконцентрировать свет источника  $S$  на диапозитиве, осветив его равномерно. На экране  $\mathcal{E}$  со-

здается действительное увеличенное перевернутое изображение. Увеличение проекционного аппарата можно менять, приближая или удаляя экран Э с одновременным изменением расстояния между диапозитивом  $D$  и объективом  $O$ .

### § 53. Глаз как оптический инструмент

Глаз человека представляет собой сложную оптическую систему, которая по своему действию аналогична оптической системе фотоаппарата. Схематическое устройство глаза представлено на рисунке 8.22.

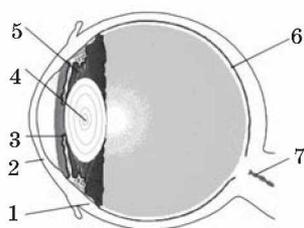


Рис. 8.22

Глаз имеет почти шарообразную форму и диаметр около 2,5 см. Снаружи он покрыт защитной оболочкой (1) белого цвета — *склерой*. Передняя прозрачная часть (2) склеры называется *роговицей*. На некотором расстоянии от нее расположена *радужная оболочка* (3), окрашенная пигментом. Отверстие в радужной оболочке представляет собой *зрачок*.

В зависимости от интенсивности падающего света зрачок рефлекторно изменяет свой диаметр приблизительно от 2 до 8 мм, т. е. действует подобно диафрагме фотоаппарата. Между роговицей и радужной оболочкой находится прозрачная жидкость. За зрачком находится *хрусталик* (4) — эластичное линзоподобное тело. Особая мышца (5) может изменять в некоторых пределах форму хрусталика, изменяя тем самым его оптическую силу. Остальная часть глаза заполнена стекловидным телом. Задняя часть глаза — глазное дно, оно покрыто *сетчатой оболочкой* (6), представляющей собой сложное разветвление *зрительного нерва* (7) с нервными окончаниями — *палочками* и *колбочками*, которые являются светочувствительными элементами.

Лучи света от предмета, преломляясь на границе воздух–роговица, проходят далее через хрусталик (линзу с изменяющейся оптической силой) и создают изображение на сетчатке.

Роговица, прозрачная жидкость, хрусталик и стекловидное тело образуют оптическую систему, оптический центр которой расположен на расстоянии около 5 мм от роговицы. При расслабленной глазной мышце оптическая сила

глаза приблизительно равна 59 дптр, при максимальном напряжении мышцы — 70 дптр.

Основная особенность глаза как оптического инструмента состоит в способности рефлекторно изменять оптическую силу глазной оптики в зависимости от положения предмета. Такое приспособление глаза к изменению положения наблюдаемого предмета называется *аккомодацией*.

Область аккомодации глаза можно определить положением двух точек: *дальняя точка аккомодации* определяется положением предмета, изображение которого получается на сетчатке при расслабленной глазной мышце. У нормального глаза дальняя точка аккомодации находится в бесконечности; *ближняя точка аккомодации* — расстояние от рассматриваемого предмета до глаза при максимальном напряжении глазной мышцы. Ближняя точка нормального глаза располагается на расстоянии 10–20 см от глаза. С возрастом это расстояние увеличивается.

*Расстояние наилучшего зрения* — это расстояние от предмета до глаза, при котором удобнее всего (без чрезмерного напряжения) рассматривать детали предмета (например, читать мелкий текст). Это расстояние у нормального глаза полагают равным 25 см.

При нарушении зрения изображения удаленных предметов в случае ненапряженного глаза могут оказаться либо перед сетчаткой (*близорукость*), либо за сетчаткой (*дальнозоркость*) (рис. 8.23).

Расстояние наилучшего зрения у близорукого глаза меньше, а у дальнозоркого больше, чем у нормального глаза.

Для исправления дефекта зрения служат очки. Для дальнозоркого глаза необходимы очки с положительной оптической силой (собирающие линзы), для близорукого — с отрицательной оптической силой (рассеивающие линзы).

Для наблюдения удаленных предметов оптическая сила линз должна быть такой, чтобы параллельные пучки фокусировались на сетчатке глаза. Глаз должен видеть через очки мнимое прямое изображение удаленного предмета, находящегося в дальней точке аккомодации данного глаза.

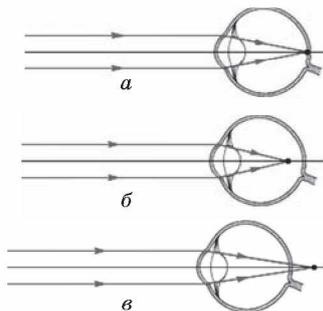


Рис. 8.23: а — нормальный глаз; б — близорукий глаз; в — дальнозоркий глаз.

Рисунок 8.24 поясняет подбор очков для чтения для дальновзоркого (*а*) и близоручкого (*б*) глаза. Предмет *A* располагается на расстоянии  $d = d_0 = 25$  см наилучшего зрения нормального глаза. Мнимое изображение *A'* располагается на расстоянии  $f$ , равном расстоянию наилучшего зрения данного глаза.

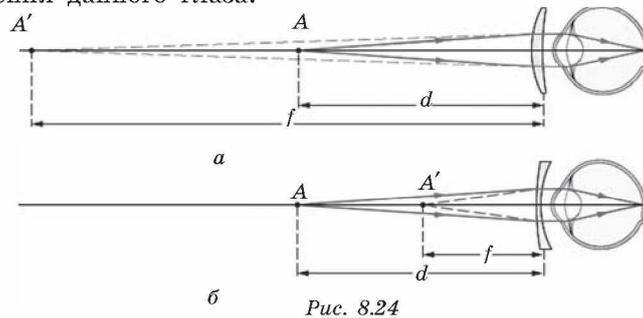


Рис. 8.24

Если, например, дальняя точка аккомодации близоручкого глаза находится на расстоянии 80 см, то, применяя формулу тонкой линзы, получим:  $d = \infty$ ,  $f = -0,8$  м, следовательно,  $D = \frac{1}{F} = -\frac{1}{0,8} = -1,25$  дптр.

У дальновзоркого глаза дальняя точка аккомодации мнимая, т. е. ненапряженный глаз фокусирует на сетчатке сходящийся пучок лучей. Потому при рассмотрении удаленных предметов очки для дальновзоркого глаза должны превращать параллельный пучок лучей в сходящийся, т. е. обладать положительной оптической силой.

## § 54. Оптические приборы для визуальных наблюдений

Для невооруженного глаза наименьший угол зрения приблизительно равен  $1'$ . Этот угол определяется мозаичным строением сетчатки, а также волновыми свойствами света.

Существует ряд приборов, предназначенных для увеличения угла зрения — лупа, микроскоп, зрительная труба. При визуальных наблюдениях глаз является неотъемлемой частью оптической системы, поэтому ход лучей в приборах, вооружающих глаз, зависит от аккомодации глаза.

Удобно полагать, что глаз наблюдателя *аккомодирован на бесконечность*. Это означает, что лучи от каждой точки предмета, пройдя через прибор, попадают в глаз в виде параллельного пучка. В этих условиях понятие линейного увеличения теряет смысл.

Отношение угла зрения  $\phi$  при наблюдении предмета через оптический прибор к углу зрения  $\psi$  при наблюдении невооруженным глазом называется **угловым увеличением**:

$$\gamma = \frac{\phi}{\psi}.$$

Если полагается, что глаз наблюдателя аккомодирован на расстояние наилучшего зрения нормального глаза  $d_0$ , то в этом случае ход лучей в приборах несколько усложняется, но угловое увеличение прибора приближенно остается таким же, как и при аккомодации на бесконечность.

**Лупа.** Простейшим прибором для визуальных наблюдений является лупа. **Лупой** называют собирающую линзу с малым фокусным расстоянием ( $F \approx 10$  см). Лупу располагают близко к глазу, а рассматриваемый предмет — в ее фокальной плоскости. Предмет виден через лупу под углом  $\phi = \frac{h}{F}$ , где  $h$  — размер предмета. При рассматривании этого же предмета невооруженным глазом его следует расположить на расстоянии  $d_0 = 25$  см наилучшего зрения нормального глаза. Предмет будет виден под углом  $\psi = \frac{h}{d_0}$ . Отсюда следует, что угловое увеличение лупы равно  $\gamma = \frac{\phi}{\psi} = \frac{d_0}{F}$ . Линза с фокусным расстоянием 10 см дает увеличение в 2,5 раза. Работу лупы иллюстрирует рис. 8.25.



Рис. 8.25. Действие лупы:  
 а — предмет рассматривается невооруженным глазом с расстояния наилучшего зрения  $d_0 = 25$  см;  
 б — предмет рассматривается через лупу с фокусным расстоянием  $F$ .

Полученная формула увеличения лупы  $\Gamma = \frac{d_0}{F}$  соответствует случаю, когда глаз адаптирован на бесконечность, а предмет находится в фокальной плоскости  $d = F$ .

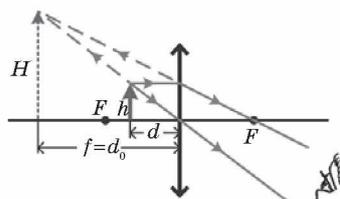


Рис. 8.26

Из формулы линзы  $\frac{1}{F} = \frac{1}{d} - \frac{1}{f}$  (знак минус ставится, так как изображение мнимое) найдем:  $\frac{1}{d} = \frac{1}{F} + \frac{1}{f} = \frac{f + F}{f \cdot F}$ .

Тогда увеличение лупы  $\Gamma = \frac{f}{d} = \frac{f + F}{F} = \frac{f}{F} + 1$ . Так как в данном случае  $f = d_0$ , то  $\Gamma = \frac{d_0}{F} + 1$ .

**Микроскоп.** Микроскоп применяют для получения больших увеличений при наблюдении мелких предметов.

Увеличенное изображение предмета в микроскопе получается с помощью оптической системы, состоящей из двух короткофокусных линз — объектива  $O_1$  и окуляра  $O_2$  (рис. 8.27). Объектив даст действительное перевернутое увеличенное изображение предмета.

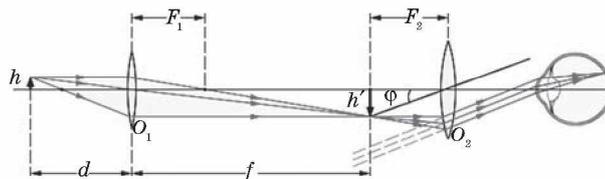


Рис. 8.27

Это промежуточное изображение рассматривается глазом через окуляр, действие которого аналогично действию лупы. Окуляр располагают так, чтобы промежуточное изображение находилось в его фокальной плоскости; в этом случае лучи от каждой точки предмета распространяются после окуляра параллельным пучком.

Мнимое изображение предмета, рассматриваемое через окуляр, всегда перевернуто. Если же это оказывается неудобным (например, при прочтении мелкого шрифта), можно перевернуть сам предмет перед объективом. Поэтому угловое увеличение микроскопа принято считать положительной величиной.

Как следует из рис. 8.25, угол зрения  $\varphi$  предмета, рассматриваемого через окуляр в приближении малых углов,

$$\varphi = \frac{h'}{F_2} = \frac{f \cdot h}{d \cdot F_2}.$$

Приближенно можно положить  $d \approx F_1$  и  $f \approx l$ , где  $l$  — расстояние между объективом и окуляром микроскопа («длина тубуса»). При рассматривании того же предмета невооруженным глазом

$$\psi = \frac{h}{d_0}.$$

В результате формула для углового увеличения  $\gamma$  микроскопа приобретает вид:

$$\gamma = \frac{\varphi}{\psi} = \frac{l \cdot d_0}{F_1 \cdot F_2}.$$

Хороший микроскоп может давать увеличение в несколько сотен раз. При больших увеличениях начинают проявляться дифракционные явления.

У реальных микроскопов объектив и окуляр представляют собой сложные оптические системы, в которых устранены различные aberrации.

**Телескоп.** Телескопы (зрительные трубы) предназначены для наблюдения удаленных объектов. Они состоят из двух линз — обращенной к предмету собирающей линзы с большим фокусным расстоянием (объектив) и линзы с малым фокусным расстоянием (окуляр), обращенной к наблюдателю. Зрительные трубы бывают двух типов:

*Зрительная труба Кеплера*, предназначенная для астрономических наблюдений. Она дает увеличенные перевернутые изображения удаленных предметов и поэтому неудобна для земных наблюдений.

*Зрительная труба Галилея*, предназначенная для земных наблюдений, дающая увеличенные прямые изображения. Окуляром в трубе Галилея служит рассеивающая линза.

На рисунке 8.28 изображен ход лучей в астрономическом телескопе. Предполагается, что глаз наблюдателя ак-

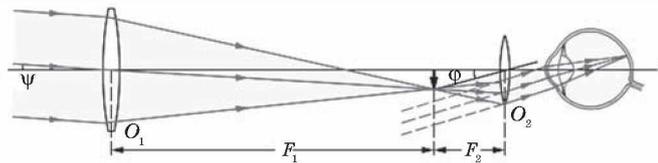


Рис. 8.28

комодирован на бесконечность, поэтому лучи от каждой точки удаленного предмета выходят из окуляра параллельным пучком. Такой ход лучей называется *телескопическим*.

В астрономической трубе телескопический ход лучей достигается при условии, что расстояние между объективом и окуляром равно сумме их фокусных расстояний  $l = F_1 + F_2$ .

Зрительную трубу (телескоп) принято характеризовать угловым увеличением  $\gamma$ . В отличие от микроскопа предметы, наблюдаемые в телескоп, всегда удалены от наблюдателя. Если удаленный предмет виден невооруженным глазом под углом  $\Psi$ , а при наблюдении через телескоп под углом  $\Phi$ , то угловым увеличением называют отношение  $\gamma = \frac{\Phi}{\Psi}$ .

Угловому увеличению  $\gamma$ , как и линейному увеличению  $G$ , можно приписать знаки плюс или минус в зависимости от того, является изображение прямым или перевернутым. Угловое увеличение астрономической трубы Кеплера отрицательно, а земной трубы Галилея положительно.

Угловое увеличение зрительных труб выражается через фокусные расстояния:  $\gamma = \frac{F_1}{F_2}$ .

В качестве объектива в больших астрономических телескопах применяются не линзы, а сферические зеркала. Такие телескопы называются *рефлекторами*. Хорошее зеркало проще изготовить, кроме того, зеркала, в отличие от линз, не обладают хроматической аберрацией.

Самый большой в мире телескоп — с диаметром зеркала 6 м. Большие астрономические телескопы предназначены не только для того, чтобы увеличивать угловые расстояния между наблюдаемыми космическими объектами, но и для увеличения потока световой энергии от слабосветящихся объектов.

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ К ГЛАВЕ VIII

1. Что называют лучом? Можно ли считать лучом очень узкий пучок света?
2. В чем состоит закон прямолинейного распространения света? Какие явления подтверждают справедливость данного закона?
3. Что называют падающим лучом? Углом падения? Отраженным лучом? Углом отражения? Ответы поясните рисунками.
4. Сформулируйте закон отражения света.
5. Какое отражение называют зеркальным? Сделав чертеж, объясните, как строится изображение предмета в плоском зеркале, выпуклом зеркале и вогнутом зеркале.
6. Что называют мнимым изображением?
7. На каком расстоянии от плоского зеркала находится мнимое изображение предмета и каков его размер?
8. Что называют преломлением света?
9. Сделав чертеж, покажите ход лучей при преломлении света на границе раздела двух прозрачных сред.
10. Сформулируйте и запишите закон преломления света.
11. Каков физический смысл относительного показателя преломления? абсолютного показателя преломления?
12. Сделайте чертеж и дайте объяснение, в каком случае угол преломления больше угла падения?
13. Сделав чертеж, объясните сущность явления полного внутреннего отражения света.
14. Что называют предельным углом полного внутреннего отражения света? Какая формула отражает смысл этого понятия?
15. Каково практическое применение полного внутреннего отражения света? Что такое световод?
16. Начертите и объясните ход лучей в треугольной призме.
17. Начертите и объясните ход лучей в плоскопараллельной пластине.
18. Что называют линзой?
19. По какому признаку можно узнать: собирающая эта линза или рассеивающая?
20. Какую линзу называют тонкой? Что такое оптический центр тонкой линзы?
21. Что называют главной оптической осью линзы? Побочной оптической осью линзы?
22. Что называют фокусом линзы? В каком случае фокус линзы действительный, а в каком — мнимый? Что называют фокусным расстоянием?
23. Начертите и объясните все случаи построения изображений в собирающей линзе.
24. Начертите и объясните все случаи построения изображений для рассеивающей линзы.
25. Напишите формулу тонкой собирающей линзы. Какой вид имеет эта формула для рассеивающей линзы?

26. Что называют линейным увеличением линзы? По какой формуле определяется линейное увеличение линзы?
27. Что называют оптической силой линзы? В каком случае оптическая сила линзы положительна, а в каком отрицательна? В каких единицах измеряется оптическая сила линзы?
28. Что называют аккомодацией глаза? Что такое ближайшая точка аккомодации? Дальняя точка аккомодации? Где находятся эти точки?
29. Что называют углом зрения? При каком минимальном угле зрения между рассматриваемыми деталями предмета глаз видит эти детали отдельно?
30. Что называют расстоянием наилучшего зрения? Чему равно это расстояние для нормального глаза?
31. Какой дефект зрения называют дальнозоркостью? Близорукостью? Каким путем исправляют эти дефекты? Ответы объясните схематически.
32. Что называют лупой? Для чего она предназначена? Начертите ход лучей в лупе. По какой формуле определяется линейное увеличение лупы?
33. Что называют микроскопом? Для чего он предназначен? Начертите ход лучей в микроскопе.
34. Что такое фотоаппарат? Из каких основных частей он состоит и каково их назначение? Начертите ход лучей в фотоаппарате.
35. Что такое проекционный аппарат? Какие виды проекционных аппаратов вы знаете? Для чего предназначен проекционный аппарат? Начертите ход лучей в проекционном аппарате.

### ТЕСТОВЫЕ ЗАДАНИЯ К ГЛАВЕ VIII

1. (96/7-51). Мальчик видит свое изображение в плоском зеркале. С какой скоростью (м/с) будет приближаться к зеркалу это изображение, если мальчик приближается к зеркалу со скоростью 0,6 м/с?  
А) 0,6.    В) 0,9.    С) 1.    D) 1,1.    E) 1,2.
2. (97/5-50). Как изменится расстояние между человеком и его изображением в вертикально расположенном плоском зеркале, если человек удалится от его плоскости на 3 м?  
А) не изменится.    С) увеличится на 3 м.    E) НПО.  
В) увеличится на 1,5 м.    D) увеличится на 6 м.
3. (97/6-47). На сколько градусов отклонится отраженный от зеркала луч, если зеркало повернуть на угол  $\alpha = 15^\circ$ ?  
А) 15.    В) 45.    С) 30.    D) 60.    E) 0.
4. (97/3-51). Как изменится расстояние между человеком и его изображением в плоском зеркале, расположенном вертикально, если он приблизится к плоскости зеркала на 2 м?

- А) не изменится.      С) уменьшится на 2 м.      Е) НПО.  
 В) уменьшится на 4 м.      D) уменьшится на 1 м.

5. (97/2-53). Два плоских зеркала расположены под углом  $60^\circ$  друг к другу. Каким должен быть угол падения луча на первое зеркало, чтобы, отразившись от него, он был направлен перпендикулярно поверхности второго зеркала?

- А)  $15^\circ$ .    В)  $30^\circ$ .    С)  $45^\circ$ .    D)  $60^\circ$ .    Е)  $90^\circ$ .

6. (03/7-60). Угловая высота Солнца над горизонтом составляет  $46^\circ$ . Под каким углом должны падать солнечные лучи на зеркало, чтобы отраженные лучи направились вертикально вверх?

- А)  $22^\circ$ .    В)  $26^\circ$ .    С)  $28^\circ$ .    D)  $60^\circ$ .    Е)  $68^\circ$ .

7. (96/5-49). Солнечный луч составляет с поверхностью земли угол  $40^\circ$ . Под каким углом к горизонту следует расположить плоское зеркало, чтобы направить луч внутрь узкой трубы, врытой в землю вертикально?

- А)  $60^\circ$ .    В)  $65^\circ$ .    С)  $70^\circ$ .    D)  $80^\circ$ .    Е)  $40^\circ$ .

8. (98/4-66). Отраженный от плоского зеркала луч вследствие поворота зеркала поворачивается на угол  $\alpha$ . На какой угол повернули зеркало?

- А)  $2\alpha$ .    В)  $\alpha$ .    С) 0.    D)  $0,25\alpha$ .    Е)  $0,5\alpha$ .

9. (98/5-49). Каким должен быть угол падения светового луча, чтобы отраженный луч составлял с падающим угол  $50^\circ$ ?

- А)  $20^\circ$ .    В)  $40^\circ$ .    С)  $25^\circ$ .    D)  $50^\circ$ .    Е)  $100^\circ$ .

10. (97/10-41). Чему равна длина световой волны (в метрах) в среде с показателем преломления 1,5, если частота колебаний  $10^{15}$  Гц? ( $c = 3 \cdot 10^8$  м/с)

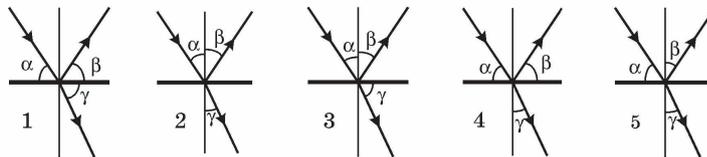
- А)  $2 \cdot 10^{-7}$ .    В)  $3 \cdot 10^{-7}$ .    С)  $0,5 \cdot 10^{-7}$ .    D)  $0,3 \cdot 10^{-7}$ .

Е) по приведенным данным невозможно определить длину волны.

11. (98/3-55). Как изменится угол между падающим на плоское зеркало и отраженным от него лучами света, если угол падения уменьшится на  $10^\circ$ ?

- А) уменьшится на  $5^\circ$ .      С) не изменится.      Е) НПО.  
 В) уменьшится на  $10^\circ$ .      D) уменьшится на  $20^\circ$ .

12. (97/8-78). На каком рисунке правильно показаны угол падения  $\alpha$ , угол отражения  $\beta$  и угол преломления  $\gamma$ ?



- А) 1.    В) 2.    С) 3.    D) 4.    Е) 5

13. Луч света проходит из стекла с показателем преломления 1,73 в воздух. Под каким углом должен падать луч на границу раздела, чтобы угол преломления был в 2 раза больше угла падения?

- А) 25°. В) 30°. С) 45°. D) 60°. E) НПО.

14. (97/9-45). На боковую поверхность равносторонней треугольной призмы под углом  $45^\circ$  падает луч света. На какой угол отклонится луч при выходе из призмы по отношению к направлению падающего луча? Считать, что  $n = \sqrt{2}$ ,  $\sin 45^\circ = \sqrt{2}/2$ .

- А) 15°. В) 30°. С) 45°. D) 60°. E) 90°.

15. (97/6-48). Если угол падения луча на поверхность раздела двух сред увеличивается, относительный показатель преломления этих сред ...

- А) при малых углах увеличивается, а при больших — уменьшается.  
 В) не изменяется.  
 С) уменьшается.  
 D) при малых углах уменьшается, а при больших — увеличивается.  
 E) увеличивается.

16. (97/3-49). Из какой формулы определяется предельный угол полного внутреннего отражения света, если свет переходит из среды с показателем преломления  $n_2$  в среду с показателем преломления  $n_1$ ?

- А)  $\sin \alpha = 1/n_1$ . С)  $\sin \alpha = n_2/n_1$ . E) НПО.  
 В)  $\sin \alpha = 1/n_2$ . D)  $\sin \alpha = n_1/n_2$ .

17. (97/11-42). Свет переходит из среды с показателем преломления  $n_1$  в среду с показателем преломления  $n_2$ . При выполнении какого условия может происходить полное внутреннее отражение?

- А)  $n_1 > n_2$ . С)  $n_1 = n_2$ . E) НПО.  
 В)  $n_1 < n_2$ . D) при любом условии.

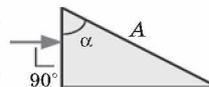
18. (97/4-53). Точечный источник света расположен в жидкости с показателем преломления 2,24 на глубине 1 м. Каков диаметр круга (в метрах), охватывающего вышедшие из жидкости лучи?

- А) 0. В)  $\infty$ . С) 0,5. D) 0,25. E) 1.

19. (97/2-52). Луч падает на призму, изготовленную из вещества, показатель преломления которого  $n = 2$ . Каким должно быть наименьшее значение угла  $\alpha$ , для того чтобы луч претерпел полное внутреннее отражение от грани А?

- А) 30°. В) 15°. С) 45°. D) 60°. E) 75°.

20. (97/4-52). При выполнении какого из нижеприведенных условий ход лучей будет таким, как это показано на рисунке?



3

- А)  $n_1 > n_2 > n_3$ .    С)  $n_2 > n_2 = n_3$ .    Е)  $n_2 > n_3 > n_1$ .  
 В)  $n_2 > n_1 > n_3$ .    D)  $n_3 > n_2 > n_1$ .

21. Для света какого цвета показатель преломления воды является наименьшим?

- А) фиолетового. В) зеленого. С) красного. D) синего. Е) желтого.

22. (01/1-15). Если световой луч проходит в вакууме за некоторое время расстояние 45 см, а в некоторой жидкости за то же время 30 см, то показатель преломления этой жидкости равен ...

- А) 1,2.    В) 1,3.    С) 1,4.    D) 1,5.    Е) 1,7.

23. (03/10-44). Каков показатель преломления второй среды относительно первой, если при переходе света из первой среды во вторую угол преломления равен  $30^\circ$ , а угол падения в 2 раза больше?

- А) 1.    В)  $\sqrt{2}$ .    С)  $\sqrt{3}$ .    D) 1,5.    Е) 3.

24. (03/5-30). Преломленный луч составляет с отраженным лучом угол  $90^\circ$ . Каков относительный показатель преломления сред, если синус угла падения равен 0,8?

- А) 1.    В) 1,25.    С) 1,33.    D) 1,5.    Е) 1,8.

25. (03/4-50). При переходе света из одной среды в другую его скорость увеличилась в 2 раза. Определите предельный угол полного отражения в этом случае.

- А)  $90^\circ$ .    В)  $60^\circ$ .    С)  $45^\circ$ .    D)  $30^\circ$ .    Е)  $15^\circ$ .

26. (03/6-25). Предельный угол полного отражения на границе стекло-воздух равен  $37^\circ$ . Определите скорость света в стекле (м/с).  $\sin 37^\circ = 0,60$ .

- А)  $1,8 \cdot 10^8$ .    В)  $3 \cdot 10^7$ .    С)  $1,2 \cdot 10^8$ .    D)  $1,2 \cdot 10^7$ .    Е)  $6 \cdot 10^7$ .

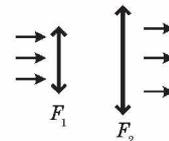
27. (01/2-42). Угол полного внутреннего отражения при переходе света из некоторой прозрачной твердой среды в воздух равен  $\alpha$ . Скорость света в этой среде определится выражением ...

- А)  $c \cdot \operatorname{tg} \alpha$ .    В)  $c \cdot \sin \alpha$ .    С)  $c(1 - \sin \alpha)$ .    D)  $c/\sin \alpha$ .    Е)  $c/\operatorname{tg} \alpha$ .

28. (01/2-45). Диоптрия — единица измерения оптической силы линзы в СИ, выраженная через другие единицы системы, имеет вид ...

- А)  $\text{см}^{-1}$ .    В) м.    С)  $\text{м}^{-1}$ .    D) Н.    Е)  $\text{Н}^{-1}$ .

29. (96/15-50). Лучи света падают параллельно главной оптической оси на линзу с фокусным расстоянием  $F_1$  и, пройдя через линзу с фокусным расстоянием  $F_2$ , продолжают распространяться параллельно главной оптической оси. Каково расстояние между линзами?



- А)  $F_2 - F_1$ .    В)  $F_1 F_2 / (F_1 + F_2)$ .    С) 0.    D)  $F_1 + F_2$ .    Е)  $(F_1 + F_2) / (F_1 F_2)$ .

30. (96/5-51). На каком расстоянии от линзы с фокусным расстоянием  $F$  помещен предмет, если его изображение на экране в 3 раза меньше предмета?

- А)  $4/3F$ .    В)  $1,5F$ .    С)  $2F$ .    D)  $4F$ .    Е)  $6F$ .

**31.** (96/3-45). В центре выпуклой линзы прикреплена монетка, диаметр которой в два раза меньше диаметра линзы. Как будет влиять это обстоятельство на изображение?

- А) изображение исчезнет.
- В) уменьшится яркость всего изображения.
- С) уменьшится яркость центральной части изображения.
- Д) в центре изображения появится дифракционная картина.
- Е) в центре изображения появится черное пятно.

**32.** (01/3-7). Кварцевую собирающую линзу ( $n = 1,7$ ) с фокусным расстоянием  $F_1$  опустили в воду ( $n_2 = 1,3$ ), а затем в анилин ( $n_3 = 1,59$ ) и измерили фокусные расстояния  $F_2$  и  $F_3$ . Укажите правильное соотношение между ними.

- А)  $F_1 = F_2 = F_3$ .
- В)  $F_3 < F_1 < F_2$ .
- С)  $F_1 > F_2 > F_3$ .
- Д)  $F_2 < F_1 < F_3$ .
- Е)  $F_1 < F_2 < F_3$ .

**33.** (96/3-103). Предмет расположен на расстоянии  $2F$  от рассеивающей линзы. На каком расстоянии от линзы получится изображение предмета?

- А)  $0,5F$ .
- В)  $F$ .
- С)  $F/3$ .
- Д)  $4F/3$ .
- Е)  $2F/3$ .

**34.** (96/7-110). Линза дает пятикратно увеличенное изображение предмета. Какова оптическая сила этой линзы и на каком расстоянии от предмета она расположена, если расстояние от предмета до экрана равно 3 м?

- А) 2,6 дптр, 2 м.
- В) 3 дптр, 1 м.
- С) 2,4 дптр, 0,5 м.
- Д) 2 дптр, 0,5 м.
- Е) 1 дптр, 1,5 м.

**35.** (97/11-40). Светящаяся точка находится в фокусе рассеивающей линзы с фокусным расстоянием 10 см. На каком расстоянии от линзы находится ее изображение?

- А) 10 см.
- В) 20 см.
- С) 5 см.
- Д) в бесконечности.
- Е) изображение не получится.

**36.** (98/5-51). Определите оптическую силу лупы, дающей четырехкратное увеличение (в диоптриях). Расстояние наилучшего зрения 25 см.

- А) 15.
- В) 16.
- С) 20.
- Д) 8.
- Е) 10.

**37.** (98/6-64). На экране получено двукратно увеличенное изображение предмета, расположенного на расстоянии 1 м от собирающей линзы. Найдите оптическую силу линзы (в диоптриях).

- А) 4.
- В) 3.
- С) 2.
- Д) 0,5.
- Е) 1,5.

**38.** (99/7-55). Изображение предмета, расположенного на расстоянии 1 м от рассеивающей линзы, находится в 20 см от линзы. Какова оптическая сила линзы (в диоптриях)?

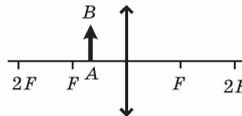
- А) -6.
- В) 5.
- С) 6.
- Д) -4.
- Е) -3.

**39.** (03/5-66). В линзе образовалось мнимое, увеличенное в 2 раза изображение предмета, расположенного на расстоянии 12,5 см от линзы. Определите оптическую силу линзы (дптр).

- А) 2.
- В) -2.
- С) 4.
- Д) -4.
- Е) 6.

40. (98/1-53). На рисунке показано положение линзы, ее главной оптической оси, фокусов и предмета  $AB$ . Каким будет изображение предмета?

- А) мнимое, увеличенное и прямое.
- В) изображения не будет.
- С) мнимое, уменьшенное и обратное.
- Д) действительное, увеличенное и прямое.
- Е) действительное, уменьшенное и обратное.



41. (98/9-48). Для получения мнимого изображения предмета с помощью собирающей линзы его нужно поместить ...

- А) в фокусе линзы.
- В) между линзой и ее фокусом.
- С) между фокусом и двойным фокусным расстоянием.
- Д) за двойным фокусным расстоянием.
- Е) НПО.

42. (98/11-39). Как изменится изображение предмета, если половину линзы закрыть картоном?

- А) размер изображения уменьшится в 2 раза.
- В) исчезнет половина изображения.
- С) размер изображения не изменится, яркость уменьшится в 2 раза.
- Д) изображение исчезнет.
- Е) изменится расстояние от линзы до изображения.

43. (03/4-49). На каком расстоянии (см) от рассеивающей линзы с фокусным расстоянием 24 см возникает уменьшенное мнимое изображение предмета, удаленного от линзы на 12 см?

- А) 4.    В) 8.    С) 12.    Д) 18.    Е) 24.

44. (03/1-13). Для того чтобы мнимое изображение предмета было вдвое меньше самого предмета, на каком расстоянии  $d$  от рассеивающей линзы нужно поместить предмет ( $F$  — фокусное расстояние линзы)?

- А)  $d < F$ .    В)  $F < d < 2F$ .    С)  $d = F$ .    Д)  $d = 2F$ .    Е)  $d > 2F$ .

45. (03/4-51). С помощью линзы образовано мнимое, уменьшенное в 2 раза изображение предмета, расположенного на расстоянии 10 см от линзы. Определите оптическую силу линзы (дптр).

- А) 5.    В) -5.    С) 10.    Д) -10.    Е) 30.

46. (03/9-14). Выразите произведение  $ab$  через фокусное расстояние  $F$  тонкой линзы, где  $a$  — расстояние от фокуса тонкой линзы до предмета и  $b$  — расстояние от другого фокуса до действительного изображения предмета.

- А)  $2F^2/3$ .    В)  $2F^2$ .    С)  $F^3/(F+1)$ .    Д)  $F^2/2$ .    Е)  $F^2$ .

47. (03/11-34). Определите оптическую силу (дптр) системы из двух соосных линз. Фокусное расстояние первой линзы  $F_1 = -0,125$  м. Оптическая сила второй линзы  $D_2 = 8$  дптр.

- А) 0.    В) 2.    С) 4.    Д) 8.    Е) -2.



48. (03/5-49). Человек носит очки с оптической силой  $-4$  дптр. Каково расстояние наилучшего зрения (см) у этого человека (без очков)?

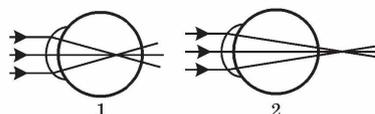
- А) 12,5.    В) 14.    С) 15,5.    D) 16.    E) 10,5.

49. (03/5-55). Каким должно быть фокусное расстояние объектива (м), чтобы с самолета, летящего на высоте 12 км, можно было сфотографировать местность в масштабе 1:16000?

- А) 0,4.    В) 0,45.    С) 0,6.    D) 0,75.    E) 0,9.

50. (98/2-51). На рисунке приведены схемы хода лучей в глазе при близорукости и дальнозоркости. Какая из этих схем соответствует случаю дальнозоркости и какие нужны линзы очков в этом случае?

- А) 1, рассеивающие.  
 В) 2, рассеивающие.  
 С) 2, собирающие.  
 D) 1, собирающие.



- E) ни одна из схем не соответствует.

51. (03/9-15). При фотографировании вагона высотой 3 м его изображение на пленке получилось высотой 12 мм. Фокусное расстояние объектива фотоаппарата равно 20 см. С какого расстояния произведена фотосъемка (м)?

- А) 60.    В) 50.    С) 40.    D) 30.    E) 20.

52. (98/11-41). Человек, сфотографированный с расстояния 5 м, получился на пленке ростом 17 мм. Оцените рост человека (в метрах), если фокусное расстояние объектива равно 50 мм?

- А) 1,8.    В) 1,6.    С) 1,65.    D) 1,75.    E) 1,7.

53. (03/7-62). Ахмед читает книгу без очков с расстояния 16 см. Какова оптическая сила его очков (дптр)?

- А) 2.    В)  $-2$ .    С)  $-2,25$ .    D) 2,25.    E) 4.

54. (02/11-42). Собирающая линза дает уменьшенное в 8 раз изображение предмета. Если уменьшить расстояние от линзы до предмета на 10 см, то изображение будет уменьшенным в 4 раза. Каково фокусное расстояние линзы (в см)?

- А) 8.    В) 5.    С) 2,5.    D) 2.    E) 1,25.

55. (02/11-39). Точечный источник света находится в фокусе рассеивающей линзы с фокусным расстоянием  $F$ . На каком расстоянии от линзы получается изображение предмета?

- А)  $F/4$ .    В)  $F/2$ .    С)  $F$ .    D)  $1,5F$ .    E)  $2F$ .

56. (03/1-83). Уменьшенное мнимое изображение предмета образовалось на расстоянии 15 см от линзы с фокусным расстоянием  $-20$  см. На каком расстоянии от линзы расположен предмет (в см)?

- А) 8,6.    В) 17,2.    С) 30.    D) 60.    E) 75.

## Глава IX. ВОЛНОВАЯ ОПТИКА

### § 55. Развитие представлений о природе света

Первые представления о природе света возникли у древних греков и египтян. По мере изобретения и совершенствования различных оптических приборов (параболических зеркал, микроскопа, зрительной трубы) эти представления развивались и трансформировались. В конце XVII века возникли две теории света: *корпускулярная* (И. Ньютон) и *волновая* (Р. Гук и Х. Гюйгенс).

Согласно корпускулярной теории, свет представляет собой поток частиц (корпускул), испускаемых светящимися телами. Ньютон считал, что движение световых корпускул подчиняется законам механики. Отражение света понималось аналогично отражению упругого шарика от плоскости. Преломление света объяснялось изменением скорости корпускул при переходе из одной среды в другую.

Волновая теория, в отличие от корпускулярной, рассматривала свет как волновой процесс, подобный механическим волнам. В основу волновой теории был положен *принцип Гюйгенса*, согласно которому каждая точка, до которой доходит волна, становится центром вторичных волн, а огибающая этих волн дает положение *волнового фронта* в следующий момент времени. С помощью принципа Гюйгенса были объяснены законы отражения и преломления.

Построения Гюйгенса для определения направления распространения волны, преломленной на границе двух прозрачных сред, приведены на рисунке 9.1.

Для случая преломления света на границе вакуум–среда волновая теория приводит к следующему выводу:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \gamma} = \frac{c}{v} = n.$$

Обе теории объясняли прямолинейное распространение света, законы отражения и преломления. Весь XVIII век стал веком борьбы этих теорий. В начале XIX столетия корпускулярная теория была отвергнута и восторжествовала волновая

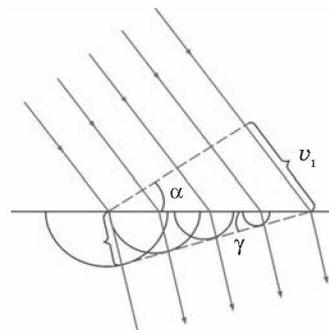


Рис. 9.1

теория. Заслуга в этом принадлежит английскому физику Т. Юнгу и французскому физику О. Френелю, исследовавшим явления интерференции и дифракции. Объяснение этих явлений могло быть дано только на основе волновой теории. Однако к середине XIX века вопрос о *природе световых волн* оставался нерешенным.

В 60-е годы XIX века Максвеллом были установлены общие законы электромагнитного поля, которые привели к заключению, что свет — это *электромагнитные волны*. Важным подтверждением этого послужило совпадение скорости света в вакууме с электродинамической постоянной:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}}.$$

Важнейшую роль в выяснении природы света сыграло опытное определение его скорости. Начиная с конца XVII века предпринимались неоднократные попытки измерения скорости света различными методами (астрономический метод О. Ремера, метод А. Физо, метод А. Майкельсона). Современная лазерная техника позволяет измерять скорость света с очень высокой точностью на основе независимых измерений длины волны  $\lambda$  и частоты света  $\nu$  ( $c = \lambda \cdot \nu$ ). Таким путем было найдено значение  $c = 299792458 \pm 1,2$  м/с, превосходящее по точности все ранее полученные значения более чем на два порядка.

В оптике, как разделе физике, под светом понимают не только *видимый свет*, но и примыкающие к нему широкие диапазоны спектра электромагнитного излучения — *инфракрасный (ИК)* и *ультрафиолетовый (УФ)*.

По своим физическим свойствам свет принципиально неотличим от электромагнитного излучения других диапазонов — различные участки спектра отличаются друг от друга только длиной волны  $\lambda$  и частотой  $\nu$ . Видимый свет занимает диапазон приблизительно от 400 нм до 780 нм или от 0,40 мкм до 0,78 мкм.

Электромагнитная теория света позволила объяснить многие оптические явления, такие как интерференция, дифракция, поляризация и т. д. Однако эта теория не завершила понимания природы света. Уже в начале XX века выяснилось, что эта теория недостаточна для истолкования явлений атомного масштаба, возникающих при взаимодействии света с веществом. Для объяснения таких явлений, как излучение черного тела, фотоэффект, эффект Комптона и др. потребовалось введение *квантовых представлений*. Наука вновь вернулась к идее корпускул — све-

товых квантов. Тот факт, что свет в одних опытах обнаруживает волновые свойства, а в других — корпускулярные, означает, что свет имеет сложную двойственную природу, которую принято характеризовать термином *корпускулярно-волновой дуализм*.

## § 56. Определение скорости света

**1. Метод Ремера.** Впервые скорость света измерил датский астроном Ремер в 1676 году, наблюдая затмения спутника Юпитера Ио. Спутник Ио находился в тени Юпитера 42 часа 28 минут (Земля в положении 1) (рис. 9.2).

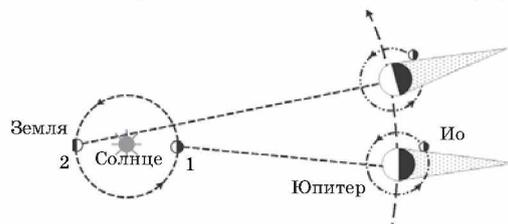


Рис. 9.2

Через 6 месяцев спутник Ио находился в тени Юпитера на 22 минуты дольше (Земля в положении 2). Опоздание вызвано тем, что свет тратит 22 минуты на прохождение расстояния, равного диаметру земной орбиты.

Ремер получил скорость света  $c = 215000$  км/сек.

**2. Метод Физо (1849 г.).** Колесо, имеющее  $N = 720$  зубцов вращалось с частотой  $\omega$ . При постепенном изменении скорости вращения  $\omega$  наблюдается серия последовательных исчезновений и возникновений света (рис. 9.3).

Если путь света перекрывает зубец колеса, то свет исчезает. Для первого исчезновения света скорость света рассчитывается по формуле:

$$c = \frac{2NL\omega}{\pi}$$

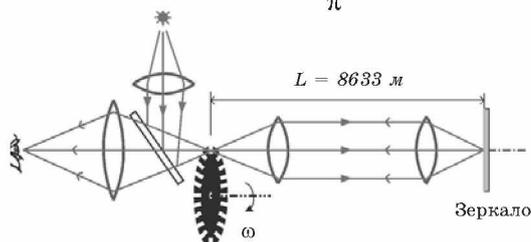


Рис. 9.3

Наблюдатель будет видеть источник света, если за время движения света к удаленному зеркалу и обратно колесо повернется на кратное число зубцов, то есть прорезью.

Для первого появления света скорость света рассчитывается по формуле:  $c = \frac{NL\omega}{\pi}$ .

Для  $n$ -го появления света скорость света рассчитывается по формуле:  $c = \frac{NL\omega}{n\pi}$ .

Физо получил скорость света  $c = 313000$  км/сек.

**3. Метод Майкельсона (1929 г.).** Наблюдатель будет видеть источник света, если за время движения света к удаленному зеркалу и обратно восьмигранная призма повернется следующей гранью или на кратное число  $n$  граней призмы (рис. 9.4).

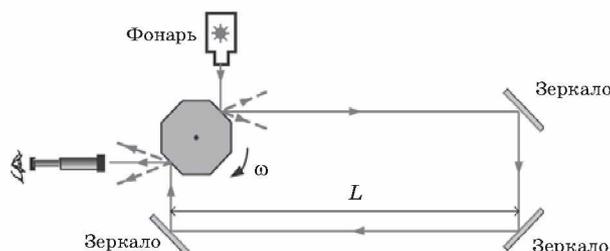


Рис. 9.4

Скорость света можно вычислить по формуле:  $c = \frac{8L\omega}{\pi n}$ .

Майкельсон получил скорость света  $c = (299796 \pm 4)$  км/сек.

По современным данным скорость света в вакууме равна:  $c = 299792458 \pm 1,2$  м/с.

## § 57. Интерференция световых волн

**Интерференцией света** называется явление пространственного перераспределения световой энергии при наложении двух (или нескольких) световых волн.

В результате интерференции наблюдается усиление или ослабление интенсивности света. Интенсивность света в области перекрытия пучков имеет характер чередующихся светлых и темных полос, причем в максимумах интен-

сивность больше, а в минимумах — меньше суммы интенсивностей пучков. При использовании белого света *интерференционные полосы* оказываются окрашенными в различные цвета спектра. С интерференционными явлениями мы сталкиваемся довольно часто: цвета масляных пятен на асфальте, радужный перелив мыльных пузырей, окраска замерзающих оконных стекол, причудливые цветные рисунки на крыльях некоторых насекомых — все это проявление интерференции света.

**Опыт Юнга.** Исторически первым интерференционным опытом, получившим объяснение на основе волновой теории света, явился *опыт Юнга* (1802 г.). В опыте Юнга свет от источника, в качестве которого служила узкая щель  $S$ , падал на экран с двумя близко расположенными щелями  $S_1$  и  $S_2$  (рис. 9.5).

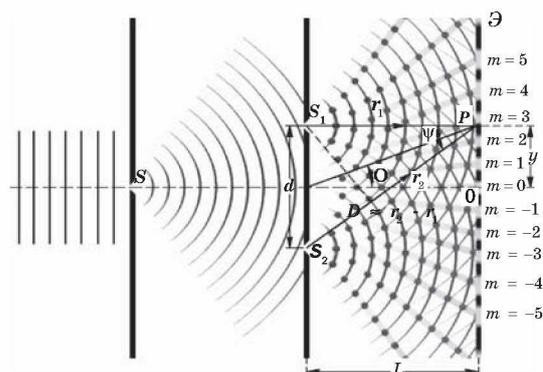


Рис. 9.5

Проходя через каждую из щелей, световой пучок расширялся вследствие дифракции, поэтому на белом экране  $\Theta$  световые пучки, прошедшие через щели  $S_1$  и  $S_2$ , перекрывались. В области перекрытия световых пучков наблюдалась интерференционная картина в виде чередующихся светлых и темных полос.

Юнг понял, что нельзя наблюдать интерференцию при сложении волн от двух независимых источников. Поэтому в его опыте щели  $S_1$  и  $S_2$  освещались светом одного источника  $S$ . При симметричном расположении щелей вторичные волны, испускаемые источниками  $S_1$  и  $S_2$ , находятся в фазе, но эти волны проходят до точки наблюдения  $P$  разные расстояния  $r_1$  и  $r_2$ . Следовательно, фазы колебаний,

создаваемых волнами от источников  $S_1$  и  $S_2$  в точке  $P$ , вообще говоря, различны. Таким образом, задача об интерференции волн сводится к задаче о сложении колебаний одной и той же частоты, но с разными фазами. Утверждение о том, что волны от источников  $S_1$  и  $S_2$  распространяются независимо друг от друга, а в точке наблюдения они просто складываются, является опытным фактом и носит название *принципа суперпозиции*.

*Монохроматическая волна*, распространяющаяся в направлении радиус-вектора  $\vec{r}$ , записывается в виде:

$$E = A \cos(\omega t - kr),$$

где  $E$  — модуль вектора напряженности электрического поля волны,  $A$  — амплитуда волны,  $k = 2\pi/\lambda$  — волновое число,  $\lambda$  — длина волны. При сложении двух волн в точке  $P$  результирующее колебание также происходит на частоте  $\omega$  и имеет некоторую амплитуду  $A$  и фазу  $\varphi$ :

$$E = A_1 \cos(\omega t - kr_1) + A_2 \cos(\omega t - kr_2) = A \cos(\omega t - \varphi).$$

Не существует приборов, которые способны были бы следить за быстрыми изменениями поля световой волны в оптическом диапазоне; наблюдаемой величиной является поток энергии, который прямо пропорционален квадрату амплитуды электрического поля волны. Физическую величину, равную квадрату амплитуды электрического поля волны, принято называть *интенсивностью*:  $I = A^2$ .

Интенсивность результирующего колебания в точке  $P$ :

$$I = A^2 = A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2 \cos k\Delta = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1I_2} \cos k\Delta,$$

где  $\Delta = r_2 - r_1$  — разность хода.

**Интерференционный максимум** (светлая полоса) достигается в тех точках пространства, в которых

$$\Delta = m\lambda \quad (m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots).$$

При этом  $I_{\max} = (A_1 + A_2)^2 > I_1 + I_2$ .

**Интерференционный минимум** (темная полоса) достигается при  $\Delta = m\lambda + \lambda/2$ .

Минимальное значение интенсивности:

$$I_{\min} = (A_1 - A_2)^2 < I_1 + I_2.$$

На рисунке 9.6 показано распределение интенсивности света в интерференционной картине в зависимости от разности хода  $\Delta$ .

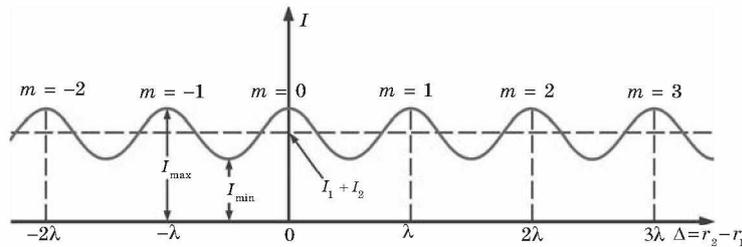


Рис. 9.6

Целое число  $m$  — порядок интерференционного максимума. В частности, если  $I_1 = I_2 = I_0$ , т. е. интенсивности обеих интерферирующих волн одинаковы, в этом случае  $I_{\max} = 4I_0$ ,  $I_{\min} = 0$ .

**Проблема когерентности волн.** Интерференцию света в действительности наблюдать не просто. Если в комнате горят две одинаковые лампочки, то в любой точке складываются интенсивности света и никакой интерференции не наблюдается.

Реальные световые волны не являются монохроматическими. Излучение света имеет статистический характер, так как атомы светового источника излучают независимо друг от друга в случайные моменты времени, и излучение каждого атома длится короткое время ( $\tau \leq 10^{-8}$  с). Результирующее излучение источника в каждый момент времени состоит из вкладов огромного числа атомов. Через время порядка  $\tau$  вся совокупность излучающих атомов обновляется. Поэтому суммарное излучение будет иметь другую амплитуду и другую фазу. Фаза волны, излучаемой реальным источником света, остается приблизительно постоянной только на интервалах времени порядка  $\tau$ . Отдельные «обрывки» излучения длительности  $\tau$  называются *цугами*. Цуги имеют пространственную длину, равную  $c\tau$ , где  $c$  — скорость света. Колебания в разных цугах не согласованы между собой. Таким образом, реальная световая волна представляет собой последовательность волновых цугов с *беспорядочно меняющейся фазой*. Колебания в разных цугах *некогерентны*. Интервал времени  $\tau$ , в течение которого фаза колебаний остается приблизительно постоянной, называют *временем когерентности*.

Интерференция может возникнуть только при сложении когерентных колебаний, т. е. колебаний, относящихся к одному и тому же цугу.

При сложении некогерентных колебаний разность фаз оказывается случайной функцией времени. Регистрирую-

щее устройство (глаз, фотопластинка, фотоэлемент) зафиксирует в точке наблюдения усредненное значение интенсивности, равное сумме интенсивностей  $I_1 + I_2$  обеих колебаний. В этом случае выполняется закон сложения интенсивностей.

Таким образом, интерференция может возникнуть только при сложении когерентных колебаний. Волны от двух независимых источников некогерентны и не могут дать интерференции. Т. Юнг интуитивно угадал, что для получения интерференции света нужно волну от источника разделить на две когерентные волны и затем наблюдать на экране результат их сложения. Так делается во всех интерференционных схемах. Однако интерференционная картина исчезает даже в том случае, если разность хода  $\Delta$  превысит длину когерентности  $\sigma$ .

**Расчет интерференционной картины от двух источников.** Щели  $S_1$  и  $S_2$  находятся на расстоянии  $d$  друг от друга и являются когерентными источниками света (рис. 20.7).

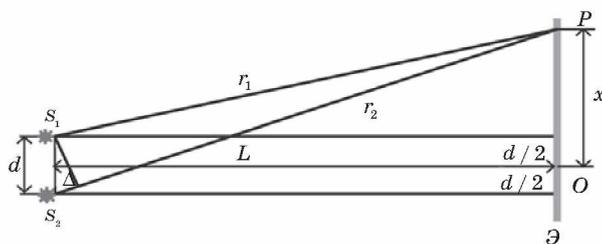


Рис. 9.7

Интерференция наблюдается в произвольной точке  $P$  экрана  $\mathcal{E}$ , параллельного обеим щелям и расположенного от них на расстоянии  $L$ , причем  $L \gg d$ .  $\Delta = r_2 - r_1$  — разность хода.

Из рисунка 9.7 следует, что:  $r_2^2 = L^2 + \left(x + \frac{d}{2}\right)^2$ ;

$$r_1^2 = L^2 + \left(x - \frac{d}{2}\right)^2 \Rightarrow r_2^2 - r_1^2 = 2xd, \text{ или } \Delta = r_2 - r_1 = \frac{2xd}{r_1 + r_2}.$$

Из условия  $L \gg d$  следует, что  $r_1 + r_2 \approx 2L$ , поэтому  $\Delta = \frac{xd}{L}$ .

Подставив найденное значение  $\Delta$  в условия максимумов и минимумов интерференции, получим, что максимумы интенсивности будут наблюдаться при  $x_{\max} = m \frac{L}{d} \lambda_0$

( $m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ ), а минимумы — при  $x_{\min} = \left(m + \frac{1}{2}\right) \frac{L}{d} \lambda_0$   
 ( $m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ ).

Расстояние между двумя соседними максимумами (или минимумами), называемое **шириной интерференционной полосы**, равно:  $\Delta x = \frac{L}{d} \lambda_0$ .

$\Delta x$  не зависит от порядка интерференции (величины  $m$ ) и является постоянной для данных  $L$ ,  $d$  и  $\lambda_0$ .  $\Delta x$  обратно пропорционально  $d$ , следовательно, при большом расстоянии между источниками, например при  $d \approx L$ , отдельные полосы становятся неразличимыми.

Описанная картина справедлива лишь при освещении монохроматическим светом ( $\lambda_0 = \text{const}$ ). Если использовать белый свет, представляющий собой непрерывный набор длин волн от 0,39 мкм (фиолетовая граница спектра) до 0,75 мкм (красная граница спектра), то интерференционные максимумы для каждой длины волны будут смещены друг относительно друга и иметь вид радужных полос. Только для  $m = 0$  максимумы всех длин волн совпадают и в середине экрана будет наблюдаться белая полоса, по обе стороны которой симметрично расположатся спектрально окрашенные полосы максимумов первого, второго порядков и т. д. (ближе к белой полосе будут находиться зоны фиолетового цвета, дальше — зоны красного цвета).

**Цвета тонких пленок** (рис. 9.8). На тонкую плоскопараллельную пластинку толщиной  $d$  падает пучок параллельных монохроматических лучей, перпендикулярных к поверхности пластинки (рис. 9.8, а). Световые лучи частично отражаются от поверхности  $AB$  и частично проникают внутрь пластинки. У поверхности  $CD$  этот процесс повторяется. Лучи, отраженные от поверхности  $AB$  и  $CD$ , интерферируют, так как являются когерентными.

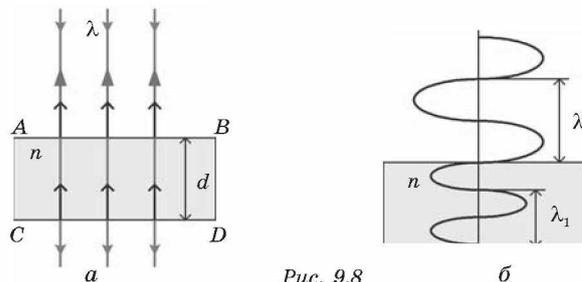


Рис. 9.8

Условия интерференции для лучей на всей поверхности пластинки одинаковы. Поэтому если интерферирующие лучи накладываются с противоположными фазами, то вся пластинка будет казаться темной, если же лучи встречаются с одинаковыми фазами, то вся пластинка будет окрашена цветом, соответствующим длине волны монохроматических лучей  $\lambda$ .

Рассмотрим случай, когда интерференция наблюдается в отраженном свете, т. е. наблюдатель смотрит на пластинку сверху (рис. 9.8, б). Геометрическая разность хода интерферирующих лучей будет равна  $2d$ , так как луч, отраженный от нижней поверхности пластинки, проходит лишний путь, равный двойной толщине пластинки, поскольку движется сначала вниз, а потом вверх. Световые лучи имеют длину волны  $\lambda$  в воздухе, а в пластинке, вследствие изменения скорости распространения света, пропорционально ей уменьшается и длина волны  $\lambda_1$ , т. е.

$$n = \frac{c}{v} = \frac{\lambda v}{\lambda_1 v} = \frac{\lambda}{\lambda_1} \Rightarrow \lambda_1 = \frac{\lambda}{n}.$$

Следовательно, разность хода интерферирующих лучей будет составлять не  $2d$ , а  $2dn$ . При отражении лучей от среды оптически более плотной происходит потеря полу волны, а при отражении от границы среды оптически менее плотной потери полу волны не происходит. В рассматриваемом случае потеря полу волны происходит при отражении от верхней поверхности. Итак, оптическая разность хода  $\Delta$  равна:  $\Delta = 2dn - \frac{\lambda}{2}$ .

**Максимальное усиление** получается, когда в оптической разности хода укладывается четное число полу волн:

$$\Delta = 2dn - \frac{\lambda}{2} = 2k \frac{\lambda}{2}, \text{ или } 2dn = (2k - 1) \frac{\lambda}{2} \quad (k = 1, 2, 3, \dots). (*)$$

Условие **максимального ослабления** света получается, когда в оптической разности хода укладывается нечетное число полу волн:

$$\Delta = 2dn - \frac{\lambda}{2} = (2k - 1) \frac{\lambda}{2}, \text{ или } 2dn = 2k \frac{\lambda}{2} = k\lambda \quad (k = 1, 2, 3, \dots). (**)$$

Если смотреть на пластинку в проходящем свете, т. е. снизу, то эти условия меняются местами: соотношение (\*\*) будет выражать условие максимального усиления, а соотношение (\*) – максимального ослабления света.

При падении монохроматических лучей на поверхность пластинки под углом  $\alpha$  (рис. 9.9, а) разность хода между интерферирующими лучами изменится. Для лучей 1 и 2 (рис. 9.9, б) она будет равна  $(AB + BC)n - (\lambda/2)$ .

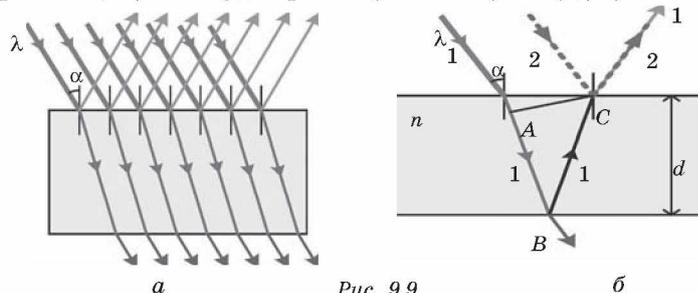


Рис. 9.9

$AC$  есть положение фронта волны в момент отражения луча 2 от точки  $C$  ( $AC \perp AB$ ). При увеличении угла падения  $\alpha$  оптическая разность хода уменьшается. Это означает, что при повороте пластинки относительно лучей она поочередно будет казаться то темной, то светлой.

Если пластинку освещать белым светом, то при интерференции лучей с одной длиной волны будет получаться усиление, а для других длин волн получится ослабление. Поэтому пластинка будет казаться наблюдателю окрашенной в тот цвет, который близок к цвету лучей, максимально усиливающих друг друга. При повороте пластинки относительно лучей ее окраска будет изменяться.

**Кольца Ньютона.** Первый эксперимент по наблюдению интерференции света в лабораторных условиях принадлежит И. Ньютону.

На плоскопараллельную пластинку положена выпуклой стороной плосковыпуклая линза с радиусом кривизны  $R$  (рис. 9.10).

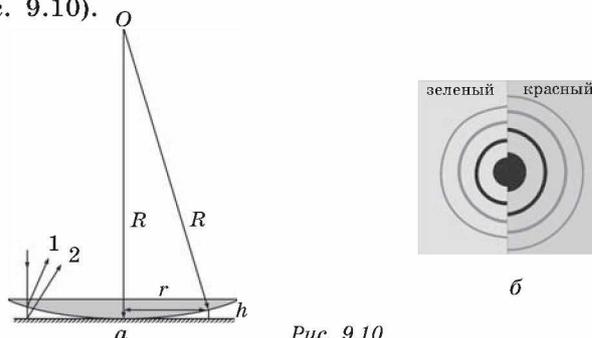


Рис. 9.10



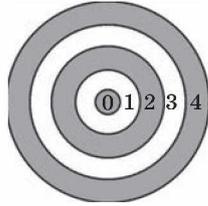


Рис. 9.12. Номера колец Ньютона в отраженном свете

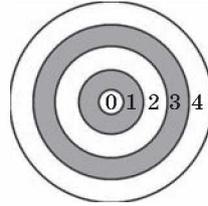


Рис. 9.13. Номера колец Ньютона в проходящем свете

## § 58. Дифракция света

**Дифракция волн** заключается в огибании волнами препятствий или в отклонении волн в область геометрической тени при прохождении через отверстия при условии, что линейные размеры этих препятствий порядка или меньше длины волны ( $d \leq \lambda$ ). Тип волн не имеет значения: дифракция наблюдается и для звука, и для света, и для любых других волновых процессов.

**Дифракцией света** называется явление отклонения света от прямолинейного направления распространения при прохождении вблизи препятствий.

Как показывает опыт, свет при определенных условиях может заходить в область геометрической тени (рис. 9.14). Если на пути параллельного светового пучка расположено круглое препятствие (круглый диск, шарик или круглое отверстие в непрозрачном экране), то на экране, расположенном на достаточно большом расстоянии от препятствия, появляется *дифракционная картина* — система чередующихся светлых и темных колец.



Рис. 9.14

Если препятствие имеет линейный характер (щель, нить, край экрана), то на экране возникает система параллельных дифракционных полос.

Французский ученый О. Френель развил теорию дифракционных явлений (1818 г.). Гипотезу Гюйгенса об огибающей вторичных волн Френель дополнил положением, согласно которому вторичные волны, приходя в точку наблюдения, *интерферируют* друг с другом.

Наблюдение дифракции световых волн возможно тогда, когда размеры препятствий будут порядка  $10^{-6} - 10^{-7}$  м.

На рисунке 9.15 показано, как меняется фронт волны, прошедшей через щель, при сужении этой щели.

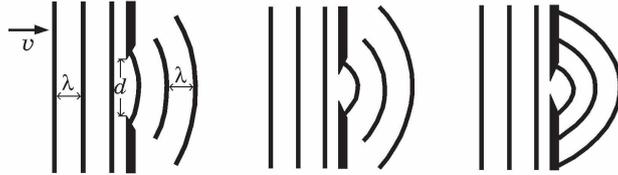


Рис. 9.15

Когда размеры щели сравниваются по порядку с длиной волны, щель становится источником вторичных сферических волн, интерференция которых и определяет картину распределения интенсивности за щелью, свет проникает в геометрически недоступную область.

**Дифракция на щели.** Дифракционная картина, наблюдаемая на экране, поставленном за перегородкой с одной щелью, может быть рассчитана на основании принципа суперпозиции и интерференции волн. Дифракция в параллельных лучах — дифракция Фраунгофера.

Пусть на щель падает монохроматический пучок света длиной волны  $\lambda$ . Размеры щели  $d$  сравнимы с  $\lambda$ :  $d \sim \lambda$ .

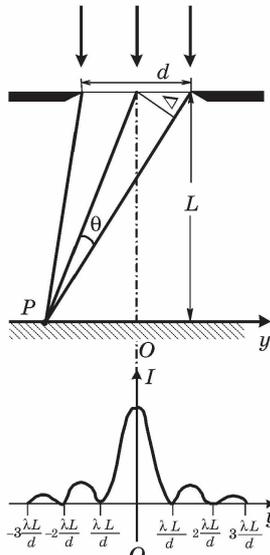


Рис. 9.16

Расстояние от щели до экрана  $L \gg d$ . Каждая точка щели является, согласно принципу Гюйгенса–Френеля, источником вторичной сферической волны. Эти волны интерферируют между собой так, что истинное положение фронта результирующей волны является огибающей вторичных волн с учетом их интерференции.

Рассмотрим наложение двух таких волн, идущих от середины щели и от одного из краев, и вычислим разность хода таких волн в произвольной точке  $P$  экрана (рис. 9.16).

Разность хода этих двух волн равна:  $\Delta = (d/2) \sin \theta \approx (d/2) \operatorname{tg} \theta = (d/2) (y/L)$ ,

где  $y$  — координата точки наблюдения на экране.

Интерферирующие волны будут гасить друг друга, если разность хода будет равна целому числу полуволн  $m(\lambda/2)$ . Отсюда находятся координаты тех точек на экране, где возникают темные полосы:

$$y_m = m \frac{2L}{d} \cdot \frac{\lambda}{2} = m \frac{L}{d} \lambda,$$

где  $m = 1, 2, 3, \dots$

Распределение интенсивности света в дифракционной картине имеет резкий максимум. Измерения положения минимумов позволяют (при известных параметрах  $d$  и  $L$ ) определить длину волны света  $\lambda$ .

### § 59. Дифракционная решетка

В спектральных приборах высокого класса применяются *дифракционные решетки*. Дифракционные решетки представляют собой периодические структуры, выгравированные специальной делительной машиной на поверхности стеклянной или металлической пластинки (рис. 9.17).

Простейшая дифракционная решетка состоит из прозрачных участков (щелей), разделенных непрозрачными промежутками. У хороших решеток параллельные друг другу штрихи имеют длину порядка 10 см, а на каждый миллиметр приходится до нескольких тысяч штрихов. При этом общая длина решетки достигает 10–15 см.

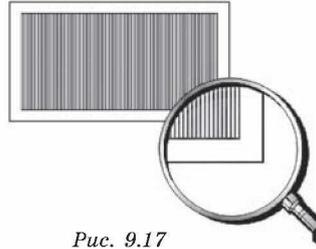


Рис. 9.17

Изготовление таких решеток требует применения высоких технологий. На практике применяются также и более грубые решетки с 50–100 штрихами на миллиметр, нанесенными на поверхность прозрачной пленки. В качестве дифракционной решетки может быть использован кусочек компакт-диска или осколок граммофонной пластинки.

На решетку направляется параллельный пучок исследуемого света (рис. 9.18). Наблюдение ведется в фокальной плоскости линзы, установленной за решеткой. В любой точке  $P$  на экране в фокальной плоскости линзы соберутся лучи, которые до линзы были параллельны между собой и распространялись под определенным углом  $\theta$  к направлению падающей волны. Колебание в точке  $P$  является результатом интерференции вторичных волн, проходящих в эту точку от разных щелей.

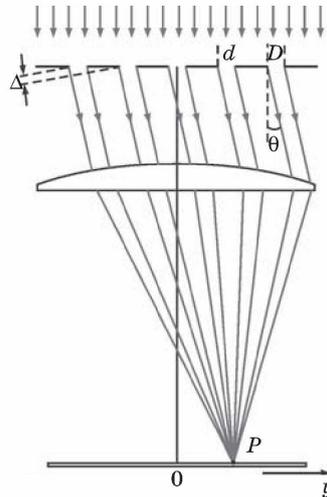


Рис. 9.18

Для того чтобы в точке  $P$  наблюдался интерференционный максимум, разность хода  $\Delta$  между волнами, испущенными соседними щелями, должна быть равна целому числу длин волн:

$$\Delta = d \sin \theta_m = m \lambda$$

$$(m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots),$$

где  $d$  — период решетки,  $m$  — целое число, *порядок дифракционного максимума*.

В тех точках экрана, для которых это условие выполнено, располагаются *главные максимумы* дифракционной картины. В каждой точке фокальной плоскости линзы происходит интерференция  $N$  волн, приходя-

щих в эту точку от  $N$  щелей решетки. Это так называемая *многоволновая* (или «*многолучевая*») интерференция.

Распределение световой энергии в плоскости наблюдения резко отличается от того, которое наблюдается в обычных «*двухлучевых*» интерференционных схемах. В главные максимумы все волны приходят в фазе, поэтому амплитуда колебаний возрастает в  $N$  раз, а интенсивность в  $N^2$  раз по сравнению с колебанием, которое возбуждает волна только от одной щели.

Главные максимумы при дифракции света на решетке узки. На рисунке 9.19 показано, как меняется острота глав-

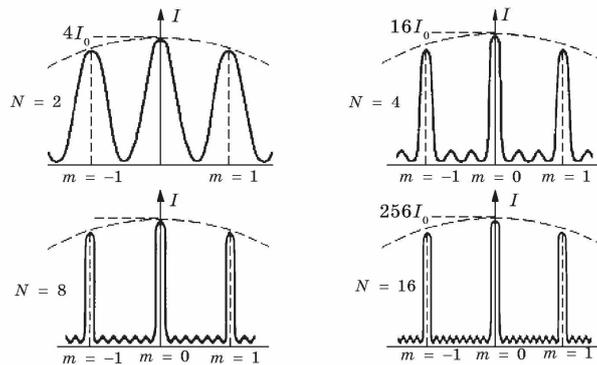


Рис. 9.19

ных максимумов при увеличении числа щелей решетки ( $I_0$  — интенсивность колебаний при дифракции света на одной щели).

Как следует из формулы дифракционной решетки, положение главных максимумов (кроме нулевого) зависит от длины волны  $\lambda$ . Поэтому решетка способна разлагать излучение в спектр, то есть она является *спектральным прибором*. Если на решетку падает немонохроматическое излучение, то в каждом порядке дифракции (т. е. при каждом значении  $m$ ) возникает спектр исследуемого излучения (рис. 9.20), причем фиолетовая часть спектра располагается ближе к максимуму нулевого порядка. Максимум нулевого порядка остается неокрашенным.

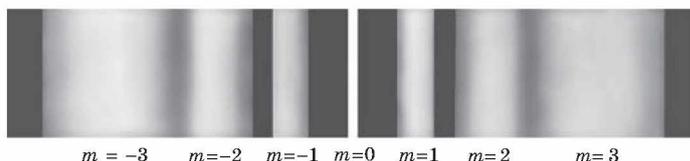


Рис. 9.20

С помощью дифракционной решетки можно производить очень точные измерения длины волны. Если период  $d$  решетки известен, то определение длины сводится к измерению угла  $\theta_0$ , соответствующего направлению на выбранную линию в спектре  $m$ -го порядка.

## § 60. Дисперсия света

*Дисперсией света* называется явление зависимости показателя преломления среды  $n$  от частоты  $\nu$  (или длины волны  $\lambda$ ) проходящего света:  $n = n(\nu)$  или  $n = n(\lambda)$ .

У всех прозрачных твердых веществ (стекло, кварц), из которых изготавливаются призмы, показатель преломления  $n$  в диапазоне видимого света убывает с увеличением длины волны  $\lambda$ . Так, для стекла показатель преломления уменьшается примерно на 15 % с ростом длины волны видимого света от 400 до 700 нм. Монотонно убывающая зависимость  $n(\lambda)$  называется *нормальной дисперсией*.

Первый опыт по разложению белого света в спектр был осуществлен И. Ньютоном (1672 г.) (рис. 9.21)

В состав видимого света входят монохроматические волны с различными значениями длин волн. Угол отклонения

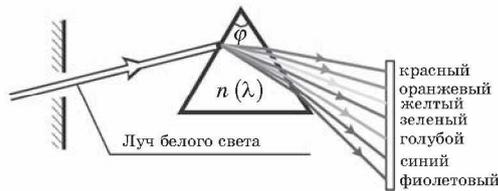


Рис. 9.21

лучей призмой  $\delta \approx \varphi(n - 1)$  зависит от показателя преломления  $n$ , а  $n$  является функцией длины волны  $n(\lambda)$ , поэтому лучи разных длин волн после прохождения призмы окажутся отклоненными на разные углы, наиболее сильно призма отклоняет от первоначального направления синие и фиолетовые лучи и наименее — красные.

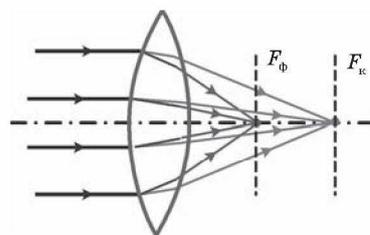


Рис. 9.22

Явление дисперсии объясняет *хроматическую aberrацию* оптических систем (рис. 9.22).

Отдельные монохроматические составляющие белого света фокусируются в разных точках. Наибольшее фокусное расстояние имеют красные лучи, наименьшее — фиолетовые.

Изображение получается размытым и по краям окрашенным.

Комбинируя собирающие и рассеивающие линзы из различных стекол совмещают фокусы нескольких цветов. Системы, исправленные на сферическую и хроматическую aberrации, называются *апланатами*.

**Спектроскоп.** В излучении нагретых тел (нить лампы накаливания) длины волн непрерывно заполняют весь диапазон видимого света. Такое излучение называется *белым светом*. Свет, испускаемый, например, газоразрядными лампами и многими другими источниками, содержит в своем составе отдельные монохроматические составляющие с некоторыми выделенными значениями длин волн. Совокупность монохроматических компонент в излучении называется *спектром*. Белый свет имеет *непрерывный спектр*; излучение источников, в которых свет испускается атомами вещества, имеет *дискретный спектр*. Приборы, с помощью которых исследуются спектры излучения источников, называются *спектральными приборами*.

Для разложения излучения в спектр в простейшем спектральном приборе используется призма (рис. 9.23).

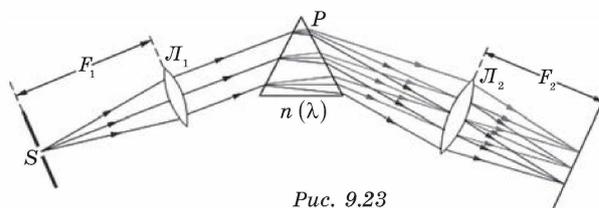


Рис. 9.23

Щель  $S$ , на которую падает исследуемое излучение, находится в фокальной плоскости линзы  $L_1$ . Эта часть прибора называется *коллиматором*. Выходящий из линзы параллельный пучок света падает на призму  $P$ . Вследствие дисперсии свет разных длин волн выходит из призмы под разными углами. В фокальной плоскости линзы  $L_2$  располагается экран или фотопластинка, на которой фокусируется излучение. В результате в разных местах экрана возникает изображение входной щели  $S$  в свете разных длин волн.

## § 61. Поляризация света

Еще в конце XVII века было обнаружено, что кристалл исландского шпата ( $\text{CaCO}_3$ ) раздваивает проходящие через него лучи. Это явление получило название *двойного лучепреломления* (рис. 9.24).

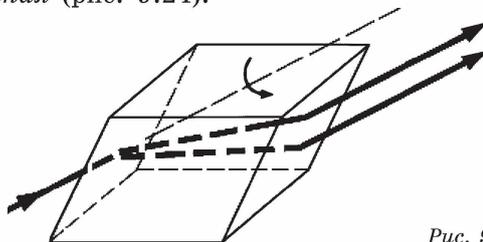


Рис. 9.24

В 1809 году французский инженер Э. Малюс открыл закон, названный его именем. В опытах Малюса свет последовательно пропускался через две одинаковые пластинки из турмалина (прозрачное кристаллическое вещество зеленоватой окраски). Пластинки могли поворачиваться друг относительно друга на угол  $\varphi$  (рис. 9.25).

Интенсивность прошедшего света оказалась прямо пропорциональной  $\cos^2 \varphi$ :  $I \sim \cos^2 \varphi$ .

Ни двойное лучепреломление, ни закон Малюса не могут найти объяснение в рамках теории продольных волн.

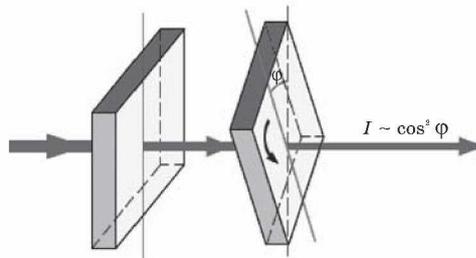


Рис. 9.25

Для продольных волн направление распространения луча является осью симметрии, все направления в плоскости, перпендикулярной лучу, равноправны. Асимметрия относительно луча является решающим признаком, который отличает поперечную волну от продольной.

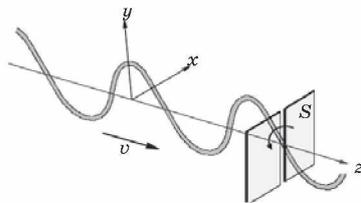


Рис. 9.26

В поперечной волне (например, в волне, бегущей по резиновому жгуту) частицы колеблются вдоль оси  $y$ . Поворот щели  $S$  вызовет затухание волны (рис. 9.26).

Впервые догадку о поперечности световых волн высказал Т. Юнг (1816 г.). Френель, независимо от Юнга, также выдвинул концепцию поперечности световых волн, обосновал ее многочисленными экспериментами и создал теорию двойного лучепреломления света в кристаллах. К тому времени, когда Максвелл сделал вывод о существовании электромагнитных волн, поперечность световых волн уже была доказана экспериментально. Поэтому Максвелл справедливо полагал, что поперечность электромагнитных волн является еще одним важнейшим доказательством электромагнитной природы света.

В электромагнитной волне векторы  $\vec{E}$  и  $\vec{B}$  перпендикулярны друг другу и лежат в плоскости, перпендикулярной направлению распространения волны. Во всех процессах взаимодействия света с веществом основную роль играет электрический вектор  $\vec{E}$ , поэтому его называют **световым вектором**. Если при распространении электромагнитной волны световой вектор сохраняет свою ориентацию, такую волну называют **линейно-поляризованной** или **плоско-поляризованной** (рис. 9.29, в).

В электромагнитной волне векторы  $\vec{E}$  и  $\vec{B}$  перпендикулярны друг другу и лежат в плоскости, перпендикулярной направлению распространения волны. Во всех процессах взаимодействия света с веществом основную роль играет электрический вектор  $\vec{E}$ , поэтому его называют **световым вектором**. Если при распространении электромагнитной волны световой вектор сохраняет свою ориентацию, такую волну называют **линейно-поляризованной** или **плоско-поляризованной** (рис. 9.29, в).

Если вдоль одного и того же направления распространяются две монохроматические волны, поляризованные в двух взаимно перпендикулярных плоскостях, то в результате их сложения в общем случае возникает *эллиптически-поляризованная волна*.

В эллиптически-поляризованной волне (рис. 9.27) в любой плоскости  $P$ , перпендикулярной направлению распространения волны, конец результирующего вектора  $\vec{E}$  за один период светового колебания описывает эллипс, который называется *эллипсом поляризации*.

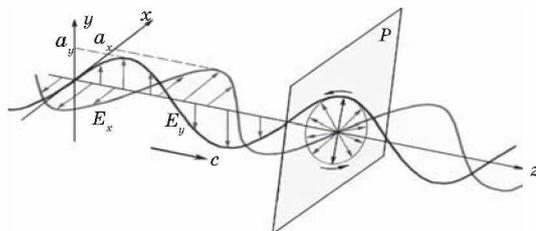


Рис. 9.27

Форма и размер эллипса поляризации определяются амплитудами  $a_x$  и  $a_y$  линейно-поляризованных волн и фазовым сдвигом  $\Delta\varphi$  между ними. Частным случаем эллиптически-поляризованной волны является волна с *круговой поляризацией* ( $a_x = a_y$ ,  $\Delta\varphi = \pm \pi/2$ ).

Свет может оказаться поляризованным при отражении или рассеянии диэлектриком (рис. 9.28). В частности, голубой свет от неба частично (рис. 9.29, б) или полностью поляризован.

Линейно-поляризованный свет испускается лазерными источниками.

Однако свет, испускаемый обычными источниками (например, солнечный свет, излучение ламп накаливания и т. п.), *неполяризован*.

Свет таких источников состоит в каждый момент из вкладов огромного числа независимо излучающих атомов с различной ориентацией светового вектора в излучаемых этими атомами волнах. Поэтому в результирующей волне вектор  $\vec{E}$  беспорядочно изменяет свою ориентацию во времени, так что в среднем все направления колебаний оказываются равноправными (рис. 9.29, а). Неполаризованный свет называют также *естественным светом*.

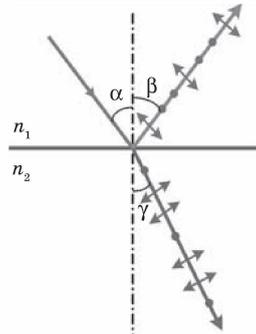


Рис. 9.28

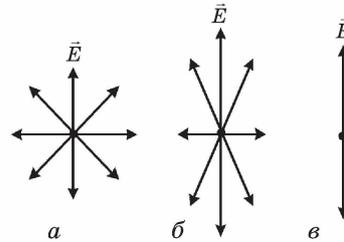


Рис. 9.29. *a* — естественный (неполяризованный) свет; *б* — частично поляризованный свет; *в* — плоско-поляризованный (линейно-поляризованный) свет.

В каждый момент времени вектор  $\vec{E}$  может быть спроектирован на две взаимно перпендикулярные оси (рис. 9.30).

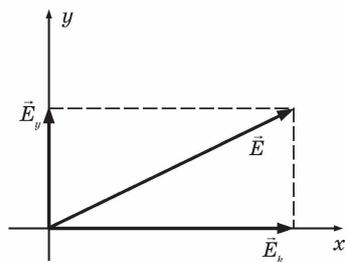


Рис. 9.30

Любую волну (поляризованную и неполяризованную) можно представить как суперпозицию двух линейно-поляризованных во взаимно перпендикулярных направлениях волн:

$$\vec{E}(t) = \vec{E}_x(t) + \vec{E}_y(t).$$

Но в поляризованной волне обе составляющие  $E_x(t)$  и  $E_y(t)$  когерентны, а в неполяризованной — некогерентны, т. е. в первом случае разность фаз между  $E_x(t)$  и  $E_y(t)$  постоянна, а во втором она является случайной функцией времени.

Явление двойного лучепреломления света объясняется тем, что во многих кристаллических веществах показатели преломления для двух взаимно перпендикулярно поляризованных волн различны. Поэтому кристалл раздваивает проходящие через него лучи (рис. 9.24). Два луча на выходе кристалла линейно поляризованы во взаимно перпендикулярных направлениях. С помощью разложения вектора  $\vec{E}$  на составляющие по осям можно объяснить закон Малюса (рис. 9.32).

У многих кристаллов поглощение света сильно зависит от направления электрического вектора в световой волне (*дихроизм*). Этим свойством, в частности, обладают пластины турмалина, использованные в опытах Малюса. При определенной толщине пластинка турмалина почти полностью поглощает одну из взаимно перпендикулярно по-

ляризованных волн (например,  $E_x$ ) и частично пропускает вторую волну ( $E_y$ ). Направление колебаний электрического вектора в прошедшей волне называется *разрешенным направлением* пластинки. Пластинка турмалина может быть использована как для получения поляризованного света (*поляризатор*), так и для анализа характера поляризации света (*анализатор*). В настоящее время широко применяются искусственные дихроичные пленки, которые называются *поляроидами*. Поляроиды почти полностью пропускают волну разрешенной поляризации и не пропускают волну, поляризованную в перпендикулярном направлении. Таким образом, поляроиды можно считать *поляризационными фильтрами*.

Рассмотрим прохождение естественного света последовательно через два идеальных поляроида  $\Pi_1$  и  $\Pi_2$ , разрешенные направления которых развернуты на некоторый угол  $\varphi$  (рис. 9.31).

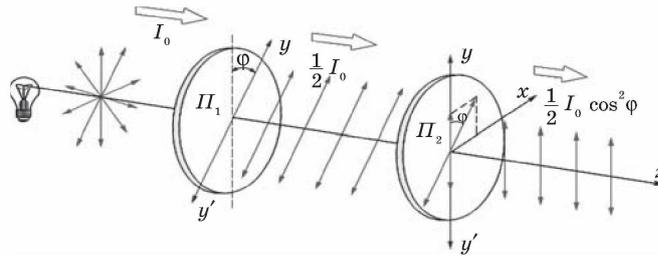


Рис. 9.31

Первый поляроид играет роль поляризатора. Он превращает естественный свет в линейно-поляризованный. Второй поляроид — анализатор — служит для анализа падающего на него света.

Если обозначить амплитуду линейно-поляризованной волны после прохождения света через первый поляроид через  $E_0 = \sqrt{\frac{I_0}{2}}$  то волна,

пропущенная вторым поляроидом, будет иметь амплитуду  $E = E_0 \cos \varphi$  (рис. 9.32). Следовательно, интенсивность  $I$  линейно-поляризованной волны на выходе второго поляроида будет равна

$$I = E^2 = E_0^2 \cos^2 \varphi = \frac{1}{2} I_0 \cos^2 \varphi.$$

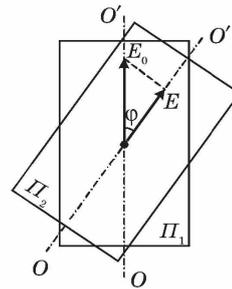


Рис. 9.32

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ К ГЛАВЕ IX

1. Объясните определение скорости света по методам Ремера, Физо и Майкельсона. Выведите математические выражения для определения скорости света в этих опытах.
2. Как меняется скорость света при переходе из вакуума в вещество?
3. Что называют интерференцией света? При каких условиях ее наблюдают?
4. Какие волны называют когерентными? Как можно получить когерентные световые волны?
5. Какой свет называют монохроматическим?
6. Объясните возникновение интерференционной картины на экране в опыте Юнга.
7. Сформулируйте и запишите условия образования максимумов и минимумов при наложении когерентных световых волн.
8. Объясните интерференцию света в тонких пленках.
9. Как возникают кольца Ньютона? Как зависит радиус колец от длины волны света?
10. Что называется дифракцией света? При каких условиях ее наблюдают?
11. Сформулируйте принцип Гюйгенса. В чем сущность принципа Гюйгенса–Френеля?
12. Как на основе принципа Гюйгенса–Френеля объясняется дифракция волн?
13. Объясните дифракцию света от одной щели. Как выглядит дифракционная картина?
14. Что называют дифракционной решеткой? Что называют периодом решетки?
15. Сделав пояснительный рисунок, объясните дифракцию света на дифракционной решетке.
16. Как выглядят дифракционные картины, созданные дифракционной решеткой при освещении ее монохроматическим лучом или лучом белого света?
17. Какая формула выражает условие образования дифракционных максимумов решетки?
18. Что называют дисперсией света?
19. Как зависит показатель преломления вещества от длины волны (частоты) света? Для какого цвета (фиолетового или для красного) показатель преломления вещества призмы больше?
20. Почему белый свет, проходя сквозь призму, разлагается в цветной спектр?
21. В каких пределах длин волн заключены длины волн видимого света?
22. Какой свет будет распространяться в веществе призмы (стекле) с большей скоростью — красный или фиолетовый?

23. Что произойдет при соединении всех световых лучей спектра?
24. В чем состоит сущность явления поляризации волн? Каким волнам (продольным или поперечным) оно свойственно?
25. Что представляет собой естественный свет?
26. Каким свойством обладает кристалл турмалина? Нарисуйте схему опыта прохождения света через одну и через две турмалиновые пластинки. Какими являются лучи света до и после прохождения пластин?
27. Объясните явление поляризации света исходя из представлений о свете как об электромагнитной волне.

### ТЕСТОВЫЕ ЗАДАНИЯ К ГЛАВЕ IX

1. (96/5-117). При определении скорости света по способу Физо зеркало находилось от зубчатого колеса на расстоянии 8633 м. Колесо имело 720 зубьев и столько же промежутков. Опыт дал значение 313000 км/с. При каком числе оборотов колеса в секунду свет впервые исчезал в этом опыте?

- A) 6,3. B) 12,6. C) 18,9. D) 25,2. E) 31,5.

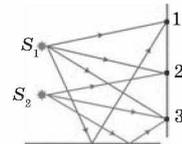
2. (96/10-29). Разность путей двух интерферирующих монохроматических волн равна  $\lambda/6$ . Какова разность фаз колебаний?

- A)  $\pi/6$ . B)  $\pi/4$ . C)  $\pi/3$ . D)  $\pi/2$ . E)  $\pi$ .

3. Разность путей двух монохроматических световых волн равна  $\lambda/4$ . Какова разность фаз колебаний?

- A)  $\pi$ . B)  $\pi/2$ . C)  $\pi/3$ . D)  $\pi/4$ . E)  $\pi/6$ .

4. (96/15-53). Над зеркалом расположены два источника  $S_1$  и  $S_2$ , испускающие монохроматическое излучение с частотами  $\nu_1$  и  $\nu_2$  соответственно. В каких из точек 1, 2 и 3 на экране может наблюдаться интерференция?



- A) 1. B) 2. C) 3. D) во всех. E) 1 и 3.

5. (96/5-119). На неограниченном экране наблюдают интерференционную картину от двух когерентных источников  $S_1$  и  $S_2$ , находящихся на расстоянии  $l$  друг от друга. Длина волны излучений равна  $\lambda$ . Каково число интерференционных полос, наблюдаемых на экране? Считать, что  $l$  кратно  $\lambda$ .

- A)  $2\lambda/l$ . B)  $l/\lambda$ . C)  $\lambda/2l$ . D)  $\lambda/l$ . E)  $2l/\lambda + 1$ .

6. (97/9-47). Найдите разность хода двух когерентных интерферирующих лучей, если длина волны  $\lambda$ , а разность фаз  $\pi/4$ .

- A)  $\lambda$ . B)  $\lambda/2$ . C)  $\lambda/4$ . D)  $\lambda/8$ . E)  $\lambda/16$ .

7. (97/12-51). Выберите ответ, правильно дополняющий предложение. Скорость распространения световых волн в вакууме ...

- А) зависит от частоты.
  - В) одинакова для всех световых волн.
  - С) зависит от энергии.
  - Д) зависит от частоты и амплитуды.
  - Е) может быть произвольной.
- 8. (97/10-42).** Какие волны называются когерентными?
- А) с одинаковой амплитудой.
  - В) с одинаковой частотой.
  - С) с одинаковой длиной.
  - Д) с одинаковой длиной и с постоянной разностью фаз.
  - Е) волны с гармоническими колебаниями
- 9. (97/12-62).** Волны от двух когерентных источников приходят в заданную точку в одинаковой фазе. Определите амплитуду  $A$  результирующего колебания в этой точке, если амплитуда колебаний в каждой волне равна  $a$ .
- А)  $-A = 0$ .
  - В)  $A = a$ .
  - С)  $A = 2a$ .
  - Д)  $0 < A < a$ .
  - Е)  $a < A < 2a$ .
- 10. (97/6-51).** При каком условии может наблюдаться интерференция двух пучков света с разными длинами волн?
- А) при постоянной разности хода.
  - В) при одинаковой амплитуде колебаний.
  - С) при одинаковой начальной фазе.
  - Д) при одинаковых амплитудах и начальных фазах колебаний.
  - Е) ни при каких условиях не может наблюдаться.
- 11. (97/1-59).** В некоторую точку пространства приходят когерентные лучи с оптической разностью хода  $2 \text{ мкм}$ . Усиление или ослабление света будет наблюдаться в этой точке, если в нее приходят красные лучи с длиной волны  $760 \text{ нм}$ ? Какое явление происходит в этой точке?
- А) ослабление, интерференция.
  - В) усиление, дифракция.
  - С) усиление, интерференция.
  - Д) ослабление, дифракция.
  - Е) интенсивность света не изменится, суперпозиция.
- 12. (97/12-64).** В некоторую точку пространства приходят когерентные лучи, длина волны которых  $600 \text{ нм}$ , с оптической разностью хода  $1,2 \text{ мкм}$ . Определите, что произойдет в этой точке.
- А) определить, что произойдет — невозможно, так как неизвестны направления распространения этих волн.
  - В) дифракция, максимум.
  - С) интерференция, максимум.
  - Д) дифракция, минимум.
  - Е) интерференция, минимум.
- 13. (98/2-52).** Отклонение от прямолинейного распространения, огибание световыми волнами препятствий и захождение в область геометрической тени называется явлением ...

А) интерференции. С) дисперсии. Е) дифракции.  
В) поляризации. D) фотоэффекта.

14. (98/5-54). Какие из перечисленных явлений объясняются дифракцией света: 1) радужная окраска тонких мыльных и масляных пленок; 2) кольца Ньютона; 3) появление светлого пятна в центре тени от малого непрозрачного диска; 4) отклонение световых волн в область геометрической тени?

А) 1. В) 1,2. С) 3,4. D) 1,2,3. Е) 4.

15. (98/3-58). Какие из перечисленных ниже явлений получили объяснение на основе волновой теории света: 1) интерференция; 2) дифракция; 3) фотоэффект; 4) поляризация?

А) 1, 2, 3. В) 2, 3. С) все. D) 1, 2, 4. Е) 3, 4.

16. (98/5-53). Какое из перечисленных явлений позволяет обнаружить поперечность световых волн?

А) поляризация. С) дифракция. Е) фотоэффект.  
В) интерференция. D) дисперсия.

17. (97/4-54). Каков цвет в отраженных лучах пленки толщиной 0,21 мкм с показателем преломления 1,5, если она освещается белым светом, падающим по нормали к поверхности?

А) фиолетовый. С) зеленый. Е) красный.  
В) синий. D) желтый.

18. (97/2-54). Какую окраску принимает пленка толщиной 0,5 мкм, показатель преломления вещества которой 1,48, при освещении монохроматическим светом длиной волны 590 нм? Световые лучи падают перпендикулярно к поверхности пленки.

А) красный. С) зеленый. Е) черный.  
В) оранжевый. D) белый.

19. (97/1-60). Определить диаметр второго светлого кольца Ньютона (в мм), наблюдаемого в отраженном свете с длиной волны 640 нм, если радиус кривизны линзы, лежащей на плоской пластинке, равен 6,4 м, а лучи параллельны главной оптической оси линзы.

А) 8. В) 10,1. С) 12,3. D) 15,6. Е) 2,5.

20. (96/5-120). Установку по наблюдению колец Ньютона освещают монохроматическим светом. Как изменится расстояние между кольцами, если пространство между линзой и пластинкой заполнить жидкостью с показателем преломления  $n$ ? Показатель преломления воздуха считайте равным 1.

А) уменьшится в  $n$  раз. D) уменьшится в  $\sqrt{n}$  раз.

В) не изменится. Е) увеличится в  $\sqrt{n}$  раз.

С) увеличится в  $n$  раз.

21. (03/5-31). Для какого света фокусное расстояние собирающей линзы будет наибольшим?

- А) зеленого. С) фиолетового. Е) синего.  
 В) красного. D) желтого.
22. (01/3-14). Свет какой длины волны (нм) в спектре четвертого порядка накладывается на свет длины волны 780 нм в спектре третьего порядка при дифракции белого света?  
 А) 292. В) 347. С) 520. D) 585. Е) 1040.
23. (01/2-43). При дифракции света длиной волны  $\lambda$  на дифракционной решетке с периодом  $5\lambda$  максимум второго порядка наблюдается под углом ...  
 А)  $\arcsin(3/5)$ . С)  $\arcsin 0,3$ . Е)  $\arcsin(2/5)$ .  
 В)  $\arcsin 0,45$ . D)  $\arcsin 0,15$ .
24. (98/12- ). Как изменится расстояние между максимумами и число максимумов на экране, если дифракционную решетку заменить на другую с большим периодом?  
 А) увеличится, уменьшится.  
 В) увеличится, увеличится.  
 С) не изменится, уменьшится.  
 D) уменьшится, уменьшится.  
 Е) уменьшится, увеличится.
25. (03/5-56). Длина волны желтой линии натрия равна 5890 А°. Каков наибольший порядок этой линии в дифракционном спектре, если период дифракционной решетки равен 2 мкм?  
 А) 6. В) 4. С) 5. D) 3. Е) 2.
26. (03/6-52). Под каким углом наблюдается зеленая линия ( $\lambda = 0,5$  мкм) в спектре первого порядка, полученном с помощью дифракционной решетки с периодом 0,001 мм?  
 А) 0°. В) 30°. С) 45°. D) 60°. Е) 75°.
27. (03/8-46). На каждом миллиметре дифракционной решетки имеется 250 штрихов. На нее падает монохроматический свет с длиной волны 500 нм. Под каким углом наблюдается четвертый дифракционный максимум?  
 А) 75°. В) 60°. С) 45°. D) 30°. Е) 15°.
28. (98/5-71). Угол между двумя симметричными дифракционными максимумами первого порядка 60°. Определите длину волны падающего излучения (в нм). Период дифракционной решетки  $1 \cdot 10^{-3}$  мм;  $\sin 30^\circ = 0,5$ ;  $\cos 30^\circ = 0,87$ .  
 А) 400. В) 500. С) 600. D) 700. Е) 870.
29. (98/1-59). Какое из приведенных выражений является условием наблюдения главных максимумов в спектре дифракционной решетки с периодом  $d$  под углом  $\varphi$ ?  
 А)  $d \cos \varphi = k \lambda$ . С)  $d \sin \varphi = k \lambda$ . Е) НПО.  
 В)  $d \sin \varphi = (2k + 1) \lambda / 2$ . D)  $d \cos \varphi = (2k - 1) \lambda / 2$ .
30. (96/5-121). В спектре, полученном с помощью дифракционной решетки, спектральную линию наблюдают в первом порядке

под углом  $\varphi$ . Определите наивысший порядок спектра, в котором еще можно наблюдать эту линию.

- A)  $m = 1/\sin \varphi$ .    C)  $m < 1/\sin \varphi$ .    E)  $m \leq 1/\sin \varphi$ .  
B)  $m > 1/\sin \varphi$ .    D)  $m \geq 1/\sin \varphi$ .

31. (97/3-54). На дифракционную решетку с периодом 3,4 мкм перпендикулярно падает монохроматический свет с длиной волны 0,5 мкм. Сколько главных максимумов наблюдается на экране?

- A) 6.    B) 7.    C) 12.    D) 14.    E) 13.

32. (97/1- ). Какое наибольшее число штрихов может быть на каждом миллиметре дифракционной решетки, предназначенной для изучения спектра ультрафиолетового света с длиной волны 0,4 мкм?

- A) 1350.    B) 2500.    C) 3680.    D) 10000.    E) НПО.

33. (97/5-53). Монохроматический свет длиной волны 0,5 мкм падает перпендикулярно на дифракционную решетку с периодом 2,9 мкм. Сколько главных максимумов наблюдается на экране?

- A) 5.    B) 6.    C) 10.    D) 11.    E) 12.

34. (96/7-114). В какой зависимости находятся расстояние от экрана до дифракционной решетки  $a$  и расстояние от центра картины до дифракционного максимума  $b$  ?

- A) при возрастании  $a$   $b$  не меняется.  
B) с ростом  $a$  уменьшается  $b$ .  
C) с ростом  $a$  растет и  $b$ .  
D)  $a$  и  $b$  не зависят друг от друга.    E) НПО.

35. (96/8-56). Как зависит расстояние между центром экрана и положением дифракционного максимума от значения постоянной дифракционной решетки  $d$ ?

- A) уменьшается с ростом  $d$ .    D) не зависит от  $d$ .  
B) увеличивается с ростом  $d$ .    E) НПО.  
C) не меняется с ростом  $d$ .

36. (96/7-54). В школе имеются дифракционные решетки с 50 и 100 штрихами на каждом миллиметре. Какая из них образует более широкий спектр?

- A) ширина спектров будет одинаковой.  
B) ширина спектров не зависит от числа штрихов.  
C) первая.    D) вторая.    E) НПО.

37. (96/5-54). Сколько дифракционных максимумов способна создать дифракционная решетка с периодом 100 мкм, если она освещена зеленым светом ( $\lambda = 0,5$  мкм)?

- A) 500.    B) 401.    C) 200.    D) 50.    E) 10.

38. (96/15-52). Дифракционная решетка содержит 500 штрихов на 1 мм. Какова длина монохроматического света (мкм), падающего на решетку, если второй максимум наблюдается под углом  $30^\circ$ ?

- A) 0,5.    B) 0,6.    C) 0,7.    D) 0,8.    E) 0,9.

## Глава X. ОСНОВЫ СПЕЦИАЛЬНОЙ ТЕОРИИ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ

**Специальная (или частная) теория относительности** (СТО) представляет собой современную физическую теорию пространства и времени. СТО называют *релятивистской теорией*, а специфические явления, описываемые этой теорией, — *релятивистскими эффектами*. Эти эффекты наиболее отчетливо проявляются при скоростях движения тел, близких к скорости света в вакууме  $c \approx 3 \cdot 10^8$  м/с. Специальная теория относительности создана А. Эйнштейном (1905 г.).

### § 62. Постулаты специальной теории относительности

Классическая механика Ньютона описывает движение макротел, движущихся с малыми скоростями ( $v \ll c$ ). В нерелятивистской физике принимается как очевидный факт *существование единого мирового времени  $t$ , одинакового во всех системах отсчета*. В основе классической механики лежит механический принцип относительности (или принцип относительности Галилея): *законы динамики одинаковы во всех инерциальных системах отсчета*. Этот принцип означает, что законы динамики инвариантны (т. е. неизменны) относительно преобразований Галилея, которые позволяют вычислить координаты движущегося тела в одной инерциальной системе ( $K$ ), если заданы координаты этого тела в другой инерциальной системе ( $K'$ ) (рис. 10.1).

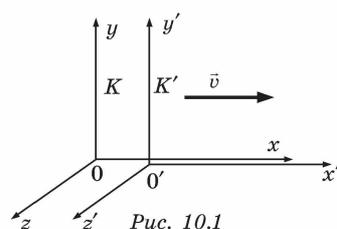


Рис. 10.1

В частном случае, когда система  $K'$  движется со скоростью  $v$  вдоль положительного направления оси  $x$  системы  $K$  преобразования Галилея имеют вид:

$$x = x' + vt, \quad y = y', \quad z = z', \quad t = t'.$$

В начальный момент оси координат обеих систем совпадают.

Из преобразований Галилея следует классический закон преобразования скоростей при переходе от одной системы отсчета к другой:  $u_x = u'_x + v$ ,  $u_y = u'_y$ ,  $u_z = u'_z$ .

Ускорения тела во всех инерциальных системах оказываются одинаковыми:  $a_x = a'_x$ ,  $a_y = a'_y$ ,  $a_z = a'_z$ , или  $\vec{a} = \vec{a}'$ .

Следовательно, уравнение движения классической механики (второй закон Ньютона)  $m\vec{a} = \vec{F}$  не меняет своего вида при переходе от одной инерциальной системы к другой.

Исключительную роль в развитии представлений о пространстве и времени сыграла теория Максвелла. Из теории Максвелла следовало, что скорость распространения электромагнитных волн в любой инерциальной системе отсчета имеет одно и то же значение, равное скорости света в вакууме. Отсюда следует, что уравнения, описывающие распространение электромагнитных волн, не инвариантны относительно преобразований Галилея. Если электромагнитная волна (в частности, свет) распространяется в системе отсчета  $K'$  (рис. 10.1) в положительном направлении оси  $x'$ , то в системе  $K$  свет должен, согласно галилеевской кинематике, распространяться со скоростью  $c + v$ , а не  $c$ .

Итак, на рубеже XIX и XX веков физика переживала кризис. Выход был найден Эйнштейном ценой отказа от классических представлений о пространстве и времени. Важным шагом на этом пути явился пересмотр понятия *абсолютного времени*. Многие понятия и величины, которые в нерелятивистской физике считались абсолютными, т. е. не зависящими от системы отсчета, в эйнштейновской теории переведены в разряд *относительных*.

В основе специальной теории относительности лежат два принципа, или постулата:

1. **Принцип относительности Эйнштейна:** *все законы природы инвариантны по отношению к переходу от одной инерциальной системы отсчета к другой.* Это означает, что во всех инерциальных системах физические законы (не только механические) имеют одинаковую форму. Таким образом, принцип относительности классической механики обобщается на все процессы природы, в том числе и на электромагнитные.

2. **Принцип постоянства скорости света:** *скорость света в вакууме не зависит от скорости движения источника света или наблюдателя и одинакова во всех инерциальных системах отсчета.* Скорость света — это предельная скорость передачи взаимодействий и сигналов из одной точки пространства в другую.

В последующее время СТО была подкреплена экспериментальными данными, полученными при изучении движения быстрых частиц в ускорителях, атомных процессах, ядерных реакций и т. п.

Постулаты СТО находятся в явном противоречии с классическими представлениями. Рассмотрим мысленный эксперимент: в момент времени  $t = 0$ , когда координатные оси двух инерциальных систем  $K$  и  $K'$  совпадают, в общем начале координат произошла кратковременная вспышка света. За время  $t$  системы сместятся относительно друг друга на расстояние  $vt$ , а сферический волновой фронт в каждой системе будет иметь радиус  $ct$  (рис. 10.2), так как системы равноправны и в каждой из них скорость света равна  $c$ .

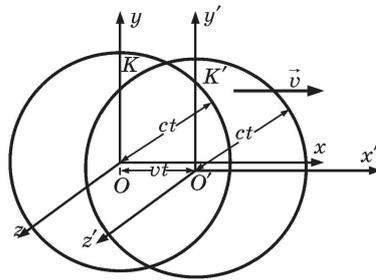


Рис. 10.2

С точки зрения наблюдателя в системе  $K$  центр сферы находится в точке  $O$ , а с точки зрения наблюдателя в системе  $K'$  он будет находиться в точке  $O'$ . Следовательно, центр сферического фронта одновременно находится в двух разных точках.

Причина возникающего недоразумения лежит не в противоречии между двумя принципами СТО, а в допущении, что положение фронтов сферических волн для обеих систем относится к *одному и тому же моменту времени*. Это допущение заключено в формулах преобразования Галилея, согласно которым время в обеих системах течет одинаково:  $t = t'$ . Следовательно, постулаты Эйнштейна находятся в противоречии не друг с другом, а с формулами преобразования Галилея.

Поэтому на смену галилеевых преобразований СТО предложила другие формулы преобразования при переходе из одной инерциальной системы в другую — это преобразования Лоренца, которые при скоростях движения, близких к скорости света, позволяют объяснить все релятивистские эффекты, а при малых скоростях ( $v \ll c$ ) переходят в формулы преобразования Галилея. Новая теория (СТО) не отвергла старую классическую механику Ньютона, а только уточнила пределы ее применимости.

### § 63. Относительность промежутков времени

Для того чтобы в выбранной системе отсчета выполнять измерения промежутка времени между двумя *событиями* (например, началом и концом какого-либо процесса), происходящими в *одной и той же точке пространства*

ства, достаточно иметь *эталонные часы*. Наибольшей точностью в настоящее время обладают часы, основанные на использовании собственных колебаний молекул аммиака (молекулярные часы) или атомов цезия (атомные часы).

Если же оба события происходят в разных точках системы отсчета, то для измерения промежутков времени между ними в этих точках необходимо иметь *синхронизованные часы*.

**Синхронизация часов в СТО.** Эйнштейновское определение процедуры синхронизации часов основано на независимости скорости света в пустоте от направления распространения. Пусть из точки  $A$  в момент времени  $t_1$  по часам  $A$  отправляется короткий световой импульс (рис. 10.3). Пусть время прихода импульса в  $B$  и отражения его назад на часах  $B$  есть  $t'$ , отраженный сигнал возвращается в  $A$  в момент  $t_2$  по часам  $A$ . Тогда по определению часы в  $A$  и  $B$  идут синхронно, если  $t' = (t_1 + t_2)/2$ .

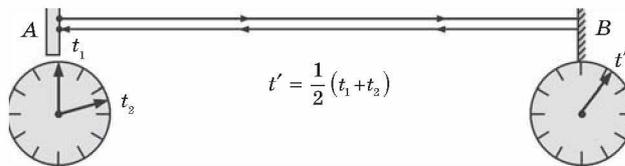


Рис. 10.3

Итак, в разных точках выбранной системы отсчета можно расположить *синхронизованные часы*. События, происходящие в пространственно-разобценных точках, одновременно, если *синхронизованные часы показывают одинаковое время*.

Рассмотрим теперь вторую инерциальную систему  $K'$ , которая движется с некоторой скоростью  $v$  в положительном направлении оси  $x$  системы  $K$ . В разных точках этой новой системы отсчета также можно расположить часы и синхронизировать их между собой, используя описанную выше процедуру. Теперь интервал времени между двумя событиями можно измерять как по часам в системе  $K$ , так и по часам в системе  $K'$ . Будут ли эти интервалы одинаковы? Ответ на этот вопрос должен находиться в согласии с постулатами СТО.

Пусть оба события в системе  $K'$  происходят в одной и той же точке и промежуток времени между ними равен  $\tau_0$  по часам системы  $K'$ . Этот промежуток времени называ-

ется *собственным временем*. Каким будет промежуток времени между этими же событиями, если его измерить по часам системы  $K$ ?

Для ответа на этот вопрос рассмотрим следующий мысленный эксперимент. На одном конце твердого стержня некоторой длины  $l$  расположена импульсная лампа  $B$ , а на другом конце — отражающее зеркало  $M$ . Стержень расположен неподвижно в системе  $K'$  и ориентирован параллельно оси  $y'$  (рис. 10.4). Событие 1 — вспышка лампы, событие 2 — возвращение короткого светового импульса к лампе.

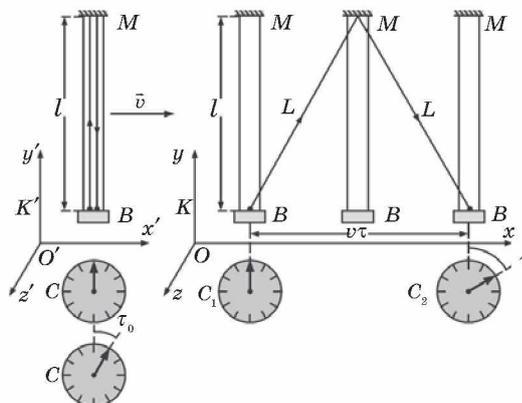


Рис. 10.4

Моменты наступлений событий в системе  $K'$  фиксируются по одним и тем же часам  $C$ , а в системе  $K$  — по двум синхронизованным пространственно-разнесенным часам  $C_1$  и  $C_2$ . Система  $K'$  движется со скоростью  $v$  в положительном направлении оси  $x$  системы  $K$ .

В системе  $K'$  оба рассматриваемых события происходят в одной и той же точке. Промежуток времени между ними (собственное время) равен  $\tau_0 = 2l/c$ . С точки зрения наблюдателя, находящегося в системе  $K$ , световой импульс движется между зеркалами зигзагообразно и проходит путь  $2L$ , равный

$$2L = 2\sqrt{l^2 + \left(\frac{v\tau}{2}\right)^2},$$

где  $\tau$  — промежуток времени между отправлением светового импульса и его возвращением, измеренный по синхронизованным часам  $C_1$  и  $C_2$ , расположенным в разных

точках системы  $K$ . Но согласно второму постулату СТО, световой импульс двигался в системе  $K$  с той же скоростью  $c$ , что и в системе  $K'$ . Следовательно,  $\tau = 2L/c$ .

Из этих соотношений можно найти связь между  $\tau$  и  $\tau_0$ :

$$\tau = \frac{\tau_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \frac{\tau_0}{\sqrt{1 - \beta^2}},$$

где  $\beta = v/c$ .

Таким образом, промежуток времени между двумя событиями зависит от системы отсчета, т. е. является *относительным*. Собственное время  $\tau_0$  всегда меньше, чем промежуток времени  $\tau$  между этими же событиями, измеренный в любой другой системе отсчета. Этот эффект называют *релятивистским замедлением времени*.

Эффект замедления времени является взаимным, для любого наблюдателя в  $K$  или  $K'$  медленнее идут часы, связанные с движущейся по отношению к наблюдателю системой. Этот вывод СТО находит непосредственное опытное подтверждение. Например, при исследовании космических лучей в их составе обнаружены  $\mu$ -мезоны — элементарные частицы с массой, примерно в 200 раз превышающей массу электрона. Эти частицы нестабильны, их среднее собственное время жизни равно  $\tau_0 = 2,2 \cdot 10^{-6}$  с. Но в космических лучах  $\mu$ -мезоны движутся со скоростью, близкой к скорости света. Без учета релятивистского эффекта замедления времени они в среднем пролетали бы в атмосфере путь, равный  $c\tau_0 \approx 660$  м. На самом деле, как показывает опыт, мезоны за время жизни успевают пролетать без распада гораздо большие расстояния. Согласно СТО, среднее время жизни мезонов по часам земного наблюдателя равно  $\tau = \frac{\tau_0}{\sqrt{1 - \beta^2}} \gg \tau_0$ , так как  $\beta = v/c$  близко к единице. Поэтому средний путь  $v\tau$ , проходимый мезоном в земной системе отсчета, оказывается значительно больше 660 м.

## § 64. Относительность расстояний

Пусть твердый стержень покоится в системе отсчета  $K'$ , движущейся со скоростью  $v$  относительно системы отсчета  $K$  (рис. 10.5). Стержень ориентирован параллельно оси  $x'$ . Его длина, измеренная с помощью эталонной ли-

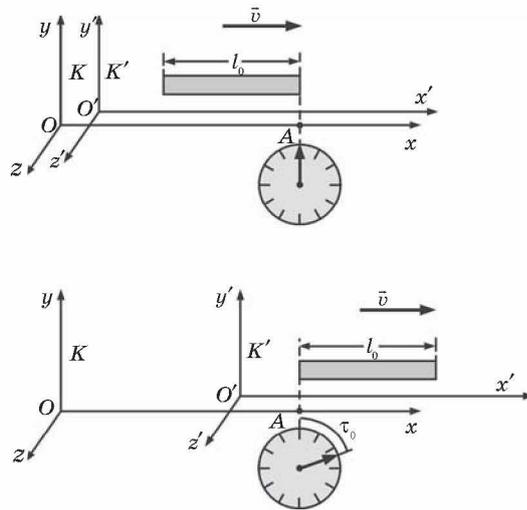


Рис. 10.5

нейки в системе  $K'$ , равна  $l_0$  и называется *собственной длиной*. Какой будет длина этого стержня, измеренная наблюдателем в системе  $K$ ?

Под длиной  $l$  стержня в системе  $K$ , относительно которой стержень движется, понимают расстояние между координатами концов стержня, зафиксированными одновременно по часам этой системы. Если известна скорость системы  $K'$  относительно  $K$ , то измерение длины движущегося стержня можно свести к измерению времени: длина  $l$  движущегося со скоростью  $v$  стержня равна произведению  $v\tau_0$ , где  $\tau_0$  — интервал времени по часам в системе  $K$  между прохождением начала стержня и его конца мимо какой-нибудь неподвижной точки (например, точки  $A$ ) в системе  $K$ . Поскольку в системе  $K$  оба события (прохождение начала и конца стержня мимо фиксированной точки  $A$ ) происходят в одной точке, то промежуток времени  $\tau_0$  в системе  $K$  является собственным временем. Итак, длина  $l$  движущегося стержня равна  $l = v\tau_0$ .

Найдем теперь связь между  $l$  и  $l_0$ . С точки зрения наблюдателя в системе  $K'$ , точка  $A$ , принадлежащая системе  $K$ , движется вдоль неподвижного стержня налево со скоростью  $v$ , поэтому можно записать:  $l_0 = v\tau$ , где  $\tau$  есть промежуток времени между моментами прохождения точки  $A$  мимо концов стержня, измеренный по синхронизован-

ным часам в  $K'$ . Используя связь между промежутками времени  $\tau$  и  $\tau_0$ :  $\tau = \frac{\tau_0}{\sqrt{1-\beta^2}}$ , найдем  $l = l_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} = l_0 \sqrt{1 - \beta^2}$ .

Таким образом, длина стержня зависит от системы отсчета, в которой она измеряется, т. е. является относительной величиной. Длина стержня оказывается наибольшей в той системе отсчета, в которой стержень покоится. Движущиеся относительно наблюдателя тела сокращаются в направлении своего движения. Этот релятивистский эффект носит название *лоренцева сокращения длины*.

### § 65. Преобразования Лоренца

Кинематические формулы преобразования координат и времени в СТО называются *преобразованиями Лоренца*. Они были предложены в 1904 г. еще до появления СТО как преобразования, относительно которых инвариантны уравнения электродинамики. Для случая, когда система  $K'$  движется относительно  $K$  со скоростью  $v$  вдоль оси  $x$ , преобразования Лоренца имеют вид:

$K' \rightarrow K$	$K \rightarrow K'$
$\begin{cases} x = \frac{x' + vt'}{\sqrt{1 - \beta^2}}, \\ y = y', \\ z = z', \\ t = \frac{t' + vx'/c^2}{\sqrt{1 - \beta^2}}. \end{cases}$	$\begin{cases} x' = \frac{x - vt}{\sqrt{1 - \beta^2}}, \\ y' = y, \\ z' = z, \\ t' = \frac{t - vx/c^2}{\sqrt{1 - \beta^2}}. \end{cases}$
$\beta = v/c.$	

Из преобразований Лоренца вытекает целый ряд следствий. В частности, из них следует релятивистский эффект замедления времени и лоренцево сокращение длины. Пусть, например, в некоторой точке  $x'$  системы  $K'$  происходит процесс длительностью  $\tau_0 = t'_2 - t'_1$  (собственное время), где  $t'_1$  и  $t'_2$  — показания часов в  $K'$  в начале и в конце процесса. Длительность  $\tau$  этого процесса в системе  $K$  будет равна:

$$\tau = t_2 - t_1 = \frac{t'_2 + vx'_1/c^2}{\sqrt{1-\beta^2}} - \frac{t'_1 + vx'_2/c^2}{\sqrt{1-\beta^2}} = \frac{t'_2 - t'_1}{\sqrt{1-\beta^2}} = \frac{\tau_0}{\sqrt{1-\beta^2}}.$$

Аналогичным образом можно показать, что из преобразований Лоренца вытекает релятивистское сокращение длины. Одним из важнейших следствий из преобразований Лоренца является вывод об *относительности одновременности*. Пусть, например, в двух разных точках системы отсчета  $K'$  ( $x'_1 \neq x'_2$ ) одновременно с точки зрения наблюдателя в  $K'$  ( $t'_1 = t'_2 = t'$ ) происходят два события. Согласно преобразованиям Лоренца, наблюдатель в системе  $K$  будет иметь:

$$x_1 = \frac{x'_1 + vt'}{\sqrt{1-\beta^2}}, \quad x_2 = \frac{x'_2 + vt'}{\sqrt{1-\beta^2}} \Rightarrow x_1 \neq x_2,$$

$$t_1 = \frac{t' + vx'_1/c^2}{\sqrt{1-\beta^2}}, \quad t_2 = \frac{t' + vx'_2/c^2}{\sqrt{1-\beta^2}} \Rightarrow t_1 \neq t_2.$$

Следовательно, в системе  $K$  эти события, оставаясь *пространственно разобщенными*, оказываются *неодновременными*.

Пусть в системе отсчета  $K'$  вдоль оси  $x'$  неподвижно расположен длинный жесткий стержень. В центре стержня находится импульсная лампа  $B$ , а на его концах установлены двое синхронизованных часов (рис. 10.6, а), система  $K'$  движется вдоль оси  $x$  системы  $K$  со скоростью  $v$ . В некоторый момент времени лампа посылает короткие световые импульсы в направлении концов стержня. В силу равноправия обоих направлений свет в системе  $K'$  дойдет до концов стержня одновременно, и часы, закрепленные на концах стержня, покажут одно и то же время  $t'$ . Относительно системы  $K$  концы стержня движутся со скоростью  $v$  так, что один конец движется навстречу световому импульсу, а другой конец свету приходится догонять. Так как скорости распространения световых импульсов в обоих направлениях одинаковы и равны  $c$ , то, с точки зрения наблюдателя в системе  $K$ , свет раньше дойдет до левого конца стержня, чем до правого (рис. 10.6, б).

В СТО наряду с утверждением относительного характера пространства и времени важную роль играет установление инвариантных физических величин, которые не изменяются при переходе от одной системы отсчета к дру-

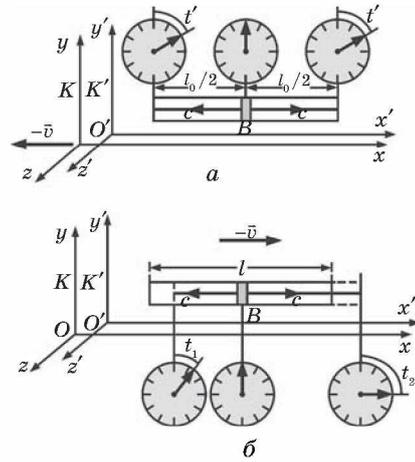


Рис. 10.6

гой. Одной из таких величин является скорость света  $c$  в вакууме, которая в СТО приобретает абсолютный характер. Другой важной инвариантной величиной, отражающей абсолютный характер пространственно-временных связей, является интервал между событиями.

**Пространственно-временной интервал** определяется в СТО следующим соотношением:

$$s_{12} = \sqrt{c^2 t_{12}^2 - l_{12}^2},$$

где  $t_{12}$  — промежуток времени между событиями в некоторой системе отсчета, а  $l_{12}$  — расстояние между точками, в которых происходят рассматриваемые события, в той же системе отсчета. В частном случае, когда одно из событий происходит в начале координат ( $x_1 = y_1 = z_1 = 0$ ) системы отсчета в момент времени  $t_1 = 0$ , а второе — в точке с координатами  $x, y, z$  в момент времени  $t$ , пространственно-временной интервал между этими событиями записывается в виде:

$$s = \sqrt{c^2 t^2 - x^2 - y^2 - z^2}.$$

С помощью преобразований Лоренца можно доказать, что пространственно-временной интервал между двумя событиями не изменяется при переходе из одной инерциальной системы в другую. Инвариантность интервала означает, что, несмотря на относительность расстояний и промежутков времени, протекание физических процессов носит объективный характер и не зависит от системы отсчета.

Если одно из событий представляет собой вспышку света в начале координат системы отсчета при  $t = 0$ , а второе — приход светового фронта в точку с координатами  $x, y, z$  в момент времени  $t$  (рис. 10.6), то

$$x^2 + y^2 + z^2 = c^2 t^2,$$

и, следовательно, интервал для этой пары событий  $s = 0$ . В другой системе отсчета координаты и время второго события будут другими, но и в этой системе пространственно-временной интервал  $s'$  окажется равным нулю, так как

$$x'^2 + y'^2 + z'^2 = c^2 t'^2.$$

*Для любых двух событий, связанных между собой световым сигналом, интервал равен нулю.*

**Закон сложения скоростей.** Из преобразований Лоренца для координат и времени можно получить релятивистский закон сложения скоростей. Пусть, например, в системе отсчета  $K'$  вдоль оси  $x'$  движется частица со скоростью  $u'_x = \frac{dx'}{dt'}$ . Составляющие скорости частицы  $u'_y$  и  $u'_z$  равны нулю. Скорость этой частицы в системе  $K$  будет равна  $u_x = \frac{dx}{dt}$ .

С помощью дифференцирования из формул преобразований Лоренца можно найти:

$$u_x = \frac{u'_x + v}{1 + \frac{v}{c^2} u'_x}, \quad u_y = 0, \quad u_z = 0.$$

Эти соотношения выражают релятивистский закон сложения скоростей для случая, когда частица движется параллельно относительной скорости  $\bar{v}$  систем отсчета  $K$  и  $K'$ .

При  $v \ll c$  релятивистские формулы переходят в формулы классической механики:

$$u_x = u'_x + v, \quad u_y = 0, \quad u_z = 0.$$

Если в системе  $K'$  вдоль оси  $x'$  распространяется со скоростью  $u'_x = c$  световой импульс, то для скорости  $u_x$  импульса в системе  $K$  получим:

$$u_x = \frac{c + v}{1 + v/c} = c, \quad u_y = 0, \quad u_z = 0.$$

Таким образом, в системе отсчета  $K$  световой импульс также распространяется вдоль оси  $x$  со скоростью  $c$ , что согласуется с постулатом об инвариантности скорости света.

## § 66. Элементы релятивистской динамики

Принцип относительности Эйнштейна утверждает инвариантность всех законов природы по отношению к переходу от одной инерциальной системы отсчета к другой. Это значит, что все уравнения, описывающие законы природы, должны быть инвариантны относительно преобразований Лоренца. К моменту создания СТО теория, удовлетворяющая этому условию, уже существовала – это электродинамика Максвелла. Однако уравнения классической механики Ньютона оказались неинвариантными относительно преобразований Лоренца, и поэтому СТО потребовала пересмотра и уточнения законов механики.

В основу такого пересмотра Эйнштейн положил требования *выполнимости закона сохранения импульса и закона сохранения энергии* в замкнутых системах. Для того чтобы закон сохранения импульса выполнялся во всех инерциальных системах отсчета, оказалось необходимым изменить определение импульса тела. Вместо классического импульса  $\vec{p} = m\vec{v}$  в СТО *релятивистский импульс*  $\vec{p}$  тела с массой  $m$ , движущегося со скоростью  $\vec{v}$ , записывается в виде:

$$\vec{p} = \frac{m\vec{v}}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} = \frac{m\vec{v}}{\sqrt{1 - \beta^2}}, \quad (*)$$

где  $\beta = \frac{v}{c}$ .

Закон сохранения суммарного импульса взаимодействующих частиц (например, при соударениях) будет выполняться во всех инерциальных системах, связанных преобразованиями Лоренца. При  $\beta \rightarrow 0$  релятивистский импульс переходит в классический. *Основной закон релятивистской динамики* материальной точки записывается так же, как и второй закон Ньютона:

$$\vec{F} = \frac{d\vec{p}}{dt},$$

но в СТО под  $\vec{p}$  понимается релятивистский импульс частицы.

Следовательно, 
$$\vec{F} = \frac{d}{dt} \left( \frac{m\vec{v}}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \right).$$

Так как релятивистский импульс не пропорционален скорости частицы, скорость его изменения не будет прямо пропорциональна ускорению. Поэтому постоянная по модулю и направлению сила не вызывает равноускоренного движения. Например, в случае *одномерного движения* вдоль

оси  $x$  ускорение частицы  $a = \frac{dv}{dt}$  под действием постоянной силы оказывается равным  $a = \frac{F}{m} \left( 1 - \frac{v^2}{c^2} \right)^{\frac{3}{2}}$ .

Если скорость классической частицы бесконечно растет под действием постоянной силы, то скорость релятивистской частицы не может превысить скорости света  $c$  в пустоте.

**Закон сохранения энергии** в релятивистской механике выполняется так же, как и в механике Ньютона. Кинетическая энергия тела  $E_k$  определяется через работу внешней силы, необходимую для сообщения телу заданной скорости. Чтобы разогнать частицу массы  $m$  из состояния покоя до скорости  $v$  под действием постоянной силы  $F$ , эта сила должна совершить работу:

$$A = \int F dx = \int F v dt = \int \frac{mav dt}{\left( 1 - v^2/c^2 \right)^{\frac{3}{2}}}.$$

Поскольку  $adt = dv$ , окончательно можно записать:

$$E_k = A = \int_0^{v_0} \frac{mvdv}{\left( 1 - v^2/c^2 \right)^{\frac{3}{2}}}.$$

Вычисление этого интеграла приводит к следующему выражению для кинетической энергии (индекс «ноль» при скорости  $v$  опущен):

$$E_k = \frac{mc^2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} - mc^2.$$

Эйнштейн интерпретировал первый член в правой части этого выражения как *полную энергию*  $E$  движущейся частицы, а второй член как *энергию покоя*  $E_0$ :

$$E = \frac{mc^2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}, \quad (**)$$

$$E_0 = mc^2. \quad (***)$$

Кинетическая энергия  $E_k$  релятивистской динамики есть разность между полной энергией  $E$  тела и его энергией покоя  $E_0$ :

$$E_k = E - E_0.$$

Рисунок 10.7 иллюстрирует изменение кинетической энергии частицы в зависимости от ее скорости для частиц, подчиняющихся классическому и релятивистскому законам. При  $v \ll c$  оба закона совпадают.

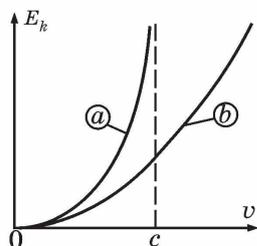


Рис. 10.7. Зависимость кинетической энергии от скорости для релятивистской (a) и классической (b) частиц.

**Закон взаимосвязи массы и энергии.** Важным выводом релятивистской механики является вывод о том, что *находящаяся в покое масса  $m$  содержит огромный запас энергии*. Это утверждение получило разнообразные практические применения, включая использование ядерной энергии. Если масса частицы или системы частиц уменьшилась на  $\Delta m$ , то при этом должна выделиться энергия  $\Delta E = \Delta mc^2$ . Многочисленные прямые эксперименты дают убедительные доказательства существования *энергии покоя*.

Масса тела характеризует его инертность, а также способность тела вступать в гравитационное взаимодействие с другими телами. Важнейшим свойством энергии является ее способность превращаться из одной формы в другую в эквивалентных количествах при различных физических процессах — в этом заключается содержание закона сохранения энергии. Пропорциональность массы и энергии является выражением внутренней сущности материи. Формула Эйнштейна  $E_0 = mc^2$  выражает фундаментальный закон природы, который принято называть **законом взаимосвязи массы и энергии**.

**Безмассовые частицы.** Комбинируя выражение (\*) для релятивистского импульса и выражение (\*\*) для полной энергии  $E$ , можно получить соотношение, связывающее эти величины. Для этого удобно соотношения (\*) и (\*\*) переписать в следующем виде:

$$\left(\frac{p}{mc}\right)^2 = \frac{v^2/c^2}{1 - v^2/c^2}, \quad (*)$$

$$\left(\frac{E}{mc^2}\right)^2 = \frac{1}{1 - v^2/c^2}. \quad (**)$$

Вычитая почленно эти соотношения, можно получить:

$$E^2 = (mc^2)^2 + (pc)^2.$$

Отсюда еще раз следует, что для покоящихся частиц ( $p = 0$ )  $E = E_0 = mc^2$ .

Полученное соотношение показывает, что частица может иметь энергию и импульс, но не иметь массы ( $m = 0$ ). Такие частицы называются *безмассовыми*. Для безмассовых частиц связь между энергией и импульсом выражается простым соотношением:

$$E = pc.$$

К безмассовым частицам относятся фотоны — кванты электромагнитного излучения и, возможно, нейтрино. Безмассовые частицы не могут существовать в состоянии покоя, во всех инерциальных системах отсчета они движутся с предельной скоростью  $c$ .

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ К ГЛАВЕ X

1. Сформулируйте постулаты теории относительности и объясните их сущность.
2. В чем заключается относительность одновременности событий?
3. В чем заключается относительность длин (расстояний)? Какая формула выражает смысл этого понятия? В чем заключается релятивистский эффект сокращения длины тел?
4. В чем заключается суть относительности промежутков времени? Какая формула выражает смысл этого понятия? В чем заключается релятивистский эффект замедления времени?
5. Как записывается и формулируется классический закон сложения скоростей? Запишите релятивистский закон сложения скоростей.

6. Докажите соответствие релятивистского закона сложения скоростей и второго постулата теории относительности.
7. Как записывается второй закон Ньютона в релятивистском виде?
8. В чем состоит релятивистский закон взаимосвязи массы и энергии?
9. Что называют энергией покоя? Какая формула выражает смысл этого понятия?
10. Что характерно для частиц с нулевой массой?

### ТЕСТОВЫЕ ЗАДАНИЯ К ГЛАВЕ X

1. (96/5-76). Всегда ли верны законы механики Ньютона?
  - A) не всегда; верны только при движении тел со скоростями, много меньшими скорости света.
  - B) не всегда; верны только в инерциальных системах отсчета.
  - C) не всегда; верны относительно абсолютных (покоящихся) систем отсчета.
  - D) не всегда; верны относительно определенных систем отсчета.
  - E) верны всегда.
2. (98/2-57). Какие из приведенных утверждений являются постулатами теории относительности: 1) все процессы природы протекают одинаково в любой инерциальной системе отсчета; 2) скорость света в вакууме одинакова для всех инерциальных систем отсчета; 3) все процессы природы относительно абсолютных систем отсчета; 4) скорость света зависит от выбора системы отсчета?
  - A) 3,4.    B) 1,2.    C) 1.    D) 2.    E) 3.
3. (96/10-44). С какой скоростью относительно Земли должен лететь космический корабль, чтобы земному наблюдателю его длина показалась в 2 раза меньше, чем космонавту?  $c$  — скорость света.
  - A)  $c$ .    B)  $\sqrt{3} c/2$ .    C)  $\sqrt{2} c/2$ .    D)  $c/4$ .    E)  $c/2$ .
4. (96/8-57). Чему равна длина стержня (см), движущегося со скоростью  $0,6 c$  ( $c$  — скорость света в вакууме), если длина покоящегося стержня равна 1 м?
  - A) 80.    B) 84.    C) 89.    D) 90.    E) 95.
5. (03/6-58). На сколько процентов сокращается длина тела в направлении движения, если его скорость равна  $2,4 \cdot 10^8$  м/с?
  - A) 80.    B) 60.    C) 40.    D) 30.    E) 20.
6. (03/4-59). Какой должна быть скорость тела, чтобы его продольный размер уменьшился на 20 %?  $c$  — скорость света в вакууме.
  - A)  $0,2c$ .    B)  $0,6c$ .    C)  $0,4c$ .    D)  $0,7c$ .    E)  $0,8c$ .
7. (96/3-47). С какой скоростью должен лететь космический корабль, чтобы пройденный путь, измеренный с Земли, был в

2 раза больше, чем это расстояние, измеренное с корабля? ( $c$  — скорость света).

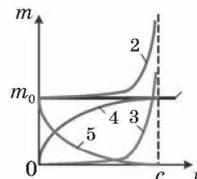
- А)  $c$ .      В)  $0,15c$ .      С)  $0,87c$ .      D)  $1,7c$ .  
 E) пройденный путь не зависит от места измерения.

8. (96/5-55). Сколько времени пройдет на звездолете, движущемся относительно Земли со скоростью  $0,99c$ , если на Земле прошло 70 лет? ( $c$  — скорость света в вакууме).

- А) 10 часов.      В) 1 год.      С) 10 лет.      D) 20 лет.      E) 70 лет.

9. (96/15-54). Какой из пяти графиков, показанных на рисунке, правильно изображает зависимость массы от времени?

- А) 5.      В) 4.      С) 3.      D) 2.      E) 1.



10. (96/5-56). Во сколько раз масса электрона больше его массы покоя, если он движется со скоростью  $0,87c$ ? ( $c$  — скорость света в вакууме).

- А) 2,0.      В) 2,5.      С) 4,0.      D) 5,0.      E) 10,0.

11. (96/7-55). Если ускорить протон до скорости  $0,8c$  ( $c$  — скорость света в вакууме), чему станет равной его масса? (массу покоя протона считать равной 1 а.е.м.).

- А) 2,6 а.е.м.      С) 1,9 а.е.м.      E) 0,45 а.е.м.  
 В) 1,7 а.е.м.      D) 1,4 а.е.м.

12. (96/7-117). Как изменится масса электрона, если скорость его движения достигнет значения  $0,6c$ ? ( $c$  — скорость света в вакууме).

- А) возрастет в 1,5 раза.      D) возрастет в 3 раза.  
 В) не изменится.      E) возрастет в 2,5 раза.  
 С) возрастет в 1,25 раза.

13. (96/5-126). Ионизованный атом, вылетев из ускорителя со скоростью  $v = 0,89c$ , испустил фотон в направлении своего движения. Какова скорость фотона относительно ускорителя? ( $c$  — скорость света в вакууме).

- А)  $0,44c$ .      В)  $0,5c$ .      С)  $0,89c$ .      D)  $0,95c$ .      E)  $c$ .

14. (96/5-127). Как сказывается быстрое, близкое к скорости света, движение тела на плотности вещества этого тела?

- А) плотность не меняется.  
 В) плотность уменьшается.  
 С) плотность возрастет.  
 D) у половины тела плотность возрастает, у другой половины — убывает.  
 E) плотность меняется периодически.

15. (98/6-68). Во сколько раз масса электрона, движущегося со скоростью  $0,6c$ , будет больше его массы покоя?

- А) 6.      В) 3.      С) 2,4.      D) 1,8.      E) 1,25.

16. (03/7-65). Две частицы движутся навстречу друг другу со скоростями  $5c/8$ . Какова их относительная скорость?

- А)  $0,5c$ .    В)  $0,6c$ .    С)  $0,7c$ .    D)  $0,9c$ .    E)  $1,25c$ .

17. (03/11-35). Две галактики движутся в противоположных направлениях со скоростью  $c/3$  каждая в неподвижной системе отсчета. Определите относительную скорость этих галактик.

- А)  $\frac{3}{5}c$ .    В)  $\frac{3}{4}c$ .    С)  $\frac{2}{3}c$ .    D)  $\frac{1}{3}c$ .    E)  $\frac{4}{5}c$ .

18. (03/10-51). Из космического корабля, движущегося со скоростью  $v$ , в направлении движения отправили световой импульс. Какова скорость этого импульса относительно корабля, если его скорость относительно неподвижной системы отсчета равна  $c$ ?

- А)  $v$ .    В)  $c$ .    С)  $c - v$ .    D)  $c + v$ .    E)  $(c + v)/2$ .

19. (03/5-57). Масса покоя частицы  $m$ . Определите ее массу при скорости  $0,6c$  ( $c$  — скорость света в вакууме).

- А)  $1,83m$ .    В)  $1,67m$ .    С)  $1,25m$ .    D)  $2,78m$ .    E)  $1,56m$ .

20. (03/6-57). На сколько процентов масса частицы, движущейся со скоростью  $1,8 \cdot 10^8$  м/с, больше, чем ее масса покоя?

- А) 60.    В) 54.    С) 36.    D) 25.    E) 18.

21. (03/4-58). При какой скорости частицы ее масса будет на 40 % больше ее массы покоя?  $c$  — скорость света в вакууме.

- А)  $0,4c$ .    В)  $0,6c$ .    С)  $0,64c$ .    D)  $0,7c$ .    E)  $0,8c$ .

22. (01/1-4). Что содержит больше энергии: 1 кг воды ( $E_1$ ), 1 кг угля ( $E_2$ ) или 1 кг бензина ( $E_3$ )?

- А)  $E_1 < E_2 < E_3$ .    С)  $E_1 = E_2 = E_3$ .    E)  $E_1 < E_3 < E_2$ .  
В)  $E_1 < E_2 = E_3$ .    D)  $E_1 > E_2 > E_3$ .

23. (01/1-3). Сколько всего энергии содержится в угле массой  $m$ ? ( $c$  — скорость света,  $\Delta t$  — разность температур,  $\lambda$  — удельная теплота плавления,  $q$  — удельная теплота сгорания).

- А)  $mc^2$ .    В)  $mq$ .    С)  $mc \Delta t$ .    D)  $mc^2/2$ .    E)  $m \lambda$ .

24. (03/5-67). Во сколько раз кинетическая энергия частицы при скорости  $0,6c$  меньше ее энергии покоя?  $c$  — скорость света в вакууме?

- А) 2.    В) 3.    С) 3,6.    D) 4.    E) 6.

25. (03/4-53). При какой скорости кинетическая энергия частицы будет в 2 раза больше ее энергии покоя?  $c$  — скорость света в вакууме.

- А)  $\frac{\sqrt{3}}{3}c$ .    В)  $\frac{2\sqrt{2}}{3}c$ .    С)  $c/3$ .    D)  $\frac{\sqrt{2}}{3}c$ .    E)  $c/2$ .

26. (98/12- ). На сколько увеличится масса пружины жесткостью 20 кН/м при удлинении на 30 см?

- А)  $2 \cdot 10^{-15}$  кг.      С) 6 мг.      Е) не изменится.  
В)  $4,5 \cdot 10^{-16}$  кг.      D)  $1 \cdot 10^{-14}$  кг.

27. (03/7-64). На сколько (кг) возрастает масса 1 кг воды при повышении ее температуры на 81 К?  $c = 4200$  Дж/(кг·К).

- А)  $3,78 \cdot 10^{-12}$ .      С)  $8,1 \cdot 10^{-13}$ .      Е)  $4,2 \cdot 10^{-13}$ .  
В)  $2,8 \cdot 10^{-13}$ .      D)  $3,78 \cdot 10^{-13}$ .

28. (03/11-36). Азот массой 20 кг нагревается при постоянном давлении от 0°C до 200°C. На сколько увеличится масса азота? Удельная теплоемкость азота при постоянном давлении равна 1,05 кДж/(кг·К).

- А)  $4,7 \cdot 10^{-5}$  г.      В)  $4,7 \cdot 10^{-11}$  г.      С) 0.      D) 4,7 мг.      Е)  $4,7 \cdot 10^{-8}$  г.

29. (96/7-56). Мощность излучения Солнца  $3,83 \cdot 10^{26}$  Вт. Какую массу (кг) теряет Солнце в результате излучения за 1 с?

- А)  $22 \cdot 10^{11}$ .      В)  $3,5 \cdot 10^8$ .      С)  $1,7 \cdot 10^5$ .      D)  $15 \cdot 10^{10}$ .      Е)  $4,3 \cdot 10^9$ .

30. (02/10-53). Тело движется со скоростью 0,89 с. Как изменилась его плотность по сравнению с состоянием покоя? ( $c$  — скорость света в вакууме).

- А) не изменилась.      D) увеличилась в 5 раз.  
В) увеличилась в 10 раз.      Е) уменьшилась в 5 раз.  
С) уменьшилась в 10 раз.

31. (97/12-65). Мюон, рождающийся в верхних слоях атмосферы, пролетает до распада 5 км. Определите, с какой скоростью летит мюон, если его собственное время жизни 2 мкс. ( $c$  — скорость света).

- А)  $0,99c$ .      В)  $0,95c$ .      С)  $0,86c$ .      D)  $0,8c$ .      Е)  $0,5c$ .

32. (97/9-50). Найдите скорость кометы относительно наблюдателя, если «видимая» длина кометы  $l$  меньше собственной длины кометы  $l_0$  в  $\sqrt{2}$  раза, ( $c$  — скорость света).

- А)  $c/4$ .      В)  $c/2$ .      С)  $c/2$ .      D)  $c/2$ .      Е)  $c$ .

33. (97/6-53). Два космических корабля стартуют с Земли в противоположных направлениях, каждый со скоростью 0,5с относительно Земли. Чему равна скорость первого корабля относительно второго?

- А)  $c$ .      В) 0.      С)  $0,8c$ .      D)  $8c$ .      Е)  $0,5c$ .

34. (97/3-55). Во сколько раз масса протона больше его массы покоя, если он движется со скоростью 240000 км/с? Скорость света в вакууме 300000 км/с.

- А) 1,67.      В) 0,60.      С) 0,48.      D) 2,24.      Е) 1,00.

## Глава XI. ИЗЛУЧЕНИЯ И СПЕКТРЫ

### § 67. Спектры. Спектральный анализ

Для наблюдения спектров пользуются спектральными приборами — спектроскопом или спектрографом (рис. 9.23). Если спектроскоп предназначен для измерений, то на изображение спектра накладывается изображение градуированной шкалы, что позволяет точно установить положение цветных линий в спектре.

Материалом для призмы должно служить вещество с большой дисперсией, т. е. вещество, дающее широкий спектр. Прибор для фотографирования спектров называется *спектрографом*, экран при фотографировании заменяют фотопластинкой.

**Виды спектров.** Спектры, полученные от светящихся тел, называются *спектрами испускания*. Спектры испускания бывают трех типов: *сплошные*, *линейчатые* и *полосатые*.

**Сплошные спектры** получаются от светящихся, например, в результате их нагревания, твердых и жидких тел (рис. 11.1).



Рис. 11.1. Спектры испускания: 1 — сплошной; 2 — натрия; 3 — водорода; 4 — гелия.

**Линейчатые спектры** состоят из узких линий различных цветов, разделенных темными промежутками. Такие спектры получаются от светящихся газов или паров. Свечение газа можно вызвать, пропуская через него электрический ток. Линейчатые спектры паров и газов можно получить и при их нагревании, например, в пламени горелки. Таким же путем можно получить линейчатые спектры веществ, которые в обычных условиях находятся в твердом или жидком состоянии. Для этого крупинки твердых веществ или смоченный жидкостью асбест вводят в

пламя газовой горелки. Испаряющиеся в пламени горелки вещества дают линейчатый спектр. Например, в спектре излучения паров натрия видны две близко расположенные светлые желтые линии.

*Каждый химический элемент дает свой линейчатый спектр, несовпадающий со спектрами других элементов.*

Характерные для каждого химического элемента спектральные линии получаются не только в видимой, но также в инфракрасной и в ультрафиолетовой областях спектра.

Линейчатые спектры создаются излучением отдельных атомов химических элементов, не связанных в молекулы. Это излучение связано с процессами, происходящими внутри атомов. Исследование линейчатых спектров позволило установить строение электронных оболочек атомов различных химических элементов.

**Полосатые спектры** состоят из ряда светлых полос, разделенных темными промежутками. Полосатые спектры создаются излучением молекул. При рассмотрении в спектроскоп с большой разрешающей способностью полосы разделяются на ряд линий.

Прозрачные вещества поглощают часть падающего на них излучения и в спектре, полученном после прохождения белого света через такие вещества, часть цветов исчезает, т. е. появляются темные линии, или полосы поглощения. Такой спектр называется **спектром поглощения**.

Пропустим свет дуговой лампы через сосуд с парами натрия. В сплошном спектре белого света от электрической дуги при этом получают две темные линии (рис. 11.2, 6) как раз в том месте экрана (рис. 11.1, 2), где находились желтые линии спектра испускания паров натрия.

Возникновение этих линий объясняется тем, что атомы натрия из всего проходящего излучения поглощают то,

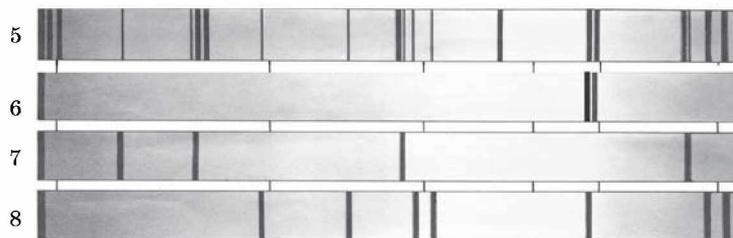


Рис. 11.2. Спектры поглощения: 5 — солнечный; 6 — натрия; 7 — водорода; 8 — гелия.

Спектральный анализ в основном носит качественный характер, то есть позволяет определить наличие того или иного вещества. В настоящее время разработаны методы количественного спектрального анализа, позволяющие по интенсивности свечения спектральных линий химического элемента определить его процентное содержание в исследуемом образце.

Достоинства спектрального анализа — высокая чувствительность, простота и быстрота проведения анализа — делают его удобным для использования в металлургии и в машиностроении, химии и геологии, медицине и биологии и многих других областях науки и техники.

### § 68. Инфракрасное и ультрафиолетовое излучения

Важной характеристикой излучения является распределение испускаемой в единицу времени энергии по длинам волн и частотам.

Чтобы установить, какие лучи приносят на экран больше энергии, а какие меньше, пользуются термопарой  $T$  со спаем, покрытым сажей (рис. 11.3). Черный спай поглощает падающее на него излучение и нагревается. Возникающую при этом ЭДС измеряют милливольтметром  $G$ . Чем больше энергии приносит излучение, тем большая ЭДС возникает в термопаре.

Перемещая спай термопары вдоль спектра, получают кривую распределения энергии в спектре (рис. 11.4), показывающую, что большая часть энергии приходится на красную часть спектра.

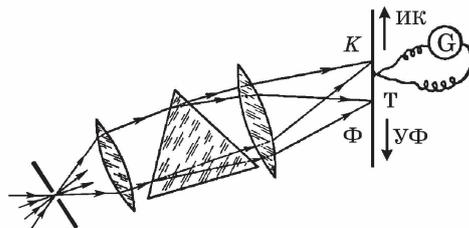


Рис.11.3

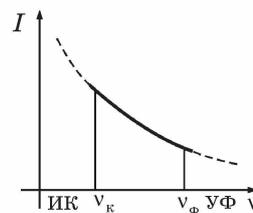


Рис.11.4

Исследования спектра белого света показали, что за красной областью спектра спай термопары нагревается еще больше, чем в красной. Спай термопары сильно нагревается, даже когда он находится далеко за красной обла-

тью видимого спектра, там, где глаз ничего не видит. Это означает, что в спектре белого света за красными лучами находятся невидимые лучи, длина волны которых больше, чем у красных лучей.

Невидимые лучи, которые в спектре располагаются за красными лучами, называют *инфракрасными* (от лат. «инфра» — под). Они обладают ярко выраженным тепловым действием, поэтому их называют еще *тепловыми*. Инфракрасные лучи преломляются слабее красных и имеют длины волн от 0,76 мкм примерно до 1 мм.

Невидимые лучи, расположенные за крайней фиолетовой областью спектра, называют *ультрафиолетовым* (от лат. «ультра» — сверх). Они преломляются сильнее фиолетовых лучей, имеют более короткую длину волны, примерно от 0,4 до 0,01 мкм. Короткие волны обладают ярко выраженным химическим действием, например, вызывают почернение светочувствительной бумаги. Эта бумага чернеет и тогда, когда она расположена за крайними фиолетовыми лучами спектра, там, где глаз ничего не видит.

*Инфракрасное излучение испускают все тела в природе*, так как их возникновение обусловлено хаотическим движением молекул и атомов в любом веществе. При повышении температуры энергия инфракрасного излучения тела быстро возрастает.

С помощью излучения Земля получает энергию от Солнца. Солнце испускает интенсивные инфракрасное и ультрафиолетовое излучения.

Инфракрасное излучение Земли уносит энергию в мировое пространство, что способствует охлаждению поверхности Земли. Именно поэтому в пустынях, где атмосфера прозрачна, ночью становится холодно, хотя днем бывает очень жарко. Если есть облака, инфракрасное излучение с поверхности Земли отражается от них и потери энергии в мировое пространство уменьшаются.

Ультрафиолетовое излучение, которое имеется в солнечном излучении, сильно поглощается атмосферой, и у поверхности Земли его интенсивность сравнительно невелика. Высоко в горах интенсивность ультрафиолетового излучения значительно больше. Ультрафиолетовое излучение убивает бактерии, т. е. является хорошим дезинфектором. В небольших дозах оно полезно человеку.

В технике инфракрасное излучение используют для сушки материалов, например, пищевых продуктов, для сигнализации при плохой видимости, для фотографирования в

темноте и т. д. В военном деле это излучение используется в работе приборов ночного видения, для наведения на цель снарядов и ракет и т. д. В науке это излучение позволяет определить различные температуры отдельных участков поверхности планет, например Марса, особенности строения молекул вещества и др.

Ультрафиолетовое излучение используется в фотографии, для обнаружения скрытых надписей или стёртого текста, так как многие вещества при поглощении ультрафиолетового излучения начинают испускать видимый свет. Это же явление используется в лампах дневного света и во многих других случаях. Ультрафиолетовое излучение используется для изучения строения наружных электронных оболочек атомов. В медицине его применяют при лечении некоторых заболеваний.

## § 69. Рентгеновское излучение

В 1895 г. немецкий физик В. Рентген обнаружил, что при бомбардировке стекла и металлов быстрыми электронами возникает излучение, обладающее большой проникающей способностью. Сам Рентген назвал открытое им излучение X-лучами (икс-лучами). Впоследствии оно получило название *рентгеновских лучей*. Исследования показали, что рентгеновское излучение представляет собой электромагнитное излучение с длиной волны в пределах от  $10^{-5}$  до  $10^2$  нм.

Рентгеновская трубка (рис. 11.5) представляет собой вакуумный баллон с несколькими электродами.

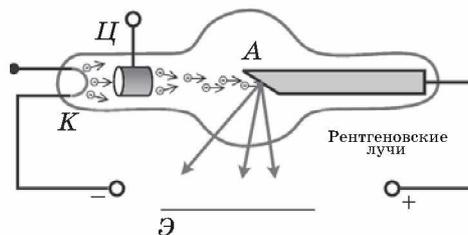


Рис. 11.5.

Нагреваемый током катод  $K$  служит источником свободных электронов, испускаемых вследствие термоэлектронной эмиссии. Цилиндрический электрод  $Ц$  предназначен для фокусировки электронного пучка. Мишенью является анод  $A$ .

ляется анод  $A$  из тяжелых металлов ( $W$ ,  $Cu$ ,  $Pt$  и т. д.). Ускорение электронов осуществляется высоким напряжением, создаваемым между катодом и анодом (50–200 кВ). Почти вся энергия электронов выделяется на аноде в виде теплоты (в излучение превращается лишь 1–3 % энергии). Поэтому в мощных трубках анод приходится интенсивно охлаждать. С этой целью в теле анода делаются каналы, по которым циркулирует охлаждающая жидкость (вода или масло). Рентгеновское излучение улавливается с помощью люминесцентного экрана  $\mathcal{E}$  или фотопластинки.

Рентгеновские трубки с накаливаемым катодом сами являются выпрямителями, и их можно питать переменным током. Если между катодом и анодом приложено напряжение  $U$ , электрическое поле совершает работу  $eU$  и разгоняет электроны до энергии  $\frac{m_e v^2}{2}$ . Попадая в вещество анода, электроны испытывают сильное торможение и становятся источником электромагнитных волн, излучая квант с энергией  $h\nu$ . Согласно закону сохранения энергии,

$$eU = \frac{m_e v^2}{2} = h\nu.$$

Излучение, обусловленное торможением электронов, называется *тормозным излучением*. Тормозное излучение рентгеновской трубки имеет сплошной спектр.

При достаточно большой скорости электронов, кроме тормозного излучения, возбуждается также *характеристическое излучение*, вызванное возбуждением внутренних электронных оболочек атомов анода. Такое рентгеновское излучение имеет строго определенные длины волн, характерные только для данного химического элемента вещества анода, поэтому оно называется характеристическим. Характеристическое излучение имеет линейчатый спектр, накладывающийся на сплошной спектр тормозного излучения. При увеличении порядкового номера элемента в таблице Менделеева рентгеновский спектр излучения его атомов сдвигается в сторону коротких длин волн. Легкие элементы (например, алюминий) вообще не дают характеристического рентгеновского излучения. Рентгеновское излучение различают по *жесткости*: чем короче длина волны (больше частота) рентгеновского излучения, тем оно считается более жестким и тем выше его *проникающая способность*. Наиболее жесткое рентгеновское излучение испускается тяжелыми атомами.

Даже мягкое рентгеновское излучение имеет длины волн в десятки и сотни раз более короткие, чем у видимого света (рентгеновское излучение имеет длину волны от 10 до 0,01 нм). Поэтому долгое время не удавалось наблюдать дифракцию рентгеновских лучей, используя дифракционные решетки, предназначенные для измерения длин световых волн.

В 1912 г. немецкий физик М. Лауэ предложил использовать для получения дифракции рентгеновского излучения естественные кристаллические решетки. Расстояние между узлами решетки в естественных кристаллах соизмеримо с длинами волн рентгеновского излучения, т. е. кристаллы могут служить для них «готовыми», дифракционными решетками.

Опыты Лауэ показали, что рентгеновское излучение представляет собой электромагнитные волны. Дифракция рентгеновского излучения используется для определения его длин волн (рентгеновский спектральный анализ) и, наоборот, пропуская рентгеновское излучение известной длины волны через исследуемый кристалл, по дифракционной картине можно установить взаимное расположение атомов и расстояние между ними в кристаллической решетке (рентгеноструктурный анализ).

Рентгеновское излучение действует не только на экран, но и на фотопленку, что позволяет делать рентгеновские снимки. Рентгеновское излучение применяют в медицине для диагностики различных заболеваний. Однако большая доза рентгеновского излучения вредно действует на развитие клеток, это используется при лечении злокачественных опухолей.

Рентгеновское излучение широко применяют в промышленности для выявления внутренних дефектов изделий.

## § 70. Шкала электромагнитных волн

Рисунок 11.6. дает представление о шкале электромагнитных волн. Различные участки спектра отличаются друг от друга только длиной волны  $\lambda$  и частотой  $\nu$ . Границы между различными диапазонами условны.

Принято выделять низкочастотное излучение, радиоизлучение, инфракрасные лучи, видимый свет, ультрафиолетовые лучи, рентгеновские лучи и  $\gamma$ -излучение. Самое коротковолновое  $\gamma$ -излучение испускают атомные ядра. Свет

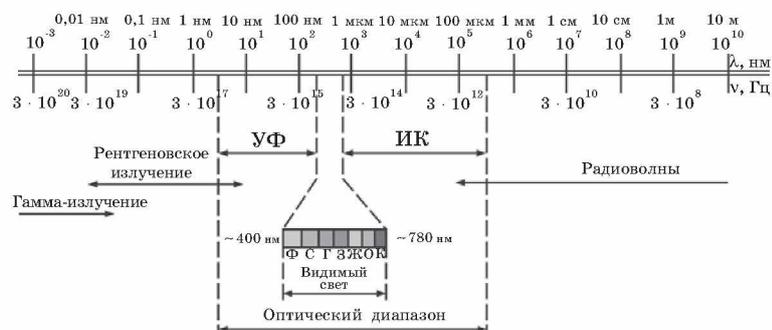


Рис. 11.6

составляет очень узкую часть широкого спектра электромагнитных волн. Принципиального различия между отдельными излучениями нет. Все они представляют собой электромагнитные волны, порождаемые ускоренно движущимися заряженными частицами. Обнаруживаются электромагнитные волны, в конечном счете, по их действию на заряженные частицы.

Излучения различной длины волны отличаются друг от друга по способу их получения (излучение антенны, тепловое излучение, излучение при торможении быстрых электронов и др.) и методам регистрации.

По мере уменьшения длины волны *количественные различия в длинах волн приводят к существенным качественным различиям.*

Излучения различной длины волны очень сильно отличаются друг от друга по поглощению их веществом. Коротковолновые излучения (рентгеновское и особенно  $\gamma$ -лучи) поглощаются слабо. Непрозрачные для волн оптического диапазона вещества прозрачны для этих излучений.

Участки шкалы, где диапазоны волн разных типов перекрывают друг друга, показывают, что волны таких длин можно получить двумя способами. Например, волны длиной 0,1 мм можно получить с помощью искусственного вибратора и при тепловом излучении. Физические свойства этих волн совершенно одинаковы, так как они определяются длиной волны, а не методом их возбуждения.

Диапазон видимого света составляет очень малую часть спектра электромагнитных волн.

Исследования электромагнитного излучения уточняют наши представления о строении вещества. Так, исследова-

ния инфракрасного, видимого и ультрафиолетового излучения помогли выяснить строение атомов, молекул и внешних электронных оболочек атомов; изучение рентгеновского излучения позволило установить строение внутренних электронных оболочек атомов и структуру кристаллов, а изучение  $\gamma$ -лучей дает сведения о строении атомных ядер.

### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ К ГЛАВЕ XI

1. Какими приборами пользуются для наблюдения спектров? Назовите основные элементы этих приборов.
2. Что называют спектром излучения?
3. Назовите виды спектров излучения. Каким веществам характерен тот или иной вид спектра?
4. Как распределяется энергия излучения в сплошном спектре? С помощью какого опыта это можно установить?
5. Что называют спектром поглощения?
6. Сравните спектры излучения и спектры поглощения одного вещества.
7. В чем суть явления обращения спектральных линий в спектрах испускания и поглощения?
8. Объясните распределение энергии в линейчатых спектрах испускания и поглощения.
9. Что называют спектральным анализом? На чем он основан?
10. Назовите достоинства спектрального анализа и направления его применения.
11. Как на опыте доказывается существование инфракрасного и ультрафиолетового излучений?
12. Что является источником инфракрасных лучей?
13. Опишите свойства инфракрасных лучей и где они применяются?
14. Какое излучение называют ультрафиолетовым излучением?
15. Какими свойствами обладают и где применяются ультрафиолетовые лучи?
16. Объясните устройство и принцип работы рентгеновской трубки.
17. Назовите основные свойства рентгеновских лучей и направления их применения.
18. Рентгеновские лучи — это частицы или волны? Какие опыты позволили выявить природу рентгеновских лучей?
19. Какие виды электромагнитных волн излучаются электрическими вибраторами?
20. Какие виды электромагнитных волн излучаются молекулами, атомами и ядрами?
21. На какие виды излучений принято делить шкалу электромагнитных волн?
22. Перечислите виды электромагнитных излучений по мере убывания длины волны.

## ТЕСТОВЫЕ ЗАДАНИЯ К ГЛАВЕ XI

1. (00/3-51). Какое из приведенных ниже видов излучения является тепловым?
- А) свечение экрана телевизора.
  - В) северное сияние.
  - С) излучение лампы дневного света.
  - Д) излучение Солнца.
  - Е) рентгеновское излучение.
2. (04/3-48). В каком состоянии вещества спектр излучения будет полосатым?
- А) в молекулярном газообразном.
  - В) в жидком.
  - С) в твердом.
  - Д) в твердом и в жидком.
  - Е) в атомарном газообразном.
3. (01/7-23). Найдите отношение энергии кванта ультрафиолетового ( $\lambda_{\text{уф}} = 100$  нм) излучения к энергии кванта инфракрасного ( $\lambda_{\text{ик}} = 10^4$  нм) излучения.
- А) 500.
  - В) 100.
  - С) 50.
  - Д) 200.
  - Е) 1000.
4. (96/7-57). Чему будет равна скорость электронов (Мм/с), доходящих до анода рентгеновской трубки, если анодное напряжение 2 кВ?  $q = -1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл,  $m = 9,1 \cdot 10^{-31}$  кг.
- А) 0,128.
  - В) 1,30.
  - С) 13,5.
  - Д) 26,5.
  - Е) 132.
5. (96/7-58). Максимальная частота рентгеновского излучения равна  $10,8 \cdot 10^{18}$  Гц. Под каким напряжением (кВ) работает рентгеновская трубка?  $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$  Дж·с,  $e = -1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл.
- А) 4,5.
  - В) 45.
  - С) 410.
  - Д) 144.
  - Е) 240.
6. (97/4-57). От чего зависит коротковолновая граница спектра рентгеновских лучей, полученных в рентгеновской трубке?
- А) от числа электронов в рентгеновской трубке.
  - В) от вещества катода.
  - С) от вещества анода.
  - Д) от напряжения между анодом и катодом.
  - Е) от тока между анодом и катодом.
7. (01/10-26). Найдите импульс (в кг·м/с) кванта рентгеновского излучения с длиной волны  $\lambda = 4 \cdot 10^{-11}$  м.  $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$  Дж·с.
- А)  $1,65 \cdot 10^{-21}$ .
  - В)  $1,75 \cdot 10^{-22}$ .
  - С)  $1,6 \cdot 10^{-22}$ .
  - Д)  $1,65 \cdot 10^{-24}$ .
  - Е)  $1,65 \cdot 10^{-23}$ .
8. (03/1-82). Какова минимальная длина волны рентгеновского излучения (в метрах), если напряжение на рентгеновской трубке равно 40 кВ?  $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$  Дж·с.

- A)  $6,62 \cdot 10^{-18}$ .      C)  $4 \cdot 10^{-12}$ .      E)  $3,1 \cdot 10^{-11}$ .  
B)  $1,4 \cdot 10^{-11}$ .      D)  $3,31 \cdot 10^{-12}$ .

9. (00/7-47). Во сколько раз энергия рентгеновского кванта с длиной волны  $10^{-10}$  м больше энергии кванта света с длиной волны 0,4 мкм?

- A) 4000.    B) 4100.    C) 4200.    D) 4500.    E) 4150.

10. (04/1-77). Какое из следующих излучений обладает наименьшей длиной волны?

- A) радиоволны.      C)  $\gamma$ -лучи.      E) инфракрасное.  
B) ультрафиолетовое.    D) рентгеновское.

11. (00/4-39). В каком из приведенных перечней электромагнитные волны перечислены в порядке уменьшения их длин?

- A) ультрафиолетовые, световые, радиоволны.  
B) радиоволны, световые, ультрафиолетовые.  
C) рентгеновские, радиоволны, световые.  
D) гамма-излучение, световые, рентгеновские.  
E) световые, гамма-излучение, рентгеновские.

12. (97/2-57). Какое из ниже перечисленных тел не излучает электромагнитных волн?

- A) телевизор.  
B) электрический чайник.  
D) деревянный стол.  
C) металлический стул.  
E) излучают все.

13. (97/11-46). С какими из перечисленных излучений может происходить дифракция: 1) световые лучи; 2) радиоволны; 3) рентгеновские лучи; 4) инфракрасные лучи?

- A) 1.    B) 1,2.    C) 1,2,3.    D) 1,3,4.    E) 1,2,3,4.

14. (97/11-48). Какой из ниже перечисленных лучей имеет наименьшую длину волны: 1) ультрафиолетовый; 2) инфракрасный; 3) видимый; 4) радиоволны; 5) рентгеновский?

- A) 1.    B) 2.    C) 3.    D) 4.    E) 5.

## Глава XII. КВАНТОВАЯ ФИЗИКА

В декабре 2000 года мировая научная общественность отмечала столетний юбилей возникновения новой науки — *квантовой физики*. Заслуга в этом принадлежит выдающемуся немецкому физическому Макс Планку. Ему удалось решить проблему спектрального распределения света, излучаемого нагретыми телами, проблему, перед которой классическая физика оказалась бессильной. Планк первым высказал гипотезу о квантовании энергии осциллятора (системы, совершающей гармонические колебания), несовместимую с принципами классической физики. Именно эта гипотеза, развитая впоследствии трудами многих выдающихся физиков, дала толчок процессу пересмотра и ломки старых понятий, который завершился созданием квантовой физики.

### § 71. Тепловое излучение тел

Испускаемый источником свет уносит с собой энергию. Существует много различных механизмов подвода энергии к источнику света. В тех случаях, когда необходимая энергия сообщается нагреванием, излучение называется *тепловым*. В отличие от всех других видов излучения, тепловое излучение может находиться в состоянии термодинамического равновесия с нагретыми телами.

Если в замкнутую полость с зеркально отражающими стенками поместить несколько тел, нагретых до различной температуры, то такая система с течением времени приходит в состояние теплового равновесия, при котором все тела приобретают одинаковую температуру. Излучение, находящееся в термодинамическом равновесии с телами, имеющими определенную температуру, называется *равновесным*. Плотность энергии равновесного излучения и его спектральный состав зависят только от температуры. Если через малое отверстие заглянуть внутрь полости, в которой установилось термодинамическое равновесие между излучением и нагретыми телами, то глаз не различит очертаний тел и зафиксирует лишь однородное свечение всей полости в целом.

Пусть одно из тел в полости обладает свойством поглощать всю падающую на его поверхность лучистую энергию любого спектрального состава. Такое тело называют *абсолютно черным*.

При заданной температуре собственное тепловое излучение абсолютно черного тела, находящегося в состоянии теплового равновесия с излучением, должно иметь тот же спектральный состав, что и окружающее это тело равновесное излучение. В противном случае равновесие между абсолютно черным телом и окружающим его излучением не могло бы установиться. Поэтому проблема сводится к изучению спектрального состава излучения абсолютно черного тела.

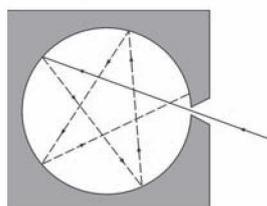


Рис. 12.1

Хорошей моделью абсолютно черного тела является небольшое отверстие в замкнутой полости (рис. 12.1). Свет, падающий через отверстие внутрь полости, после многочисленных отражений будет практически полностью поглощен стенками, и отверстие снаружи будет казаться совершенно черным.

Если полость нагрета до определенной температуры  $T$ , и внутри установилось тепловое равновесие, то собственное излучение полости, выходящее через отверстие, будет излучением абсолютно черного тела. С увеличением температуры внутри полости будет возрастать энергия выходящего из отверстия излучения и изменяться его спектральный состав.

Распределение энергии по длинам волн в излучении абсолютно черного тела при заданной температуре  $T$  характеризуется *излучательной способностью*  $r(\lambda, T)$ , равной мощности излучения с единицы поверхности тела в единичном интервале длин волн.

Произведение  $r(\lambda, T)\Delta\lambda$  равно мощности излучения, испускаемого единичной площадкой поверхности по всем направлениям в интервале  $\Delta\lambda$  длин волн. Аналогично можно ввести распределение энергии по частотам  $r(\nu, T)$ . Функцию  $r(\lambda, T)$  (или  $r(\nu, T)$ ) называют *спектральной светимостью*, а полный поток  $R(T)$  излучения всех длин волн,

$$\text{равный} \quad R(T) = \int_0^{\infty} r(\lambda, T)d\lambda = \int_0^{\infty} r(\nu, T)d\nu ,$$

называют *интегральной светимостью тела*.

**Закон Стефана–Больцмана:** интегральная светимость  $R(T)$  абсолютно черного тела пропорциональна четвертой степени абсолютной температуры  $T$ :

$$R(T) = \sigma T^4 .$$

Числовое значение постоянной  $\sigma$ , по современным измерениям, составляет:

$$\sigma = 5,671 \cdot 10^{-8} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4).$$

Экспериментальные измерения спектрального распределения излучения абсолютно черного тела показали, что при каждом значении температуры  $T$  зависимость  $r(\lambda, T)$  имеет ярко выраженный максимум (рис. 12.2).

С увеличением температуры максимум смещается в область коротких длин волн, причем произведение температуры  $T$  на длину волны  $\lambda_m$ , соответствующую максимуму, остается постоянным:

$$\lambda_m T = b.$$

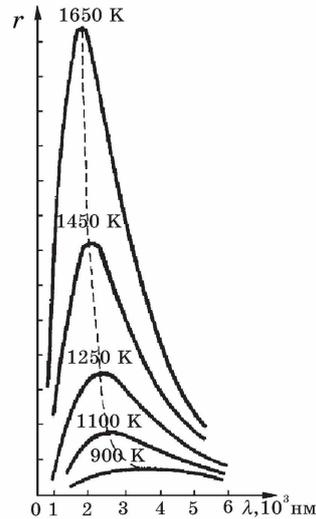


Рис.12.2

**Закон смещения Вина:** длина волны  $\lambda_m$ , на которую приходится максимум энергии излучения абсолютно черного тела, обратно пропорциональна абсолютной температуре  $T$ :  $\lambda_m = b/T$ .

Постоянная Вина  $b = 2,898 \cdot 10^{-3} \text{ м}\cdot\text{К}$ .

При практически достижимых в лабораторных условиях температурах максимум излучательной способности  $r(\lambda, T)$  лежит в инфракрасной области.

Только при  $T \geq 5 \cdot 10^3 \text{ К}$  максимум попадает в видимую область спектра. Максимум энергии излучения Солнца приходится примерно на 470 нм (зеленая область спектра), что соответствует температуре наружных слоев Солнца около 6200 К.

В 1900 г. английский физик Дж. Рэлей, стремясь получить всю кривую спектрального распределения излучения черного тела  $r(\lambda, T)$ , применил теорему классической статистической механики о равномерном распределении энергии по степеням свободы в состоянии термодинамического равновесия к равновесному излучению полости. Эту идею развил Джинс. Таким путем удалось получить зависимость излучательной способности абсолютно черного тела от длины волны  $\lambda$  и температуры  $T$ :

**Формула Рэлей-Джинса:**  $r(\lambda, T) = 8 \pi kT \lambda^{-4}$ .

Она согласуется с экспериментальными данными только в области достаточно длинных волн (рис. 12.3.). Кроме

Здесь  $c$  — скорость света,  $h$  — постоянная Планка,  $k$  — постоянная Больцмана,  $T$  — абсолютная температура.

Формула Планка хорошо описывает спектральное распределение излучения черного тела при любых частотах. Она согласуется с экспериментальными данными. Из формулы Планка можно вывести законы Стефана–Больцмана и Вина. При  $h\nu \ll kT$  формула Планка переходит в формулу Рэля–Джинса.

Решение проблемы излучения черного тела ознаменовало возникновение новой науки — квантовой физики.

## § 72. ФОТОНЫ

Согласно квантовой теории свет при испускании и поглощении ведет себя подобно потоку частиц, получивших название **фотонов**, или **световых квантов**.

Энергия фотонов равна  $E = h\nu$ .

Фотон движется в вакууме со скоростью  $c$ . Фотон не имеет массы покоя,  $m_0 = 0$ . Из общего соотношения специальной теории относительности, связывающего энергию,

импульс и массу любой частицы,  $E = mc^2 = h\nu \Rightarrow m = \frac{h\nu}{c^2}$  и  $E^2 = m^2c^4 + p^2c^2$ , следует, что фотон обладает импульсом:

$$p = \frac{E}{c} = \frac{h\nu}{c}.$$

Таким образом, учение о свете, совершив виток длительностью в два столетия, вновь возвратилось к представлениям о световых частицах — корпускулах.

Это не механический возврат к корпускулярной теории Ньютона. В начале XX века стало ясно, что свет обладает двойственной природой. При распространении света проявляются его волновые свойства (интерференция, дифракция, поляризация), а при взаимодействии с веществом — корпускулярные (фотоэффект). Эта двойственная природа света получила название **корпускулярно-волнового дуализма**. Позже двойственная природа была открыта у электронов и других элементарных частиц. Классическая физика не может дать наглядной модели сочетания волновых и корпускулярных свойств у микрообъектов. Движением микрообъектов управляют не законы классической механики Ньютона, а законы *квантовой механики*. Теория из-

лучения абсолютно черного тела, развитая М. Планком, и квантовая теория фотоэлектрического эффекта Эйнштейна лежат в основании этой современной науки.

### § 73. Фотоэффект

Фотоэлектрический эффект был открыт в 1887 г. немецким физиком Г. Герцем и экспериментально исследован А. Г. Столетовым и независимо Ф. Ленардом.

**Внешний фотоэффект** состоит в выбивании электронов из вещества под действием падающего на него света.

Схема экспериментальной установки для исследования фотоэффекта приведена на рисунке 12.4.

Используется стеклянный вакуумный баллон с двумя металлическими электродами. К электродам прикладывается напряжение  $U$ , полярность которого можно изменять с помощью двойного ключа. Один из электродов (катод  $K$ ) через кварцевое окошко освещается монохроматическим светом длины волны  $\lambda$ , и при неизменном световом потоке снимается зависимость силы фототока  $I$  от приложенного напряжения  $U$ .

На рисунке 12.5 изображены типичные кривые зависимости силы фототока от приложенного напряжения. Кривая 2 соответствует большей интенсивности светового потока.  $I_{н1}$  и  $I_{н2}$  — токи насыщения,  $U_s$  — запирающий потенциал. Кривые показывают, что при достаточно больших положительных напряжениях на аноде  $A$  фототок достигает насыщения, так как все электроны, выбитые светом из катода, достигают анода.

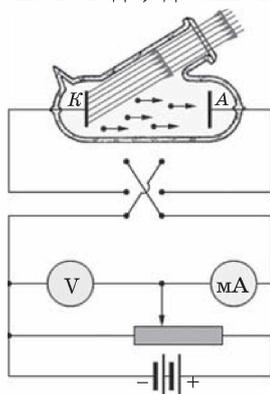


Рис. 12.4

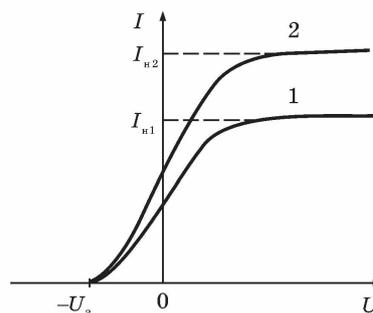


Рис. 12.5

Измерения показали, что ток насыщения  $I_n$  прямо пропорционален интенсивности падающего света.

Когда напряжение на аноде отрицательно, электрическое поле между катодом и анодом тормозит электроны. Анода могут достичь только те электроны, кинетическая энергия которых превышает  $|eU|$ . Если напряжение на аноде меньше, чем  $-U_3$ , фототок прекращается. Измеряя  $U_3$ , можно определить максимальную кинетическую энергию фотоэлектронов:

$$\left(\frac{mv^2}{2}\right)_{\max} = eU_3.$$

Запирающий потенциал  $U_3$  не зависит от интенсивности падающего светового потока и линейно возрастает с увеличением частоты  $\nu$  света (Ленард) (рис. 12.6).

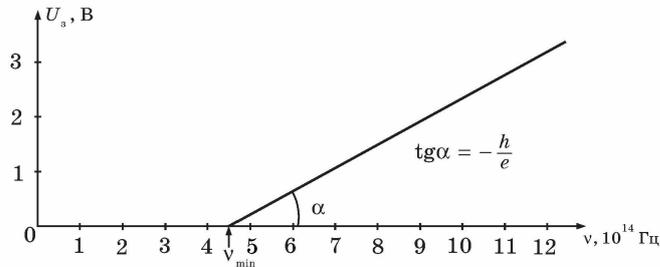


Рис. 12.6. Зависимость запирающего потенциала  $U_3$  от частоты  $\nu$  падающего света.

Экспериментально установлены следующие закономерности фотоэффекта:

1. Максимальная кинетическая энергия фотоэлектронов линейно возрастает с увеличением частоты света  $\nu$  и не зависит от его интенсивности.

2. Для каждого вещества существует так называемая *красная граница фотоэффекта*, т. е. наименьшая частота  $\nu_{\min}$ , при которой еще возможен внешний фотоэффект.

3. Число фотоэлектронов, вырываемых светом из катода за 1 с, прямо пропорционально интенсивности света.

4. Фотоэффект практически безынерционен, фототок возникает мгновенно после начала освещения катода.

**Уравнение Эйнштейна для фотоэффекта.** Теоретическое объяснение наблюдаемых закономерностей фотоэффекта было дано Эйнштейном в 1905 г. на основе гипотезы М. Планка о том, что свет излучается и поглощается определенными порциями, причем энергия каждой такой пор-

ции определяется формулой  $E = h\nu$ , где  $h$  — постоянная Планка. Свет имеет прерывистую дискретную структуру. Электромагнитная волна состоит из отдельных порций — квантов, впоследствии названных *фотонами*. При взаимодействии с веществом фотон целиком передает всю свою энергию  $h\nu$  одному электрону. Часть энергии электрона затрачивается на совершение работы выхода  $A$  на границе металл–вакуум, зависящей от свойств материала катода. Наибольшая кинетическая энергия, которую может иметь вылетевший из катода фотоэлектрон, определяется законом сохранения энергии:

$$\left(\frac{mv^2}{2}\right)_{\max} = eU_s = h\nu - A.$$

*Уравнение Эйнштейна для фотоэффекта:*

$$h\nu = A + \frac{mv^2}{2}.$$

Уравнение Эйнштейна отражает закон сохранения энергии для фотоэффекта. С помощью уравнения Эйнштейна можно объяснить все закономерности внешнего фотоэффекта. Из него следуют линейная зависимость максимальной кинетической энергии от частоты и независимость от интенсивности света, существование красной границы, безынерционность фотоэффекта. Общее число электронов, покидающих за 1 с поверхность катода, должно быть пропорционально числу фотонов, падающих за то же время на поверхность. Из этого следует, что ток насыщения должен быть прямо пропорционален интенсивности светового потока.

Как следует из уравнения Эйнштейна, тангенс угла наклона прямой, выражающей зависимость запирающего потенциала  $U_s$  от частоты  $\nu$  (рис. 12.6), равен отношению постоянной Планка  $h$  к заряду электрона  $e$ :

$$\operatorname{tg}\alpha = \frac{h}{e}.$$

Это позволяет экспериментально определить значение постоянной Планка. Такие измерения были выполнены Р. Милликеном (1914 г.) и дали хорошее согласие со значением, найденным Планком. Эти измерения позволили также определить работу выхода  $A$ :

$$A = h\nu_{\min} = \frac{hc}{\lambda_{\text{кр}}}.$$

где  $c$  — скорость света,  $\lambda_{\text{кр}}$  — длина волны, соответствующая красной границе фотоэффекта. У большинства металлов работа выхода  $A$  составляет несколько электрон-вольт ( $1 \text{ эВ} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$ ). Значение постоянной Планка, выраженное в электрон-вольтах в секунду, равно:

$$h = 4,136 \cdot 10^{-15} \text{ эВ}\cdot\text{с}.$$

Среди металлов наименьшей работой выхода обладают щелочные металлы. Например, у натрия  $A = 1,9 \text{ эВ}$ , что соответствует красной границе фотоэффекта  $\lambda_{\text{кр}} \approx 680 \text{ нм}$ . Поэтому соединения щелочных металлов (Cs, Rb и др.) используют для создания катодов в фотоэлементах, предназначенных для регистрации видимого света.

**Фотоэлементы с внешним фотоэффектом.** Прибор, с помощью которого осуществляется превращение энергии излучения в электрическую энергию, называется **фотоэлементом** (рис. 12.7).

Внутренняя поверхность стеклянного баллона, из которого удален воздух, покрывается светочувствительным слоем  $K$  с «окном»  $O$  для доступа света внутрь баллона. В центре баллона помещается металлическое кольцо  $A$ . От светочувствительного слоя  $K$  и кольца  $A$  делаются выводы для присоединения к электрической цепи. Для получения светочувствительного слоя часто используются щелочные металлы, имеющие низкую работу выхода и поэтому чувствительные к видимому свету. Изготавливают также фотоэлементы, чувствительные только к ультрафиолетовому излучению.

В фотоэлементах с внешним фотоэффектом происходит превращение лишь незначительной части энергии излучения в электрическую, поэтому в качестве источников электрической энергии они не применяются. Эти фотоэлементы используются для автоматического управления электрическими цепями с помощью сигналов, создаваемых видимым и ультрафиолетовым излучением.

К достоинствам таких фотоэлементов относится их безынерционность и пропорциональность фототока интенсивности излучения, что позволяет использовать их в фотометрии. К недостаткам относятся: слабый ток в цепи фотоэлемента.

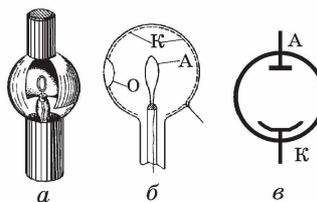


Рис. 12.7. Фотоэлемент:  
а — внешний вид; б — устройство; в — условное изображение

**Внутренний фотоэффект.** При облучении полупроводника связанные электроны поглощают проникающие в него фотоны и переходят в свободное состояние, таким образом увеличивается концентрация свободных носителей зарядов и повышается проводимость полупроводника.

Генерация свободных носителей зарядов в полупроводнике, происходящая вследствие облучения полупроводника, называется *внутренним фотоэффектом*.

Различие между внешним и внутренним фотоэффектами: при внешнем фотоэффекте электроны вырываются из вещества, а при внутреннем остаются внутри него.

Для генерации свободных носителей зарядов в полупроводнике нужна меньшая энергия, чем для вырывания электронов из вещества, поэтому внутренний фотоэффект можно вызвать более длинноволновым излучением, чем внешний. У некоторых полупроводников внутренний фотоэффект создается инфракрасным излучением, что имеет важное практическое значение (приборы ночного видения). Дополнительная проводимость полупроводника, обусловленная облучением, называется *фотопроводимостью*.

Внутренний фотоэффект лежит в основе принципа работы фотосопротивлений и фотоэлементов.

Устройства, действие которых основано на использовании фотопроводимости полупроводников, называются *фотосопротивлениями (фоторезисторами)*. Их применяют для автоматического управления электрическими цепями с помощью световых сигналов. В отличие от фотоэлементов фотосопротивления можно использовать в цепях переменного тока, поскольку их электрическое сопротивление не зависит от направления тока.

Фотосопротивление (рис. 12.8, а) состоит из полупроводника, обладающего значительной фоточувствительностью, с достаточно большой поверхностью для облучения. Так как полупроводник при комнатной температуре обладает очень малой проводимостью, то в отсутствие освещения в цепи течет слабый (темновой) ток. При освещении полупроводника его сопротивление уменьшается, и ток в цепи усиливается, возрастая по мере увеличения освещенности.

Условное изображение фоторезисторов показано на рис. 12.8, б. В качестве материала для фотосопротивлений используется кремний Si, селен Se, сернистый таллий  $Tl_2S$ , сернистый висмут  $Bi_2S_3$ , сернистый кадмий CdS и др. Каждый из этих материалов имеет свои физико-технические особенности, определяющие область его применения. На-

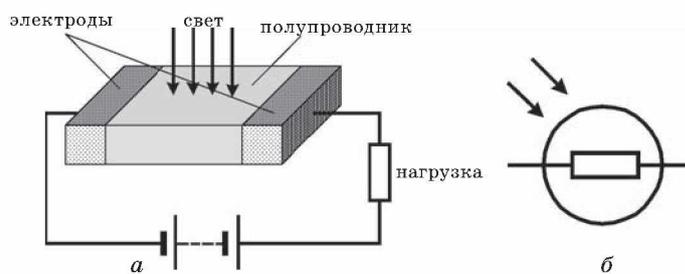


Рис. 12.8

пример, наибольшая фоточувствительность различных полупроводников падает на различные интервалы длин волн. Хорошими фотоэлектрическими свойствами обладает CdS: он реагирует только на излучение с длиной волны 0,5 мкм, а его сопротивление при освещении может уменьшаться в миллион раз.

К достоинствам фотосопротивлений относятся: высокая фоточувствительность, большой срок службы, малые размеры, простота изготовления, возможность выбора фотосопротивления для нужного интервала длин волн, в частности и для инфракрасной области.

К недостаткам относятся: отсутствие прямой пропорциональности между током в цепи и интенсивностью освещения, влияние на величину сопротивления температуры окружающей среды, инерционность. Последний недостаток объясняется тем, что рекомбинация электронов и дырок после прекращения освещения происходит за время от одной до сотен микросекунд, поэтому при быстрых изменениях светового потока проводимость полупроводника не успевает следовать за этими изменениями.

**Фотоэлементы с внутренним фотоэффектом.** Внутренний фотоэффект используется для превращения энергии излучения в электрическую энергию в полупроводниковых фотоэлементах с  $p-n$  переходом. Большое распространение получили кремниевые фотоэлементы, используемые для преобразования энергии солнечного излучения в электрическую энергию и получившие название *солнечных батарей*.

Элемент кремниевой солнечной батареи представляет собой пластину кремния  $n$ -типа, окруженную слоем кремния  $p$ -типа толщиной около одного микрометра с контактами для присоединения к внешней цепи (рис. 12.9).

При освещении поверхности элемента (рис. 12.10) в тонком наружном слое  $p$ -типа генерируются пары «элект-

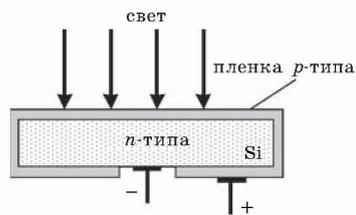


Рис. 12.9

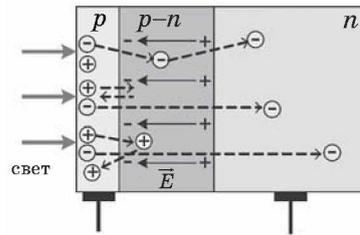


Рис. 12.10

рон-дырка», большинство которых, не успев рекомбинировать вследствие малой толщины слоя, попадает в  $p-n$  переход. В  $p-n$  переходе происходит разделение зарядов: под действием поля  $\vec{E}$  электроны перебрасываются в  $n$ -область, а дырки отбрасываются в  $p$ -область. Это означает, что при освещении между электродами возникает ЭДС, значение которой достигает примерно 0,5 В. При замыкании электродов элемент может создавать ток до 25 мА с каждого квадратного сантиметра освещаемой поверхности.

Наибольшая чувствительность кремниевых фотоэлементов приходится на зеленые лучи, т. е. на длины волн, которым соответствует максимум энергии солнечного излучения. Этим, в частности, и объясняется их довольно высокий к.п.д. К.п.д. солнечных батарей составляет 11–12 % и доходит до 20 %. Солнечные батареи, устанавливаемые на искусственных спутниках Земли и космических кораблях, дают электрическую энергию для бортовой аппаратуры. В фотоэлементах используются и другие полупроводники, например селен, тонкий слой которого наносится на металл (рис. 12.11).

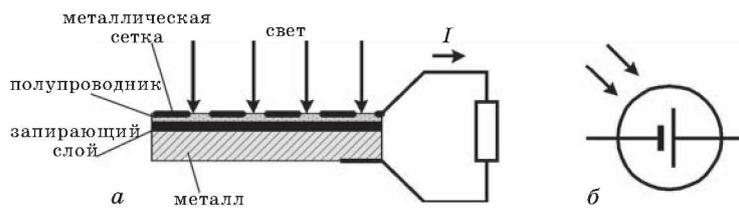


Рис. 12.11

Между полупроводником и металлом при этом возникает запирающий слой, действие которого аналогично действию  $p-n$  перехода. Такого рода фотоэлементы получили название *вентильных*.

Использование энергии Солнца имеет большое значение для Узбекистана и других регионов, в которых много солнечных дней в году. Узбекские ученые ведут научные исследования и имеют большие достижения в разработке альтернативных источников энергии, преобразующих энергию солнечного излучения.

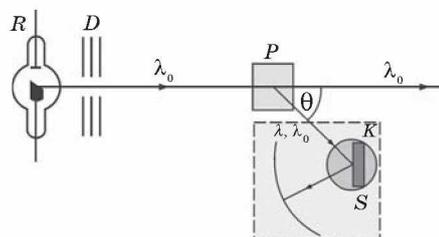
### § 74. Эффект Комптона

Концепция фотонов, предложенная А. Эйнштейном в 1905 г. для объяснения фотоэффекта, получила экспериментальное подтверждение в опытах американского физика А. Комптона (1922 г.). Комптон исследовал упругое рассеяние коротковолнового рентгеновского излучения на свободных (или слабо связанных с атомами) электронах вещества. Открытый им эффект увеличения длины волны рассеянного излучения, названный впоследствии *эффектом Комптона*, не укладывается в рамки волновой теории, согласно которой длина волны излучения не должна изменяться при рассеянии. Согласно волновой теории, электрон под действием периодического поля световой волны совершает вынужденные колебания на частоте волны и поэтому излучает рассеянные волны той же частоты.

Схема опыта Комптона представлена на рисунке 12.12.

Монохроматическое рентгеновское излучение с длиной волны  $\lambda_0$ , исходящее из рентгеновской трубки  $R$ , проходит через свинцовые диафрагмы  $D$  и в виде узкого пучка направляется на рассеивающее вещество-мишень  $P$  (графит, алюминий). Излучение, рассеянное под некоторым углом  $\theta$ , анализируется с помощью спектрографа рентгеновских лучей  $S$ , в котором роль дифракционной решетки играет кристалл  $K$ , закрепленный на поворотном столике. Опыт показал, что в рассеянном излучении наблюдается увеличение длины волны  $\Delta\lambda$ , зависящее от угла рассеяния  $\theta$ :

Рис. 12.12



$$\Delta\lambda = \lambda - \lambda_0 = 2\Lambda \sin^2 \theta/2,$$

где  $\Lambda = 2,43 \cdot 10^{-3}$  нм — так называемая *комptonовская длина волны*, не зависящая от свойств рассеивающего вещества. В рассеянном излучении наряду со спектральной линией с длиной волны  $\lambda$  наблюдается несмещенная линия с длиной волны  $\lambda_0$ . Соотношение интенсивностей смещенной и несмещенной линий зависит от рода рассеивающего вещества.

На рисунке 12.13 представлены кривые распределения интенсивности в спектре излучения, рассеянного под некоторыми углами.

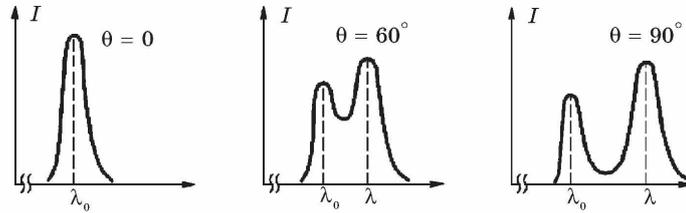


Рис. 12.13

Объяснение эффекта Комптона было дано в 1923 году А. Комптоном и П. Дебаем (независимо) на основе квантовых представлений о природе излучения.

Рассмотрим упругое столкновение двух частиц — налетающего фотона, обладающего энергией  $E_0 = h\nu_0$  и импульсом  $p_0 = h\nu_0/c$ , с покоящимся электроном, энергия покоя которого равна  $E_{e_0} = mc^2$ . Фотон, столкнувшись с электроном, изменяет направление движения (рассеивается). Импульс фотона после рассеяния становится равным  $p = h\nu/c$ , а его энергия  $E = h\nu < E_0$ . Уменьшение энергии фотона означает увеличение длины волны. Энергия электрона после столкновения в соответствии с релятивистской формулой становится равной  $E_e = \sqrt{p_e^2 c^2 + m^2 c^4}$ , где  $p_e$  — приобретенный импульс электрона. Закон сохранения записывается в виде:

$$E + E_{e_0} = E + E_e \text{ или } h\nu_0 + mc^2 = h\nu + \sqrt{p_e^2 c^2 + m^2 c^4}.$$

Закон сохранения импульса  $\vec{p}_0 = \vec{p} + \vec{p}_e$  можно переписать в скалярной форме, если воспользоваться теоремой

косинусов: 
$$p_e^2 = \left(\frac{h\nu_0}{c}\right)^2 + \left(\frac{h\nu}{c}\right)^2 - 2\frac{h^2}{c^2}\nu_0\nu\cos\theta.$$

Из двух соотношений, выражающих законы сохранения энергии и импульса, после преобразований и исключения величины  $p_e$  можно получить:

$$mc^2(\nu_0 - \nu) = h\nu_0\nu(1 - \cos\theta).$$

Переход от частот к длинам

волн  $\left(\nu_0 = \frac{c}{\lambda_0}, \nu = \frac{c}{\lambda}\right)$  приводит

к выражению, которое совпадает с формулой Комптона, полученной из эксперимента:

$$\Delta\lambda = \lambda - \lambda_0 = \frac{h}{mc}(1 - \cos\theta) = 2\frac{h}{mc}\sin^2\frac{\theta}{2}.$$

Таким образом, теоретический расчет, выполненный на основе квантовых представлений, дал исчерпывающее объяснение эффекту Комптона и позволил выразить комптоновскую длину волны  $\Delta$  через фундаментальные константы  $h$ ,  $c$  и  $m$ :

$$\Delta = \frac{h}{mc} = 2,426 \cdot 10^{-3} \text{ нм}.$$

Как показывает опыт, в рассеянном излучении наряду со смещенной линией с длиной волны  $\lambda$  наблюдается и несмещенная линия с первоначальной длиной волны  $\lambda_0$ . Это объясняется взаимодействием части фотонов с электронами, сильно связанными с атомами. В этом случае фотон обменивается энергией и импульсом с атомом в целом. Из-за большой массы атома по сравнению с массой электрона атому передается лишь ничтожная часть энергии фотона, поэтому длина волны  $\lambda$  рассеянного излучения практически не отличается от длины волны  $\lambda_0$  падающего излучения.

## § 75. Давление света

Из электромагнитной теории Максвелла следует, что свет, падающий на тело, оказывает на него давление. Поэтому достаточно легкое тело можно привести в движение силой светового давления. Однако эта сила очень мала. Вычисления Максвелла показали, что на Земле солнечный

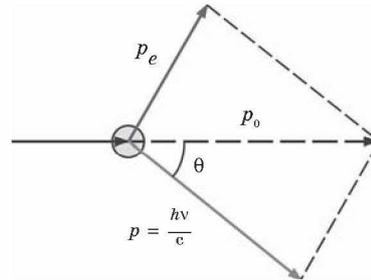


Рис. 12.14. Диаграмма импульсов при упругом рассеянии фотона на покоящемся электроном.

свет давит на квадратный метр черной поверхности, расположенной перпендикулярно лучам, с силой  $4,8 \cdot 10^{-8}$  Н. Обнаружить и измерить такую силу на опыте очень трудно, так как одностороннее нагревание поверхности тела лучами вызывает увеличение давления окружающего воздуха на эту поверхность, превышающее во много раз световое давление.

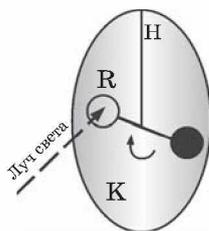


Рис. 12.15

Впервые давление света измерил в 1900 г. русский физик П. Н. Лебедев (рис. 12.15). Свет от источника после ряда отражений падает на тонкий легкий кружок R, укрепленный на подвеске. Подвеска висит на тончайшей кварцевой нити Н в камере К, внутри которой создается высокий вакуум. По углу закручивания подвески определяется сила давления света на кружок.

Опыты Лебедева полностью подтвердили электромагнитную теорию света Максвелла. Электромагнитная волна представляет совокупность периодически меняющихся в пространстве и во времени электрического и магнитного полей, поэтому при взаимодействии с поверхностью вещества эти поля оказывают силовое воздействие на электроны атомов вещества.

Так как фотоны обладают определенным импульсом, то при взаимодействии с веществом они передают часть импульса частицам вещества, оказывая тем самым давление на его поверхность (можно провести аналогию с ударами молекул о стенку сосуда, при которых импульс, передаваемый стенке, определяет давление газа в сосуде).

Величина силы, действующей на тело, определяется изменением импульса за единицу времени. Если на какое-то тело, например кружок в опыте Лебедева, за время  $\Delta t$  падает излучение, обладающее массой  $m$ , то оно передает кружку за это время импульс  $\Delta(mc)$ . Это означает, что излучение действует на кружок с силой  $F_d$ , равной по величине

$$F_d = \frac{\Delta(mc)}{\Delta t}.$$

Если поверхность тела полностью поглощает падающее на него излучение (является абсолютно черной), то изменение импульса светового излучения  $\Delta(mc)$  будет равно импульсу  $mc$  (аналогично неупругому удару о стенку) и

$F_{\text{д}} = mc/\Delta t$ . Отсюда получим, что давление света на поглощающую поверхность

$$p_{\text{св}} = \frac{F_{\text{д}}}{S} = \frac{mc}{S\Delta t},$$

где  $S$  — площадь облучаемой поверхности.

Если поверхность тела полностью отражает падающее на него излучение (является абсолютно белой или зеркальной), то изменение импульса светового излучения  $\Delta(mc)$  будет равно  $2mc$ , (аналогично абсолютно упругому удару о стенку) и  $F_{\text{д}} = 2mc/\Delta t$ . Отсюда получим, что давление света на отражающую поверхность

$$p_{\text{св}} = \frac{F_{\text{д}}}{S} = \frac{2mc}{S\Delta t}.$$

Энергия излучения связана с его массой соотношением Эйнштейна:  $E = mc^2$ . Отсюда  $mc = E/c$ , и, подставив это значение импульса светового излучения в формулу для давления света, например, на поглощающую поверхность, получим:

$$p_{\text{св}} = \frac{E}{cS\Delta t}.$$

Поскольку  $E$  выражает энергию излучения, падающего на тело за время  $\Delta t$ , то  $E/(S\Delta t)$  — энергия излучения, падающего на единицу площади поверхности тела за единицу времени, называемая *интенсивностью волны*. Обозначив интенсивность волны буквой  $I$ , получим формулу Максвелла для вычисления давления электромагнитных волн на поверхность тела, полностью поглощающего эти волны:

$$p = \frac{I}{c}.$$

Хотя давление света в обычных условиях очень мало, оно вызывает наблюдаемые явления. Так, хвосты комет, имеющие очень низкую плотность, направлены всегда в сторону от Солнца именно из-за сил светового давления, которые «сдувают» отдельные молекулы разреженного газа.

## § 76. Действия света

**Тепловое действие света.** При поглощении излучения телом происходит превращение энергии излучения во внутреннюю энергию тела. В тепловую энергию может превращаться энергия любых электромагнитных волн — от радиоволн до гамма-излучения.

Тепловое действие излучения легко обнаружить на опыте, сфокусировав солнечные лучи линзой на бумаге или деревянной поверхности, — вскоре на них появляется обугленное пятно. Концентрация энергии излучения в луче мощного лазера так велика, что в сфокусированном луче испаряются самые тугоплавкие материалы. Таким путем получают тончайшие отверстия даже в таких твердых материалах, как алмаз.

Роль теплового действия *солнечного* излучения в явлениях, происходящих на Земле, весьма велика. Энергия, доставляемая на Землю излучением, несравненно больше энергии, используемой всей промышленностью земного шара. Солнечные лучи приносят каждую секунду 1370 Дж энергии на каждый квадратный метр поверхности Земли. Эта величина, совпадающая по единицам измерения с интенсивностью, называется *солнечной постоянной*:

$$I_c = 1370 \text{ Дж}/(\text{м}^2 \cdot \text{с}) = 1370 \text{ Вт}/\text{м}^2.$$

**Химическое действие света.** Химические процессы, происходящие под действием излучения, имеют большое значение в природе, науке и технике.

Один из важнейших фотохимических процессов в природе — усвоение растениями углекислоты из воздуха под действием света, называемое *фотосинтезом*. Листья растений с помощью хлорофилла (придающего им зеленую окраску) под влиянием света поглощают углекислый газ и выделяют кислород.

Многие химические вещества разлагаются под действием света. Такого рода реакция имеет огромное значение для возникновения зрительного ощущения у человека и животных. В сетчатке имеется около 120 млн светочувствительных клеток, их называют «палочками». Вещество, заполняющее эти клетки (его называют зрительный пурпур), разлагается под действием света, и продукты его разложения раздражают нервные окончания, вызывая зрительное ощущение. Кроме палочек в сетчатке имеется еще около 6 млн «колбочек» — светочувствительных клеток трех видов, чувствительных соответственно к одному из основных цветов — красному, зеленому и синему. Наложение зрительных ощущений от нервных окончаний этих клеток и дает возможность различать цвета.

При фотографировании на светочувствительный слой фотопластинки, содержащий бромистое серебро  $\text{AgBr}$ , падает излучение, которое разлагает его молекулы с выделе-

нием мельчайших частичек чистого серебра. Число образовавшихся частичек серебра зависит от продолжительности и интенсивности облучения фотопластинки. В тех местах пластинки, на которые падает больше света, у большего числа кристалликов бромистого серебра отдельные молекулы его восстанавливаются до чистого серебра, поэтому на пластинке возникает невидимое глазу (скрытое) изображение фотографируемых предметов. Под действием проявителя каждый из кристалликов бромистого серебра, в котором хотя бы одна его молекула превратилась в чистое серебро, целиком восстанавливается до чистого серебра. Кристаллики, содержащие только молекулы  $\text{AgBr}$ , не реагируют с проявителем. Это означает, что при проявлении сильнее почернеют те места пластинки, на которые падало больше света при фотографировании. Таким способом получают *негативное изображение*. Для получения фотографии под негатив кладут светочувствительную бумагу и направляют на него свет. Затем изображение на бумаге проявляется и закрепляется. Таким образом получают *позитивное изображение*.

Химическое действие излучения объясняется квантовой теорией света. Поглощение фотонов увеличивает энергию молекул (активизирует их), что и вызывает химические процессы в веществе. Если энергия фотонов мала, то они не вызывают химических процессов; их поглощение приводит лишь к нагреванию вещества. Чем больше энергия фотонов, тем больше их химическая активность. Следовательно, химическое действие излучения выражено тем ярче, чем короче его длина волны. Так, ультрафиолетовые лучи оказывают сильное химическое действие на фотопластинку, а красные лучи на обычную фотопластинку не действуют (поэтому можно проявлять фотопластины при красном свете).

**Фотолюминесценция.** Некоторые тела при освещении не только отражают часть падающего на них света, но и начинают светиться. Такое *свечение*, или *люминесценция*, отличается важной особенностью: свет люминесценции имеет иной спектральный состав, чем свет, вызвавший свечение.

Свечение тела под действием падающего на него излучения называется *фотолюминесценцией*.

Очень большое число растворов красок и других веществ обнаруживают люминесценцию, особенно под действием источников, испускающих ультрафиолетовый свет. Люминесцентные краски не только отражают лучи определенно-

го цвета, но и преобразуют в такой свет поглощаемое излучение других цветов, поэтому они кажутся светящимися.

**Правило Стокса:** свет люминесценции характеризуется большей длиной волны, чем возбуждающий свет.

Некоторые тела сохраняют способность светиться некоторое время после того, как освещение их прекратилось.

Такое послесвечение может иметь различную длительность. Принято называть свечение, прекращающееся вместе с освещением, *флюоресценцией*, а свечение, имеющее заметную длительность, — *фосфоресценцией*. Лист картона, покрытый, например, порошком сернистого цинка, представляет хороший фосфоресцирующий экран, сохраняющий свое свечение две–три минуты после освещения.

Важное применение нашли фосфоресцирующие порошки при изготовлении ламп дневного света. В газосветных лампах свечение, возникающее при электрическом токе в газе, например в парах ртути, обычно содержит много ультрафиолетового света, не только не пригодного для освещения, но и вредного для глаза. Покрывая внутренность таких ламп фосфоресцирующим составом, удается превратить этот ультрафиолетовый свет в видимый (согласно правилу Стокса). Это приводит к большой экономии, ибо в таких лампах в энергию видимого света превращается примерно в три раза большая доля электрической энергии, чем в лампах накаливания.

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ К ГЛАВЕ XII

1. Что такое свет с точки зрения современной физики?
2. В чем заключается корпускулярно-волновой дуализм света?
3. Объясните электромагнитную теорию света.
4. Какие факты свидетельствуют о наличии у света корпускулярных свойств?
5. В чем заключается сущность гипотезы М.Планка?
6. Запишите формулу энергии кванта.
7. Чему равна постоянная Планка?
8. Что представляет собой фотон?
9. Перечислите основные свойства фотона.
10. Напишите формулу энергии фотона.
11. Как определить массу и импульс фотона?
12. Как направлен импульс фотона?
13. В чем состоит явление фотоэффекта?
14. Когда и кем было открыто явление фотоэффекта?

15. Нарисуйте схему установки для изучения фотоэффекта и объясните, в чем суть опыта.
16. Сформулируйте законы внешнего фотоэффекта.
17. Объясните законы фотоэффекта с точки зрения квантовой теории света.
18. Начертите вольт-амперную характеристику фотоэффекта и объясните ее особенности.
19. Напишите формулу Эйнштейна для фотоэффекта и объясните ее физическую суть.
20. Каково условие существования фотоэффекта?
21. Что называют красной границей фотоэффекта?
22. Запишите формулу для красной границы фотоэффекта.
23. От чего зависит кинетическая энергия фотоэлектронов?
24. Как на опыте определяется скорость (кинетическая энергия) фотоэлектронов?
25. Что называют внутренним фотоэффектом?
26. В чем принципиальное различие между внешним и внутренним фотоэффектами?
27. Что называют фотоэлементом? Нарисуйте и объясните устройство и принцип работы вакуумного фотоэлемента, основанного на внешнем фотоэффекте. Почему такие фотоэлементы не используют как источники электроэнергии?
28. Что такое фоторезистор? Каков его принцип действия? Как и где используется фоторезистор?
29. Каков принцип действия фотоэлемента с внутренним фотоэффектом как источника электроэнергии?
30. В чем состоит эффект Комптона?
31. Объясните суть опыта П. Н. Лебедева по измерению светового давления.
32. Как на основе электромагнитной теории объясняют давление света?
33. Как объяснить световое давление на основе квантовых представлений о свете?
34. В чем проявляется тепловое действие света?
35. Приведите примеры проявления химического действия света.
36. Какие реакции называются фотохимическими? Приведите примеры фотохимических реакций.
37. Что способствует обеспечению круговорота углерода и кислорода в природе?
38. Что называют фотосинтезом? Какова его роль в жизни Земли?
39. Что представляет собой чувствительный слой фотопластины?
40. Опишите операции процесса получения фотоснимка.
41. Что называют люминесценцией?
42. Дайте объяснение двум видам фотолюминесценции: флуоресценции и фосфоресценции.

## ТЕСТОВЫЕ ЗАДАНИЯ К ГЛАВЕ XII

1. (98/1-57). Вырывание электронов из вещества под действием света называется явлением ...

- А) поляризации.      С) дисперсии.      Е) интерференции.  
В) дифракции.      D) фотоэффекта.

2. (98/5-64). При освещении электрической дугой отрицательно заряженная пластина постепенно теряет свой заряд. Как изменится скорость потери заряда пластиной, если на пути света поставить фильтр, задерживающий ультрафиолетовые лучи и свободно пропускающие все остальные?

- А) увеличится.  
В) возможны различные изменения.  
С) уменьшится.      D) не изменится.      Е) НПО.

3. (98/5-56). Как изменится количество фотоэлектронов, вырываемых светом за 1 с, если интенсивность падающего света уменьшится в 4 раза?

- А) уменьшится в 16 раз.      D) не изменится.  
В) увеличится в 4 раза.      Е) уменьшится в 4 раза.  
С) уменьшится в 2 раза.

4. (98/12). Как изменится число фотоэлектронов, вырываемых из металла при увеличении частоты падающего излучения в 2 раза?

- А) уменьшится в 2 раза.      D) не изменится.  
В) увеличится в 2 раза.      Е) увеличится в 6,63 раза.  
С) уменьшится в 6,63 раза.

5. (03/8-49). Как изменится максимальная скорость фотоэлектронов, если, не меняя длины волн, увеличить поток света в 4 раза?

- А) не изменится.      D) уменьшится в 4 раза.  
В) увеличится в 4 раза.      Е) уменьшится в 2 раза.  
С) увеличится в 2 раза.

6. (01/1-16). Уравнение Эйнштейна для фотоэффекта представляет собой применение к данному явлению:

- А) закона сохранения энергии.  
В) закона сохранения импульса.  
С) закона сохранения момента импульса.  
D) закона сохранения заряда.  
Е) НПО.

7. (96/7-118). Какова длина волны излучения, если при фотоэффекте скорость вылетающих из пластины электронов равна  $1,6 \cdot 10^6$  м/с? ( $A = 5,3$  эВ.)

- А)  $10 \cdot 10^{-6}$  м.      С)  $6,63 \cdot 10^{-10}$  м.      Е)  $1 \cdot 10^{-6}$  м.  
В) 98,6 нм.      D)  $20 \cdot 10^{-8}$  м.

8. (99/7-59). Красная граница фотоэффекта для калия равна 600 нм. Найдите работу выхода для калия (в джоулях). ( $c = 3 \cdot 10^8$  м/с;  $h = 6,6 \cdot 10^{-34}$  Дж·с.)

- А)  $6,6 \cdot 10^{-26}$  Дж.    С)  $2,2 \cdot 10^{-19}$  Дж.    Е)  $2,2 \cdot 10^{-26}$  Дж.  
В)  $6,6 \cdot 10^{-19}$  Дж.    D)  $3,3 \cdot 10^{-19}$  Дж.

9. (98/7-65). Из вещества, красная граница фотоэффекта которого  $1 \cdot 10^{15}$  Гц, под действием света частотой  $1,5 \cdot 10^{15}$  Гц вылетают фотоэлектроны. Определите максимальную кинетическую энергию фотоэлектронов (в джоулях) ( $h = 6,6 \cdot 10^{-34}$  Дж·с.)

- А)  $6,6 \cdot 10^{-19}$ .    С)  $1 \cdot 10^{-19}$ .    Е)  $3,3 \cdot 10^{-19}$ .  
В)  $2,2 \cdot 10^{-19}$ .    D)  $1,6 \cdot 10^{-19}$ .

10. (03/11-37). На цезиевый катод падает оранжевый свет с длиной волны 600 нм. Работа выхода для цезия равна 1,8 эВ. При каком запирающем потенциале (В) прекращается фототок? ( $h = 4,1 \cdot 10^{-15}$  эВ·с.)

- А) 2,5.    В) 1,8.    С) 0,6.    D) 0,3.    Е) 0,25.

11. (01/3-4). Если работа выхода электрона из фотокатода равна 3 эВ и фотокатод освещается светом, энергия квантов которого равна 5 эВ, то задерживающий потенциал, при котором фототок прекратится, равен (В) ...

- А) 1,5.    В) 2.    С) 3.    D) 4,5.    Е) 9.

12. (01/1-12). Потенциал, до которого может зарядиться металлическая пластина, работа выхода электронов из которой равна 1,6 эВ, при длительном освещении потоком фотонов с энергией 3 эВ, равен (В) ...

- А) 1,4.    В) 1,6.    С) 2,8.    D) 3.    Е) 4,6.

13. (98/12- ). Работа выхода электронов из одного металла равна А, а из другого — 2А. Оба металла освещаются одинаковым светом с энергией фотонов 4А. Определите отношение кинетических энергий фотоэлектронов, вылетающих из первого и второго металлов.

- А) 0,5.    В) 1,5.    С) 1,8.    D) 2.    Е) 4.

14. (03/5-32). Для некоторого металла красная граница фотоэффекта равна 331 нм. Какова наименьшая энергия (эВ) фотона, вызывающего фотоэффект в этом металле? ( $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$  Дж·с.)

- А) 2,45.    В) 2,6    С) 2,75.    D) 3,75.    Е) 4,5.

15. (03/5-50). Определите красную границу фотоэффекта для никеля (м). Работа выхода для никеля равна 5 эВ.

- А)  $5 \cdot 10^{-7}$ .    В)  $2,3 \cdot 10^{-5}$ .    С)  $2,5 \cdot 10^{-7}$ .    D)  $1 \cdot 10^{-6}$ .    Е)  $1,5 \cdot 10^{-5}$ .

16. (03/8-52). Какой будет максимальная кинетическая энергия (эВ) фотоэлектронов, когда в металл с работой выхода 3 эВ падают фотоны с энергией 5 эВ?

- А) 0,6.    В) 2.    С) 3.    D) 5.    Е) 8.

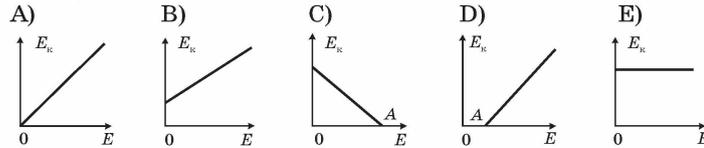
17. (01/3-16). При освещении катода фотоэлемента монохроматическим светом с частотой  $\nu_1$  максимальная кинетическая энергия фотоэлектронов  $E_1$ , а при облучении светом частотой  $\nu_2 = 3\nu_1$  она равна  $E_2$ . Каково соотношение между  $E_1$  и  $E_2$ ?

- A)  $E_2 > 3E_1$ .      C)  $E_1 = E_2$ .      E)  $E_2 < 3E_1$ .  
 B)  $E_2 = 3E_1$ .      D)  $E_2 = \sqrt{3} E_1$ .

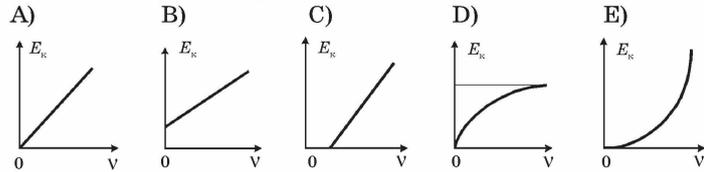
18. (98/12- ). В опыте по определению постоянной Планка при освещении поверхности металла светом с частотой  $\nu_1$  тормозящее напряжение равнялось  $U_1$ , а при освещении светом с частотой  $\nu_2$  тормозящее напряжение равнялось  $U_2$ . Как определить постоянную Планка на основе этих данных?

- A)  $e \frac{U_2 - U_1}{\nu_1 + \nu_2}$ .      C)  $e \frac{(\nu_2 - \nu_1)}{U_2 - U_1}$ .      E)  $e \frac{(U_2 - U_1)}{(\nu_2 - \nu_1)}$ .  
 B)  $e \frac{(U_2 + U_1)}{\nu_1 + \nu_2}$ .      D)  $e (U_2 - U_1)(\nu_2 - \nu_1)$ .

19. (01/1-8). Какой из приведенных графиков соответствует зависимости максимальной кинетической энергии ( $E_k$ ) электрона, вылетающего с поверхности металла, от энергии фотона ( $E$ ), падающего на поверхность металла? ( $A$  — работа выхода электрона из металла.)



20. (01/1-18). График зависимости максимальной кинетической энергии  $E_k$  фотоэлектронов от частоты фотонов  $\nu$ , падающих на поверхность металла, имеет вид ...

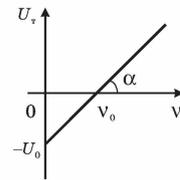


21. (03/10-46). По какой формуле можно определить длину волны света, основываясь на уравнении Эйнштейна для фотоэффекта?

- A)  $h\nu\lambda = \frac{A}{mv^2}$ .      C)  $\frac{h\lambda}{c} = A + \frac{mv^2}{2}$ .      E)  $h\nu\lambda = A + \frac{mv^2}{2}$ .  
 B)  $hc = \lambda(A + \frac{mv^2}{2})$ .      D)  $\frac{h}{c} = \lambda \left( A + \frac{mv^2}{2} \right)$ .

22. (03/01/1-9). На графике представлена зависимость задерживающего потенциала  $U_3$  фотокаатода от частоты падающего света. Чему равна работа выхода электронов с поверхности?

- A)  $h\nu_0$ . B)  $eU_0$ . C)  $h\nu_0$  и  $eU_0$ . D)  $-eU_0$ . E)  $eU_0 \operatorname{tg} \alpha$ .



23. (98/1-60). Чему равна частота кванта света, если его энергия равна  $E$ ?

- А)  $Eh$ .      В)  $\frac{Eh}{c^2}$ .      С)  $\frac{E}{c}$ .      D)  $\frac{E}{c^2}$ .      E)  $\frac{E}{h}$ .

24. (98/2-57). Найдите выражение импульса фотона с частотой  $\nu$ .

- А)  $h\nu c^2$ .      В)  $h\nu c$ .      С)  $h\nu/c$ .      D)  $h\nu$ .      E)  $h\nu/c^2$ .

25. (98/5-66). Найдите выражение массы фотона с частотой  $\nu$ .

- А)  $h\nu c^2$ .      В)  $h\nu c$ .      С)  $h\nu$ .      D)  $h\nu/c^2$ .      E)  $h\nu/c$ .

26. (96/7-115). Какова энергия фотона, имеющего импульс  $2 \cdot 10^{-27}$  кг·м/с?

- А)  $6 \cdot 10^{-19}$  Дж.      С) 4 эВ.      E)  $5 \cdot 10^{-19}$  Дж.  
В)  $8 \cdot 10^{-19}$  Дж.      D)  $6,9 \cdot 10^{-19}$  Дж.

27. (8-51). Какова энергия фотона (эВ) с длиной волны  $10^{-7}$  м? ( $h = 4 \cdot 10^{-15}$  эВ·с.)

- А) 1.      В) 2.      С) 4.      D) 8.      E) 12.

28. (03/9-24). Определите массу фотона (кг) с длиной волны 220 нм. ( $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$  Дж·с.)

- А)  $3 \cdot 10^{-36}$ .      С)  $1,6 \cdot 10^{-36}$ .      E)  $3,3 \cdot 10^{-35}$ .  
В)  $1,5 \cdot 10^{-36}$ .      D)  $1 \cdot 10^{-35}$ .

29. (03/8-50). Каков импульс фотона (кг·м/с) с длиной волны  $6,62 \cdot 10^{-8}$  м? ( $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$  Дж·с.)

- А)  $10^{-26}$ .      В)  $10^{-42}$ .      С)  $10^{-19}$ .      D)  $10^{-17}$ .      E)  $10^{-15}$ .

30. (03/5-65). Определите импульс фотона с частотой  $3 \cdot 10^{15}$  Гц (кг·м/с). ( $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$  Дж·с.)

- А)  $2,21 \cdot 10^{-19}$ .      С)  $2 \cdot 10^{-19}$ .      E)  $4,42 \cdot 10^{-25}$ .  
В)  $2,21 \cdot 10^{-25}$ .      D)  $6,63 \cdot 10^{-27}$ .

31. (03/4-52). Определите частоту (Гц), соответствующую фотону с импульсом  $3,31 \cdot 10^{-27}$  кг·м/с ( $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$  Дж·с.)

- А)  $3 \cdot 10^{14}$ .      В)  $2 \cdot 10^{15}$ .      С)  $1,5 \cdot 10^{15}$ .      D)  $2 \cdot 10^{14}$ .      E)  $3 \cdot 10^{15}$ .

32. (96/5-124). Средняя длина волны излучения лампочки накаливания 1,2 мкм. Определите число фотонов, испускаемых 200-ваттной лампочкой за секунду. Считать, что вся потребляемая мощность идет на излучение. ( $h = 6,6 \cdot 10^{-34}$  Дж·с.)

- А)  $4,0 \cdot 10^{21}$ .      В)  $2,5 \cdot 10^{21}$ .      С)  $1,8 \cdot 10^{20}$ .      D)  $1,5 \cdot 10^{22}$ .      E)  $1,2 \cdot 10^{21}$ .

33. (96/15-5э). Сколько фотонов может излучаться, если 33 г вещества и 33 г антивещества полностью превратятся в электромагнитное излучение с частотой  $10^{15}$  Гц? ( $h = 6,6 \cdot 10^{-34}$  Дж·с.)

- А)  $10^{22}$ .      В)  $9 \cdot 10^{25}$ .      С)  $10^{31}$ .      D)  $9 \cdot 10^{33}$ .      E)  $10^{35}$ .

34. (03/6-54). Источник света мощностью 50 Вт излучает в среднем  $2,5 \cdot 10^{20}$  фотонов каждые 2 секунды. Определите среднюю длину волны излучения (мкм). ( $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$  Дж·с.)

- А) 0,25.      В) 0,5.      С) 0,6.      D) 1.      E) 1,25

35. (01/1-11). Если энергия первого фотона в 2 раза больше энергии второго, то отношение импульса первого фотона к импульсу второго равно ...

- А) 1/4.      В) 1/8.      С) 2.      D) 4.      E) 8.

36. (01/1-14). Импульс фотона в прозрачной среде с абсолютным показателем преломления  $n$  равен ( $\nu$ ,  $\lambda$  — частота и длина волны фотона в среде) ...

- А)  $nh\nu/c$ .      В)  $nh\nu$ .      С)  $h\lambda/n$ .      D)  $h\nu/nc$ .      E)  $h\lambda/nc$ .

37. (03/10-47). Излучение с частотой  $10^{17}$  Гц падает на зеркало перпендикулярно и отражается от него. Определите модуль изменения импульса фотона при отражении (кг·м/с). ( $h = 6,6 \cdot 10^{-34}$  Дж·с.)

- А)  $2,2 \cdot 10^{-17}$ .      В)  $4,4 \cdot 10^{-17}$ .      С)  $2,2 \cdot 10^{-25}$ .      D)  $2,2 \cdot 10^{-9}$ .      E)  $4,4 \cdot 10^{-25}$ .

38. (03/9-25). Какова должна быть энергия фотона (МэВ), чтобы его масса была равна массе покоя электрона?

- А) 0,24.      В) 0,44.      С) 0,51.      D) 0,61.      E) 0,81.

39. (03/1-14). На каждый квадратный метр Земной поверхности, перпендикулярной солнечным лучам, падает солнечное излучение мощностью 1,4 кВт. Считая расстояние от Земли до Солнца равным  $150 \cdot 10^6$  км, определите полную мощность излучения Солнца (в кВт).

- А)  $1,5 \cdot 10^{31}$ .      В)  $2 \cdot 10^{29}$ .      С)  $3 \cdot 10^{23}$ .      D)  $1,4 \cdot 10^{23}$ .      E)  $4 \cdot 10^{23}$ .

40. (03/10-47). Излучение с частотой  $10^{17}$  Гц падает на зеркало перпендикулярно и отражается от него. Определите модуль изменения импульса фотона при отражении (кг·м/с). ( $h = 6,6 \cdot 10^{-34}$  Дж·с.)

- А)  $2,2 \cdot 10^{-17}$ .      В)  $4,4 \cdot 10^{-17}$ .      С)  $2,2 \cdot 10^{-25}$ .      D)  $2,2 \cdot 10^{-9}$ .      E)  $4,4 \cdot 10^{-25}$ .

41. (03/5-33). На поверхность площадью 100 см<sup>2</sup> ежеминутно падает 63 Дж световой энергии. Каким будет давление света (Н/м<sup>2</sup>) в случае полного отражения света?

- А)  $3,5 \cdot 10^{-7}$ .      В)  $7 \cdot 10^{-7}$ .      С)  $7 \cdot 10^{-5}$ .      D)  $3,5 \cdot 10^{-5}$ .      E)  $7 \cdot 10^{-6}$ .

42. (96/3-48). Во сколько раз давление света на полностью отражающую поверхность больше давления на полностью поглощающую поверхность?

- А) одинаково в обоих случаях.      В) 1,5.      С) 2.      D) 3.      E) 1/2.

43. (96/15-106). От какого фактора не зависит степень почернения фотопластинки (фото пленки)?

- А) интенсивность света.      D) энергия световых квантов.  
В) время экспозиции.      E) НПО.  
С) тип фотопластинки (фото пленки).

44. (02/2-43). Лазер с полезной мощностью 20 Вт испускает каждую секунду  $10^{20}$  фотонов. Определите длину волны излучения лазера (в мкм).

- А) 1,2.      В) 0,99.      С) 0,88.      D) 0,78.      E) 0,2.

## Глава XIII. АТОМНАЯ ФИЗИКА

Представление об атомах как неделимых мельчайших частицах вещества возникло еще в античные времена, но только в XVIII веке трудами А. Лавуазье, М. В. Ломоносова, Д. Дальтона и других ученых была доказана реальность существования атомов. Вопрос об их внутреннем устройстве даже не возникал, и атомы по-прежнему считались неделимыми частицами.

В XIX веке (1833 г.) при исследовании явления электролиза М. Фарадей установил, что ток в растворе электролита — это упорядоченное движение заряженных частиц — ионов. Фарадей определил минимальный заряд иона, который был назван элементарным электрическим зарядом, приближенное значение которого  $e = 1,60 \cdot 10^{-19}$  Кл. Следовал вывод о существовании внутри атомов электрических зарядов.

Большую роль в развитии атомистической теории сыграл Д. И. Менделеев, разработавший в 1869 году периодическую систему элементов, в которой впервые был поставлен вопрос о единой природе атомов.

В начале XIX века были открыты дискретные спектральные линии в излучении атомов водорода в видимой части спектра и установлены математические закономерности, связывающие длины волн этих линий (И. Бальмер, 1885 г.). Наличие линейчатых спектров явилось свидетельством сложной структуры атомов.

В 1896 г. А. Беккерель обнаружил явление испускания атомами невидимых проникающих излучений, названное *радиоактивностью*. В последующие годы явление радиоактивности изучалось многими учеными (М. Склодовская-Кюри, П. Кюри, Э. Резерфорд и др.). Было обнаружено, что атомы радиоактивных веществ испускают три вида излучений различной физической природы (альфа-, бета- и гамма-лучи).

В 1897 г. Дж. Томсон открыл электрон и измерил отношение  $e/m$  заряда электрона к массе. Опыты Томсона подтвердили вывод о том, что электроны входят в состав атомов.

Таким образом, на основании всех известных к началу XX века экспериментальных фактов можно было сделать вывод о том, что атомы вещества имеют сложное внутреннее строение. Они представляют собой электронейтральные системы, причем носителями отрицательного заряда

атомов являются легкие электроны, масса которых составляет лишь малую долю массы атомов. Основная часть массы атомов связана с положительным зарядом.

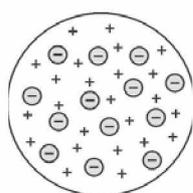


Рис. 13.1

Перед наукой встал вопрос о внутреннем строении атомов.

Первая модель строения атома предложена Дж. Томсоном (1903 г.) (рис. 13.1).

Атом представляет собой электронейтральную систему шарообразной формы радиусом примерно  $10^{-10}$  м. Положительный заряд атома равномерно распределен по всему объему шара, а отрицательно заряженные электроны находятся внутри него (наподобие изюма в кексе — модель «Кекс»).

## § 77. Опыт Резерфорда. Ядерная модель атома

Эксперименты по исследованию внутренней структуры атомов были выполнены Э. Резерфордом и его сотрудниками в 1909–1911 годах. Резерфорд бомбардировал атомы тяжелых элементов (золото, серебро, медь и др.)  $\alpha$ -частицами, которые возникают при радиоактивном распаде радия и некоторых других элементов.  $\alpha$ -частицы — это полностью ионизированные атомы гелия. Масса  $\alpha$ -частиц приблизительно в 7300 раз больше массы электрона, а положительный заряд равен удвоенному элементарному заряду  $2e$  (рис. 13.2).

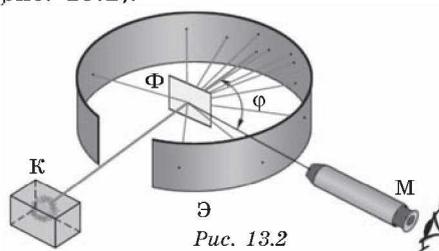


Рис. 13.2

От радиоактивного источника, заключенного в свинцовый контейнер К,  $\alpha$ -частицы направлялись на тонкую металлическую фольгу Ф. Рассеянные частицы попадали на экран Э, покрытый слоем кристаллов сульфида цинка, способных светиться под ударами быстрых заряженных частиц. Сцинтилляции (вспышки) на экране наблюдались глазом с помощью микроскопа М. Наблюдения рассеянных

$\alpha$ -частиц в опыте Резерфорда можно было проводить под различными углами  $\varphi$  к первоначальному направлению пучка. Электроны, входящие в состав атомов, вследствие малой массы не могут заметно изменить траекторию  $\alpha$ -частицы. Рассеяние, то есть изменение направления движения  $\alpha$ -частиц, может вызвать только тяжелая положительно заряженная часть атома.

Было обнаружено, что большинство  $\alpha$ -частиц проходит через тонкий слой металла, практически не испытывая отклонения. Однако небольшая часть частиц отклоняется на значительные углы, превышающие  $30^\circ$ . Очень редкие  $\alpha$ -частицы (приблизительно одна на десять тысяч) испытывали отклонение на углы, близкие к  $180^\circ$ .

Этот результат находился в противоречии с моделью атома Томсона, согласно которой положительный заряд распределен по всему объему атома. При таком распределении положительный заряд не может создать сильное электрическое поле, способное отбросить  $\alpha$ -частицы назад. Если бы радиус шара, в котором сосредоточен весь положительный заряд атома, уменьшился в  $n$  раз, то максимальная сила отталкивания, действующая на  $\alpha$ -частицу по закону Кулона, возросла бы в  $n^2$  раз.

Следовательно, при достаточно большом значении  $n$   $\alpha$ -частицы могли бы испытать рассеяние на большие углы вплоть до  $180^\circ$  (рис. 13.3).

Эти соображения привели Резерфорда к выводу, что атом почти пустой, и весь его

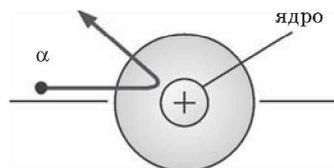


Рис. 13.3

положительный заряд сосредоточен в малом объеме. Эту часть атома Резерфорд назвал **атомным ядром**.

Таким образом, опыты Резерфорда привели к выводу, что в центре атома находится плотное положительно заряженное ядро, диаметр которого не превышает  $10^{-14}$ – $10^{-15}$  м. Это ядро занимает только  $10^{-12}$  часть полного объема атома, но содержит весь положительный заряд и не менее 99,95 % его массы. Веществу, составляющему ядро атома, следовало приписать колоссальную плотность порядка  $\rho \approx 10^{18}$  кг/м<sup>3</sup>. Заряд ядра должен быть равен суммарному заряду всех электронов, входящих в состав атома. Было установлено, что если заряд электрона принять за единицу, то заряд ядра в точности равен номеру данного элемента в таблице Менделеева.

Опираясь на классические представления о движении микрочастиц, Резерфорд предложил планетарную модель атома: в центре атома располагается положительно заряженное ядро, в котором сосредоточена почти вся масса атома. Атом в целом нейтрален. Вокруг ядра, подобно планетам, вращаются электроны под действием кулоновских сил со стороны ядра (рис. 13.4).

Планетарная модель атома, предложенная Резерфордом, явилась крупным шагом в развитии знаний о строении атома. Однако она оказалась неспособной объяснить сам факт длительного существования атома, т. е. его устойчивость. По законам классической электродинамики, движущийся с ускорением заряд должен излучать электромагнитные волны, уносящие энергию.

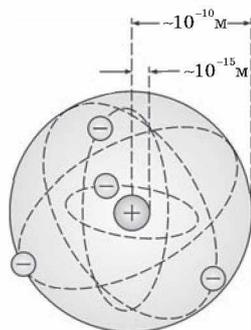


Рис. 13.4

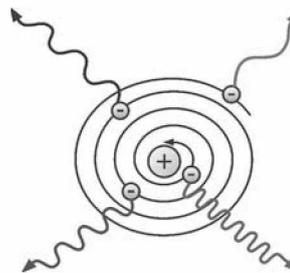


Рис. 13.5

За короткое время (порядка  $10^{-8}$  с) все электроны в атоме должны растратить всю свою энергию и упасть на ядро. То, что этого не происходит в устойчивых состояниях атома, показывает, что внутренние процессы в атоме не подчиняются классическим законам.

## § 78. Квантовые постулаты Бора

Следующий шаг в развитии представлений об устройстве атома сделал в 1913 году датский физик Н. Бор. Бор пришел к выводу, что при описании поведения атомных систем следует отказаться от многих представлений классической физики. Он сформулировал постулаты, которым должна удовлетворять новая теория о строении атомов.

**Первый постулат Бора** (постулат стационарных состояний): атомная система может находиться только в ос-

бых стационарных (или квантовых) состояниях, каждому из которых соответствует определенная энергия  $E_n$ . В стационарных состояниях атом не излучает.

Этот постулат находится в противоречии с классической механикой, согласно которой энергия движущегося электрона может быть любой. Он находится в противоречии и с электродинамикой, так как допускает возможность ускоренного движения электронов без излучения электромагнитных волн.

Согласно первому постулату Бора, атом характеризуется системой энергетических уровней, каждый из которых соответствует определенному стационарному состоянию.

Механическая энергия электрона, движущегося по замкнутой траектории вокруг положительно заряженного ядра, отрицательна.

Поэтому всем стационарным состояниям соответствуют значения энергии  $E_n < 0$ . При  $E_n \geq 0$  электрон удаляется от ядра (ионизация). Величина  $|E_1|$  называется *энергией ионизации*. Состояние с энергией  $E_1$  называется *основным состоянием атома* (рис. 13.6).

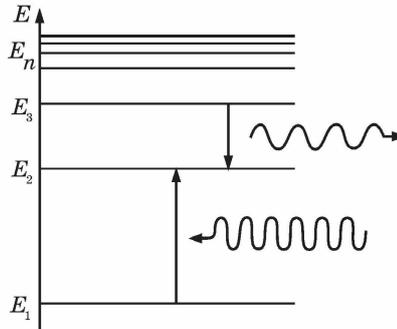


Рис. 13.6

**Второй постулат Бора** (правило частот): при переходе атома из одного стационарного состояния с энергией  $E_n$  в другое стационарное состояние с энергией  $E_m$  излучается или поглощается квант, энергия которого равна разности энергий стационарных состояний:

$$h\nu_{nm} = E_n - E_m,$$

где  $h$  — постоянная Планка.

Отсюда частота излучения:

$$\nu_{nm} = \frac{E_n - E_m}{h}.$$

Второй постулат Бора также противоречит электродинамике Максвелла, так как частота излучения определяется только изменением энергии атома и никак не зависит от характера движения электрона.

Второй закон Ньютона для электрона, вращающегося по круговой орбите радиуса  $r$  в кулоновском поле ядра, имеет вид:

$$\frac{m v^2}{r} = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r^2},$$

где  $e$  — элементарный заряд,  $\epsilon_0$  — электрическая постоянная.

Решая совместно формулы второго закона Ньютона и правила квантования, исключая скорость  $v$ , получим, что радиусы стационарных круговых орбит определяются выражением:

$$r_n = \frac{\epsilon_0 h^2}{\pi m_e e^2} n^2.$$

Целое число  $n = 1, 2, 3, \dots$  называется в квантовой физике атома **главным квантовым числом** и является номером орбиты электрона.

Радиус первой ( $n = 1$ ), самой близкой к ядру орбиты равен:

$$r_1 = a_0 = \frac{\epsilon_0 h^2}{\pi m_e e^2} = 5,29 \cdot 10^{-11} \text{ м.}$$

Радиусы последующих орбит возрастают пропорционально  $n^2$ :

$$r_n = r_1 n^2.$$

Например, радиус третьей орбиты ( $n = 3$ ) равен:

$$r_3 = r_1 \cdot 9 = 5,29 \cdot 10^{-11} \text{ м} \cdot 9 = 47,61 \cdot 10^{-11} \text{ м.}$$

Полная механическая энергия  $E$  системы из атомного ядра и электрона, обращающегося по стационарной круговой орбите радиусом  $r_n$ , равна:

$$E_n = E_k + E_p = \frac{m_e v^2}{2} - \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r_n}.$$

$E_p < 0$ , так как между электроном и ядром действуют силы притяжения. Подставляя в эту формулу выражения для  $v^2$  и  $r_n$ , получим:

$$E_n = -\frac{m_e e^4}{8\epsilon_0^2 h^2} \cdot \frac{1}{n^2}.$$

При  $n = 1$  энергия электрона в основном состоянии равна:

$$E_1 = -\frac{m_e e^4}{8\epsilon_0^2 h^2} = -21,68 \cdot 10^{-19} \text{ Дж} = -13,53 \text{ эВ.}$$

Это значение энергии является *энергией ионизации атома водорода*.

Энергии последующих орбит определяются по формуле:

$$E_n = \frac{E_1}{n^2}.$$

Согласно второму постулату Бора, при переходе электрона с одной стационарной орбиты с энергией  $E_n$  на другую стационарную орбиту с энергией  $E_m < E_n$ , атом испускает квант света, частота  $\nu_{nm}$  которого равна  $\Delta E_{nm}/h$ :

$$\nu_{nm} = \frac{\Delta E_{nm}}{h} = \frac{m_e e^4}{8\epsilon_0^2 h^3} \left( \frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right).$$

Эта формула в точности совпадает с эмпирической формулой Ридберга для спектральных серий атома водорода, если принять постоянную  $R$  равной  $R = \frac{m_e e^4}{8\epsilon_0^2 h^3}$ .

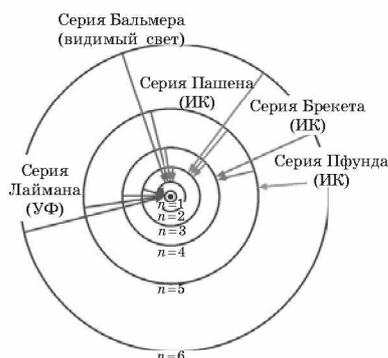


Рис. 13.7

Подстановка числовых значений  $m_e$ ,  $e$ ,  $\epsilon_0$  и  $h$  в эту формулу дает результат  $R = 3,29 \cdot 10^{15}$  Гц, который согласуется с эмпирическим значением  $R$ .

Рисунок 13.7 иллюстрирует образование спектральных серий в излучении атома водорода при переходе электрона с высоких стационарных орбит на более низкие.

*Ультрафиолетовая часть спектра:*

Серия Лаймана:  $\nu = R \left( \frac{1}{1^2} - \frac{1}{n^2} \right)$ ,  $m = 1$ ,  $n = 2, 3, 4, 5, 6, \dots$

*Видимая часть спектра:*

Серия Бальмера  $\nu = R \left( \frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right)$ ,  $m = 2$ ,  $n = 3, 4, 5, 6, \dots$

*Инфракрасная часть спектра:*

Серия Пашена:  $\nu = R \left( \frac{1}{3^2} - \frac{1}{n^2} \right)$ ,  $m = 3$ ,  $n = 4, 5, 6, \dots$

Серия Брекета:  $\nu = R \left( \frac{1}{4^2} - \frac{1}{n^2} \right)$ ,  $m = 4$ ,  $n = 5, 6, \dots$

Серия Пфунда:  $\nu = R \left( \frac{1}{5^2} - \frac{1}{n^2} \right)$ ,  $m = 5$ ,  $n = 6, \dots$

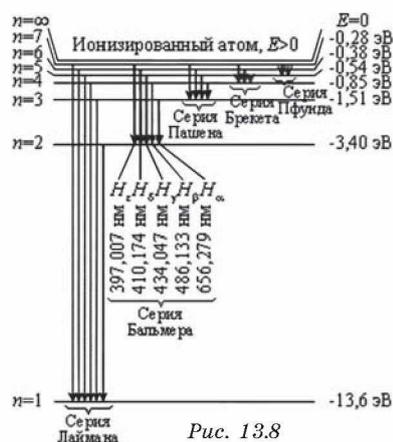


Рис. 13.8

На рисунке 13.8 изображена диаграмма энергетических уровней атома водорода и указаны переходы, соответствующие различным спектральным сериям. На диаграмме энергетических уровней атома водорода показаны переходы, соответствующие различным спектральным сериям. Для первых пяти линий серии Бальмера в видимой части спектра указаны длины волн.

Согласие боровской теории атома водорода с экспериментом служило веским аргументом в пользу ее справедливости. Однако попытки применить эту теорию к более сложным атомам не увенчались успехом.

Бор не смог дать физическую интерпретацию правилу квантования. Это было сделано де Бройлем на основе представлений о волновых свойствах частиц. Де Бройль предложил, что каждая орбита в атоме водорода соответствует волне, распространяющейся по окружности около ядра атома. Стационарная орбита возникает в том случае, когда волна непрерывно повторяет себя после каждого оборота вокруг ядра.

Стационарная орбита соответствует круговой стоячей волне де Бройля на длине орбиты. В стационарном квантовом состоянии атома водорода на длине орбиты должно укладываться по идее де Бройля целое число длин волн  $\lambda$  (рис. 13.9), т. е.  $n\lambda_n = 2\pi r_n$ . Подставляя в это соотношение длину волны де Бройля  $\lambda = h/p$ , где  $p = m_e v$  — импульс электрона, получим:

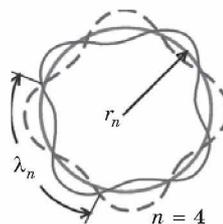


Рис. 13.9

$$n \frac{h}{m_e v} = 2\pi r_n, \text{ или } m_e v r_n = n \frac{h}{2\pi} \left( \frac{h}{2\pi} = \hbar, \text{ то } m_e v r_n = n\hbar \right).$$

Таким образом, боровское правило квантования связано с волновыми свойствами электронов.

**Опыты Франка и Герца.** Существование стационарных состояний атома и квантования энергии было доказано в опытах Д. Франка и Г. Герца (1913 г.), в которых исследовалось столкновение электронов с атомами ртути.

В опытах использовалась вакуумная трубка, заполненная парами ртути (давление  $\approx 13$  Па) (рис. 13.10).

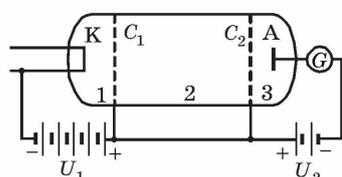


Рис. 13.10. К — накаленный катод; А — анод;  $C_1$  и  $C_2$  — сетки, соединенные между собой; G — гальванометр;  $U_1$  — ускоряющая разность потенциалов;  $U_2$  — тормозящая разность потенциалов.

Электроны, испускаемые катодом, ускоряются разностью потенциалов, приложенной между катодом и сеткой  $C_1$ . Между сеткой  $C_2$  и анодом приложен небольшой ( $\approx 0,5$  В) задерживающий потенциал. Электроны, ускоренные в области 1, попадают в область 2 между сетками, где испытывают соударения с атомами паров ртути.

Те электроны, которые после соударений имеют достаточную энергию, чтобы преодолеть задерживающий потенциал в области 3, достигают анода.

Согласно теории Бора, каждый из атомов ртути может получить лишь вполне определенную энергию, переходя при этом в одно из возбужденных состояний. Поэтому если в атомах действительно существуют стационарные состояния, то электроны, сталкиваясь с атомами ртути, должны терять энергию дискретно, определенными порциями, равными разности энергий соответствующих стационарных состояний атома.

В опытах, при увеличении ускоряющего потенциала вплоть до 4,86 В сила анодного тока возрастает монотонно, проходит через максимум (4,86 В), затем резко падает и возрастает вновь. Дальнейшие максимумы наблюдаются при  $2 \cdot 4,86$  и  $3 \cdot 4,86$  В.

Ближайшим к основному, невозбужденному, состоянию атома ртути  $E_1$  является возбужденное состояние  $E_2$ , отстоящее от основного по шкале энергий на 4,86 эВ. Пока разность потенциалов между катодом и сеткой меньше 4,86 В,

электроны, встречая на своем пути атомы ртути, испытывают с ними только упругие соударения. При  $e\phi = 4,86$  эВ энергия электрона становится достаточной, чтобы вызвать неупругий удар, при котором электрон отдает атому ртути всю кинетическую энергию, возбуждая переход одного из электронов атома из нормального энергетического состояния  $E_1$  на возбужденный энергетический уровень  $E_2$ :

$$E_2 - E_1 = 4,9 \text{ эВ.}$$

Электроны, потерявшие свою кинетическую энергию, уже не смогут преодолеть тормозящего поля и достигнуть анода.

Первое резкое падение анодного тока наблюдается при  $e\phi = 4,86$  эВ. При значениях энергии, кратных 4,86 эВ, электроны могут испытать с атомами ртути 2, 3, ... неупругие соударения, потеряв при этом полностью свою энергию, и не достигнуть анода, т. е. должно наблюдаться резкое падение анодного тока (рис. 13.11).

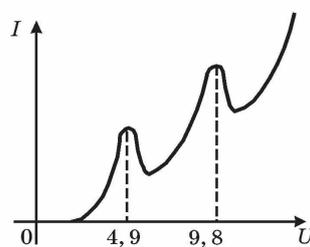


Рис. 13.11

Согласно боровской концепции, при обратном самопроизвольном переходе атома ртуть должна испускать кванты с частотой:

$$\nu = \frac{E_2 - E_1}{h} = 1,2 \cdot 10^{15} \text{ Гц.}$$

Спектральная линия с такой частотой действительно была обнаружена в ультрафиолетовой части спектра в излучении атомов ртути.

Представление Бора об определенных орбитах, по которым движутся электроны в атоме, весьма условны. На самом деле движение электрона в атоме очень мало похоже на движение планет или спутников.

## § 80. Лазеры

*Лазеры*, или *оптические квантовые генераторы*, — это когерентные источники излучения, обладающие рядом уникальных свойств. Лазер — от англ. Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation (усиление света при помощи индуцированного излучения). К настоящему времени создано большое количество лазеров с различными характеристиками — газовых, твердотельных, полупровод-

никовых, излучающих свет в различных оптических диапазонах. Лазеры могут работать в импульсном и непрерывном режимах. Мощность излучения лазеров может изменяться в пределах от долей милливатта до  $10^{12}$ – $10^{13}$  Вт (в импульсном режиме). Лазеры находят широкое применение в технологии обработки материалов, в медицине, в военной технике, в оптических системах навигации, связи и локации, в интерференционных экспериментах, в химии, в быту и т. д.

Важнейшим свойством лазерного излучения является высокая степень его монохроматичности. Уникальные свойства лазерного излучения возникают в результате согласованного, кооперативного испускания световых квантов многими атомами рабочего вещества.

Атом может находиться в различных энергетических состояниях с энергиями  $E_1$ ,  $E_2$  и т. д. В теории Бора эти состояния называются стабильными. На самом деле стабильным состоянием, в котором атом может находиться бесконечно долго в отсутствие внешних возмущений, является только основное состояние с наименьшей энергией. Все другие состояния нестабильны. Возбужденный атом может пребывать в этих состояниях лишь очень короткое время, порядка  $10^{-8}$  с, после этого он самопроизвольно переходит в одно из низших состояний, испуская квант света, частоту которого можно определить из второго постулата Бора. Излучение, испускаемое при самопроизвольном переходе атома из одного состояния в другое, называют *спонтанным*. На некоторых энергетических уровнях атом может пребывать значительно большее время, порядка  $10^{-3}$  с. Такие уровни называются *метастабильными*.

Переход атома в более высокое энергетическое состояние может происходить при резонансном поглощении фотона, энергия которого равна разности энергий атома в конечном и начальном состояниях.

Переходы между энергетическими уровнями атома не обязательно связаны с поглощением или испусканием фотонов. Атом может приобрести или отдать часть своей энергии и перейти в другое квантовое состояние в результате взаимодействия с другими атомами или столкновений с электронами. Такие переходы называются *безызлучательными*.

В 1916 г. А. Эйнштейн предсказал, что переход электрона в атоме с верхнего энергетического уровня на нижний может происходить под влиянием внешнего элект-

ромагнитного поля, частота которого равна собственной частоте перехода. Возникающее при этом излучение называют *вынужденным*, или *индуцированным*. Вынужденное излучение отличается от спонтанного излучения. В результате взаимодействия возбужденного атома с фотоном атом испускает еще один фотон той же самой частоты, распространяющийся в том же направлении. На языке волновой теории это означает, что атом излучает электромагнитную волну, у которой частота, фаза, поляризация и направление распространения точно такие же, как и у первоначальной волны. В результате вынужденного испускания фотонов амплитуда волны, распространяющейся в среде, возрастает. С точки зрения квантовой теории, в результате взаимодействия возбужденного атома с фотоном, частота которого равна частоте перехода, появляются два совершенно одинаковых фотона.

Индукцированное излучение является физической основой работы лазеров.

На рисунке 13.12 схематически представлены возможные механизмы переходов между двумя энергетическими состояниями атома.

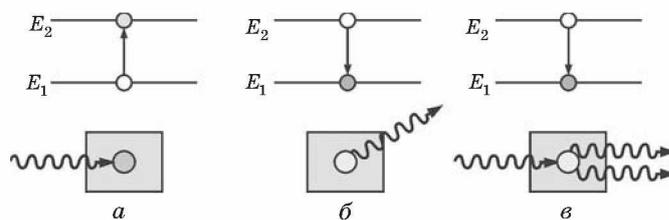


Рис 13.12: а — процесс поглощения; б — спонтанное испускание; в — индуцированное испускание квантов.

Рассмотрим слой прозрачного вещества, атомы которого могут находиться в состояниях с энергиями  $E_1$  и  $E_2$ ,  $E_2 > E_1$ . Пусть в этом слое распространяется излучение резонансной частоты перехода  $\nu = \Delta E/h$ . Большее количество атомов вещества будет находиться в нижнем энергетическом состоянии, некоторая часть атомов будет находиться в верхнем энергетическом состоянии, получая необходимую энергию при столкновениях с другими атомами. Обозначим населенности нижнего и верхнего уровней соответственно через  $n_1$  и  $n_2$ ,  $n_2 < n_1$ . При распространении резонансного излучения в такой среде будут происходить все три процесса, изображенные на рис. 13.12. Так

как  $n_2 < n_1$ , поглощение фотонов будет происходить чаще, чем индуцированное испускание. В результате прошедшее через слой вещества излучение будет ослабляться. Излучение, возникающее в результате спонтанных переходов, некогерентно и распространяется во всевозможных направлениях и не дает вклада в проходящую волну.

Чтобы проходящая через слой вещества волна усиливалась, нужно искусственно создать условия, при которых  $n_2 > n_1$ , т. е. создать *инверсную населенность уровней*. Такая среда является термодинамически неравновесной. Идея использования неравновесных сред для получения оптического усиления впервые была высказана В. А. Фабрикантом в 1940 г. В 1954 г. российские физики Н. Г. Басов и А. М. Прохоров и независимо от них американский ученый Ч. Таунс использовали явление индуцированного испускания для создания микроволнового генератора радиоволн с длиной волны  $\lambda = 1,27$  см. За разработку нового принципа усиления и генерации радиоволн в 1964 г. все трое были удостоены Нобелевской премии.

Среда, в которой создана инверсная населенность уровней, называется *активной*. Она может служить резонансным усилителем светового сигнала. Для того чтобы возникла генерация света, необходимо использовать *обратную связь*. Для этого активную среду нужно расположить между двумя высококачественными зеркалами, отражающими свет строго назад, чтобы он многократно прошел через активную среду, вызывая лавинообразный процесс индуцированной эмиссии когерентных фотонов. При этом в среде должна поддерживаться инверсная населенность уровней. Этот процесс в лазерной физике называют *накачкой*.

Начало лавинообразному процессу в такой системе при определенных условиях может положить случайный спонтанный акт, при котором возникает излучение, направленное вдоль оси системы. Через некоторое время в такой системе возникает стационарный режим генерации. Лазерное излучение выводится наружу через одно (или оба) из зеркал, обладающее частичной прозрачностью.

На рисунке 13.13 схематически представлено развитие лавинообразного процесса в лазере.

Существуют различные способы получения среды с инверсной населенностью уровней. В рубиновом лазере используется оптическая накачка. Атомы возбуждаются за счет поглощения света. Но для этого недостаточно только двух уровней. Каким бы мощным ни был свет лампы—

накачки, число возбужденных атомов не будет больше числа невозбужденных. В рубиновом лазере накачка производится через третий выше расположенный уровень.

Трехуровневая схема оптической накачки приведена на рисунке 13.14. Указаны «времена жизни» уровней  $E_2$  и  $E_3$ . Уровень  $E_2$  — метастабильный. Переход между уровнями  $E_3$  и  $E_2$  — безызлучательный.

Лазерный переход осуществляется между уровнями  $E_2$  и  $E_1$ . В кристалле рубина уровни  $E_1$ ,  $E_2$  и  $E_3$  принадлежат примесным атомам хрома.

После вспышки мощной лампы, расположенной рядом с рубиновым стержнем, многие атомы хрома, входящего в виде примеси в кристалл рубина (около 0,05 %), переходят в состояние с энергией  $E_3$ , а через промежуток  $\tau \approx 10^{-8}$  с они переходят в состояние с энергией  $E_2$ . Перенаселенность возбужденного уровня  $E_2$  по сравнению с невозбужденным уровнем  $E_1$  возникает из-за относительно большого времени жизни уровня  $E_2$ .

Лазер на рубине (рис. 13.15) работает в импульсном режиме на длине волны 694 нм (темно-вишневый свет), мощность излучения может достигать в импульсе  $10^6$ – $10^9$  Вт.

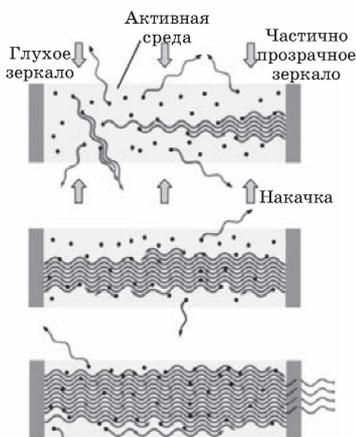


Рис. 13.13

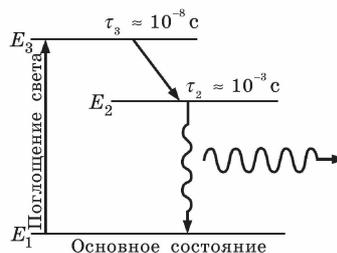


Рис. 13.14

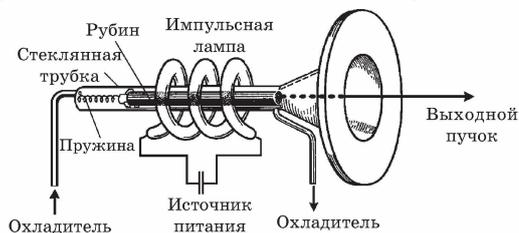


Рис. 13.15

Исторически это был первый действующий лазер (американский физик Т. Майман, 1960 г.).

Одним из самых распространенных лазеров в настоящее время является газовый лазер на смеси гелия и неона. Общее давление в смеси составляет порядка  $10^2$  Па при соотношении компонент He и Ne примерно 10 : 1. Активным газом, на котором возникает генерация на длине волны 632,8 нм (ярко-красный свет) в непрерывном режиме, является неон. Гелий является буферным газом, он участвует в механизме создания инверсной населенности одного из верхних уровней неона. Излучение He-Ne лазера обладает исключительной монохроматичностью. Расчетная спектральная ширина линии генерации He-Ne лазера составляет примерно  $\Delta\nu \approx 5 \cdot 10^{-4}$  Гц. Это очень малая величина. Время когерентности такого излучения порядка  $\tau \approx 1/\Delta\nu \approx 2 \cdot 10^3$  с, а длина когерентности  $c\tau \approx 6 \cdot 10^{11}$  м, т. е. больше диаметра земной орбиты.

Первый гелий-неоновый лазер был создан в 1961 г. На рисунке 13.16 представлена упрощенная схема уровней гелия и неона и механизм создания инверсной населенности лазерного перехода.

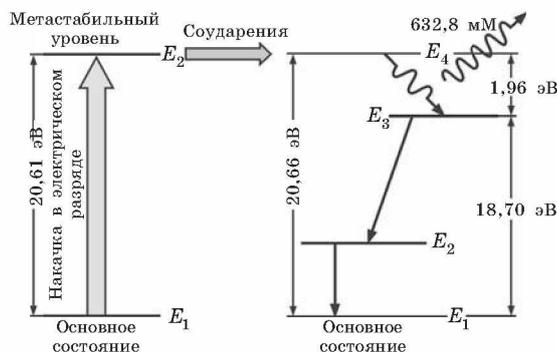


Рис. 13.16. Механизм накачки He-Ne лазера. Прямыми стрелками указаны спонтанные переходы в атомах неона.

Накачка лазерного перехода  $E_4 \rightarrow E_3$  в неоне осуществляется следующим образом. В высоковольтном электрическом разряде вследствие соударений с электронами значительная часть атомов гелия переходит в верхнее метастабильное состояние  $E_2$ . Возбужденные атомы гелия неупруго сталкиваются с атомами неона, находящимися в основном состоянии, и передают им свою энергию.

Уровень  $E_4$  неона расположен на 0,05 эВ выше метастабильного уровня  $E_2$  гелия.

Недостаток энергии компенсируется за счет кинетической энергии соударяющихся атомов. На уровне  $E_4$  неона возникает инверсная населенность по отношению к уровню  $E_3$ , который сильно обедняется за счет спонтанных переходов на ниже расположенные уровни. При достаточно высоком уровне накачки в смеси гелия и неона начинается лавинообразный процесс размножения идентичных когерентных фотонов. Если кювета со смесью газов помещена между высокоотражающими зеркалами, то возникает лазерная генерация. На рисунке 13.17 изображена схема устройства гелий-неонового лазера.

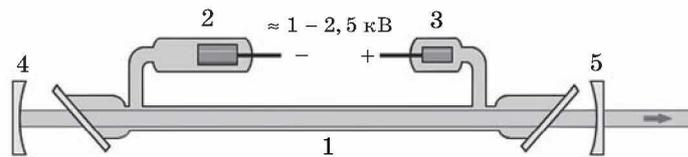


Рис. 13.17. Схема гелий-неонового лазера: 1 — стеклянная кювета со смесью гелия и неона, в которой создается высоковольтный разряд; 2 — катод; 3 — анод; 4 — глухое сферическое зеркало с пропусканием менее 0,1 %; 5 — сферическое зеркало с пропусканием 1–2 %.

Современные высокостабильные гелий-неоновые лазеры производятся в моноблочном исполнении. Для этого используется стеклообразное вещество — ситалл, обладающий практически нулевым температурным коэффициентом расширения. В куске ситалла в форме прямоугольного параллелепипеда просверливается канал, к торцам которого на оптическом контакте приклеиваются лазерные зеркала. Канал заполняется смесью гелия и неона. Катод и анод вводятся через дополнительные боковые каналы. Такая моноблочная конструкция обеспечивает высокую механическую и тепловую стабильность.

Недостаток лазеров — низкий КПД (несколько 1%). Однако в настоящее время созданы полупроводниковые лазеры с высоким КПД (до 50%), представляющие собой светодиоды, работающие при большой плотности тока.

### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ К ГЛАВЕ XIII

1. Какие факты свидетельствуют о том, что атом не является «неделимым» и имеет сложную структуру?
2. Начертите и объясните схему опыта Резерфорда по рассеиванию  $\alpha$ -частиц. Что наблюдается в этом опыте?
3. Объясните причину рассеивания  $\alpha$ -частиц атомами вещества.
4. В чем сущность планетарной модели атома? Начертите и объясните ее схему.
5. Почему планетарная модель атома не согласуется с законами классической физики?
6. В чем состоит физический смысл порядкового номера элементов в таблице Менделеева?
7. Что такое электрон-вольт (эВ)? Каково его соотношение с джоулем?
7. Сформулируйте первый и второй постулат Бора.
8. Сформулируйте правило квантования круговых орбит и запишите формулу.
9. Выведите формулу, по которой можно определить скорость электрона на любой стационарной круговой орбите.
10. Начертите схему энергетических уровней атома водорода и объясните механизм образования спектральных линий.
11. Как называется серия спектральных линий в видимой части спектра излучения атома водорода?
12. Напишите формулу, позволяющую вычислить частоту любой спектральной линии в спектре излучения атома водорода. Чему равна постоянная Ридберга?
13. В каком случае атом излучает квант электромагнитной энергии, а в каком поглощает ее?
14. Что такое лазер?
15. Какое излучение называют спонтанным и почему оно некогерентно?
16. Какое излучение называют вынужденным или индуцированным? Поясните рисунком.
17. Объясните принцип действия лазера. Объясните процесс получения вынужденного излучения по трехуровневой системе.
18. Объясните устройство рубинового лазера.
19. Какие типы лазеров вы знаете и в каком режиме они работают?
20. Назовите основные свойства лазерного излучения.
21. Перечислите основные сферы применения лазеров.

### ТЕСТОВЫЕ ЗАДАНИЯ К ГЛАВЕ XIII

1. (96/10-45). При переходе электрона с одного стационарного уровня на другой атом водорода излучает свет частотой  $5 \cdot 10^{14}$  Гц. На какую величину (Дж) при этом уменьшается энергия атома? Постоянная Планка  $h = 6,6 \cdot 10^{-34}$  Дж·с.

- А)  $1,1 \cdot 10^{-19}$ . В)  $2,2 \cdot 10^{-19}$ . С) 0. D)  $6,6 \cdot 10^{-19}$ . E)  $3,3 \cdot 10^{-19}$ .

2. (96/8-18). При переходе атома из верхнего возбужденного состояния в нижнее его энергия уменьшается на  $3 \cdot 10^{-19}$  Дж. Какова частота световой волны, излучаемой атомом?

- А)  $4,7 \cdot 10^{15}$  Гц.      С)  $4 \cdot 10^{15}$  Гц.      Е)  $7,4 \cdot 10^{14}$  Гц.  
 В)  $4,5 \cdot 10^{14}$  Гц.      D)  $1,2 \cdot 10^{14}$  Гц.

3. (03/6-60). На сколько (Дж) увеличится энергия атома при поглощении фотона с импульсом  $1,5 \cdot 10^{-27}$  кг·м/с?

- А)  $1,5 \cdot 10^{-19}$ . В)  $4,5 \cdot 10^{-19}$ . С)  $3 \cdot 10^{-19}$ . D)  $1,5 \cdot 10^{-25}$ . Е)  $4,5 \cdot 10^{-27}$ .

4. (96/15-107). Электрон, поглощая фотон с энергией 13 эВ, может переходить с первого энергетического уровня на третий. При переходе электрона со второго уровня на первый излучается фотон с энергией 10 эВ. Фотон какой энергии должен поглощать электрон, чтобы перейти со второго уровня на третий?

- А) энергия фотона может быть различной.  
 В) 1,5 эВ.      D) 11,5 эВ.  
 С) 3 эВ.      Е) 23 эВ.

5. (98/1-65). На рисунке представлена диаграмма энергетических уровней атома. Какой стрелкой обозначен переход электрона с излучением фотона наибольшей частоты?

- А) 1.      В) 2.      С) 3.      D) 4.      Е) 5.

6. (98/2- ). На рисунке представлена диаграмма энергетических уровней атома. Какой стрелкой обозначен переход электрона с поглощением фотона наибольшей частоты?

- А) 5.      В) 4.      С) 3.      D) 2.      Е) 1.

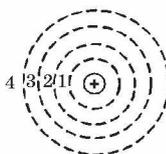
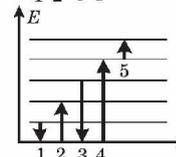
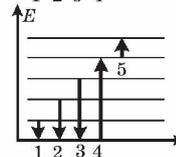
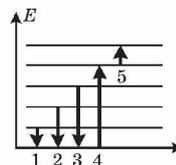
7. (98/5-57). На рисунке представлена диаграмма энергетических уровней атома. Какой стрелкой обозначен переход электрона с поглощением фотона наименьшей частоты?

- А) 5.      В) 4.      С) 3.      D) 2.      Е) 1.

8. (98/9-51). На рисунке изображены условные электронные орбиты атома. На каких орбитах электроны имеют наибольшую и наименьшую энергию?

- А) НПО.  
 В) на 4-ой наименьшую, на 1-ой наибольшую.  
 С) на 3-ей наибольшую, на 2-ой наименьшую.  
 D) на 4-ой наибольшую, на 1-ой наименьшую.  
 Е) на всех орбитах имеют одинаковую энергию.

9. (03/6-59). Чему равен импульс фотона (кг·м/с), испущенного атомом при переходе электрона из одного состояния в другое, отличающееся по энергии на  $3 \cdot 10^{-19}$  Дж?



А)  $3 \cdot 10^{-25}$ . В)  $1,5 \cdot 10^{-24}$ . С)  $1 \cdot 10^{-27}$ . D)  $2 \cdot 10^{-25}$ . Е)  $1,5 \cdot 10^{-27}$ .

10. (01/1-2). Чему равна средняя кинетическая энергия электрона на первой боровской орбите атома водорода (эВ)?

А) 1,6. В) 6,8. С) 9,1. D) 13,6. Е) 27,2.

11. (03/9-17). При переходе электрона с одного энергетического уровня на другой излучается фотон с длиной волны 600 нм. На сколько при этом изменяется энергия атома (Дж)? ( $h = 6,6 \cdot 10^{-34}$  Дж·с.)

А)  $3,3 \cdot 10^{-19}$ . В)  $2,2 \cdot 10^{-21}$ . С)  $9 \cdot 10^{-20}$ . D)  $6,6 \cdot 10^{-24}$ . Е)  $1,1 \cdot 10^{-20}$ .

12. (03/9-75). По какому выражению определяется частота света, излучаемого при переходе атома из возбужденного состояния с энергией  $E_m$  в основное состояние с энергией  $E_1$ ?

А)  $(E_m - E_1)h$ . В)  $\frac{E_1}{h}$ . С)  $\frac{E_m}{h}$ . D)  $\frac{E_m + E_1}{h}$ . Е)  $\frac{E_m - E_1}{h}$ .

13. (01/1-10). Чему равна (км/с) вдали от ядра скорость электрона, выбитого из невозбужденного атома водорода фотоном с энергией  $E = 15,5$  эВ, если длина коротковолновой границы спектра атома водорода  $\lambda = 910$  А? ( $m_e = 9,1 \cdot 10^{-31}$  кг,  $h = 6,6 \cdot 10^{-34}$  Дж·с.)

А) 810. В) 650. С) 410. D) 230. Е) 140.

14. (03/9-19). Определите скорость движения электрона по орбите в атоме водорода (м/с). ( $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл;  $m = 9,1 \cdot 10^{-31}$  кг;  $r = 10^{-8}$  см;  $k = 9 \cdot 10^9$  Н·м<sup>2</sup>/кг<sup>2</sup>.)

А)  $9 \cdot 10^7$ . В)  $9,1 \cdot 10^6$ . С)  $5,6 \cdot 10^7$ . D)  $8 \cdot 10^7$ . Е)  $1,6 \cdot 10^6$ .

15. (00/9-87). Какова энергия фотона, испускаемого атомом при переходе атома из состояния с энергией  $E_1$  в состояние с энергией  $E_2$ ?

А)  $E_1$ . В)  $E_2$ . С)  $E_1 - E_2$ . D)  $E_1 + E_2$ . Е)  $E_2 - E_1$ .

16. (00/10- ). Фотон какой энергии поглощает атом при переходе из состояния с энергией  $E_1$  в состояние с энергией  $E_2$ ?

А)  $E_1$ . В)  $E_2$ . С)  $E_1 - E_2$ . D)  $E_2 - E_1$ . Е)  $E_1 + E_2$ .

17. (01/11-56). При поглощении кванта света энергия атома изменилась на 6 эВ. Найдите длину волны поглощенного света (мкм) ( $h = 6,6 \cdot 10^{-34}$  Дж·с,  $1\text{эВ} = 1,6 \cdot 10^{-19}$  Дж.)

А) 0,35. В) 0,2. С) 0,4. D) 0,3. Е) 2,5.

18. (02/6-16). На сколько эВ изменится энергия атома, когда он поглощает квант излучения с частотой  $3,2 \cdot 10^{16}$  Гц? ( $h = 6,6 \cdot 10^{-34}$  Дж·с,  $1\text{эВ} = 1,6 \cdot 10^{-19}$  Дж.)

А) 160. В) 150. С) 264. D) 132. Е) 66.

19. (01/5-53). На какую стационарную орбиту переходят электроны в атоме водорода при испускании видимых лучей?

А) во вторую. В) в первую. С) в третью. D) в четвертую. Е) НПО.

В) в третью. D) в четвертую.

## Глава XIV. ФИЗИКА АТОМНОГО ЯДРА И ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ

Представление о том, что мир состоит из *фундаментальных частиц*, имеет долгую историю. Впервые мысль о существовании мельчайших невидимых частиц, из которых состоят все окружающие предметы, была высказана за 400 лет до нашей эры греческим философом Демокритом. Он назвал эти частицы атомами, т. е. неделимыми частицами. Наука начала использовать представление об атомах только в начале XIX века, когда на этой основе удалось объяснить целый ряд химических явлений. В 30-е годы XIX века в теории электролиза, развитой М. Фарадеем, появилось понятие иона и было выполнено измерение элементарного заряда. Конец XIX века ознаменовался открытием явления радиоактивности (А. Беккерель, 1896 г.), а также открытиями электронов (Дж. Томсон, 1897 г.) и  $\alpha$ -частиц (Э. Резерфорд, 1899 г.). В 1905 г. в физике возникло представление о квантах электромагнитного поля — фотонах (А. Эйнштейн).

В 1911 г. было открыто атомное ядро (Э. Резерфорд) и окончательно было доказано, что атомы имеют сложное строение. В 1919 г. Резерфорд в продуктах расщепления ядер атомов ряда элементов обнаружил протоны. В 1932 г. Дж. Чедвик открыл нейтрон. Стало ясно, что ядра атомов, как и сами атомы, имеют сложное строение. Возникла протон-нейтронная теория строения ядер (Д. Д. Иваненко и В. Гейзенберг). В том же 1932 г. в космических лучах был открыт позитрон (К. Андерсон). Позитрон — положительно заряженная частица, имеющая ту же массу и тот же (по модулю) заряд, что и электрон. Существование позитрона было предсказано П. Дираком еще в 1928 г. В эти годы были обнаружены и исследованы взаимные превращения протонов и нейтронов, и стало ясно, что эти частицы также не являются неизменными элементарными «кирпичиками» природы. В 1937 г. в космических лучах были обнаружены частицы с массой в 207 электронных масс, названные *мюонами* ( $\mu$ -мезонами). Затем в 1947–1950 гг. были открыты *пионы* (т. е.  $\pi$ -мезоны), которые, по современным представлениям, осуществляют взаимодействие между нуклонами в ядре. В последующие годы число вновь открываемых частиц стало быстро расти. Этому способствовали исследования космических лучей, развитие усовершенствованной техники и изучение ядерных реакций.

## § 81. Состав атомных ядер

С момента открытия строения атома (Резерфорд, 1911 г.) многочисленные экспериментальные факты убеждали, что атомные ядра, так же как и сами атомы, имеют сложную структуру.

В продуктах расщепления ядер атомов многих элементов были обнаружены ядра атома водорода, Э. Резерфорд назвал эту частицу *протоном* и высказал предположение, что протоны входят в состав всех атомных ядер.

Отношение заряда ядра к его массе не остается постоянным для разных ядер. При переходе к более тяжелым ядрам масса ядра растет быстрее, чем заряд, так что в состав ядер должны входить еще какие-то другие частицы.

В 1932 г. Джеймс Чедвик открыл *нейтрон* — нейтральную частицу с массой, чуть большей массы протона. Д. Д. Иваненко и И. Е. Тамм, а также независимо от них В. Гейзенберг предложили протонно-нейтронную модель ядра, согласно которой *атомные ядра различных элементов состоят из двух частиц* — протонов и нейтронов. Дальнейшие исследования подтвердили эту модель.

*Протон* представляет собой атом водорода, из которого удален единственный электрон. Протон  $p$  обозначается  ${}^1_1H$ . Положительный заряд протона в точности равен элементарному заряду  $e = 1,60217733 \cdot 10^{-19}$  Кл, то есть равен по модулю отрицательному заряду электрона. Масса протона равна  $m_p = 1,67262 \cdot 10^{-27}$  кг. В ядерной физике массу частицы выражают в атомных единицах массы (а. е. м.), равной  $\frac{1}{12}$  массы атома углерода

$$1 \text{ а. е. м.} = 1,66057 \cdot 10^{-27} \text{ кг.}$$

Следовательно,  $m_p = 1,007276$  а. е. м. Во многих случаях массу частицы удобно выражать в эквивалентных значениях энергии в соответствии с формулой Эйнштейна

$$E = mc^2.$$

Так как  $1 \text{ эВ} = 1,60218 \cdot 10^{-19}$  Дж, в энергетических единицах масса протона равна  $938,272331$  МэВ.

*Нейтрон* — это элементарная частица, масса нейтрона равна  $m_n = 1,67493 \cdot 10^{-27}$  кг =  $1,008665$  а. е. м. В энергетических единицах масса нейтрона равна  $939,56563$  МэВ. Масса нейтрона приблизительно на две электронные массы превосходит массу протона. Нейтрон обозначается  ${}^1_0n$ .

Протоны и нейтроны принято называть *нуклонами*.

Число протонов, входящих в состав атомного ядра, обозначают символом  $Z$  и называют *зарядовым числом* или *атомным номером* (это порядковый номер в периодической таблице Менделеева). Заряд ядра равен  $Ze$ , где  $e$  — элементарный заряд. Число нейтронов обозначают символом  $N$ . Общее число нуклонов (т. е. протонов и нейтронов) называют массовым числом  $A$ :

$$A = Z + N.$$

Ядра химических элементов обозначают символом  ${}^A_Z X$ , где  $X$  — химический символ элемента.

Например,  ${}^4_2\text{He}$  — гелий,  ${}^{16}_8\text{O}$  — кислород,  ${}^{12}_6\text{C}$  — углерод.

Конкретное ядро с данными  $Z, N$  называется *нуклидом*.

*Изотопами* называются ядра одного и того же химического элемента, отличающиеся числом нейтронов  $N$ . Изотопы — нуклиды с одинаковыми  $Z$ . У большинства химических элементов имеется несколько изотопов. Например, у водорода три изотопа:  ${}^1_1\text{H}$  — обычный водород,  ${}^2_1\text{H}$  — дейтерий и  ${}^3_1\text{H}$  — тритий. У углерода 6 изотопов, у кислорода — 3. Химические элементы в природных условиях обычно представляют собой смесь изотопов. Присутствие изотопов определяет значение атомной массы природного элемента в периодической таблице Менделеева. Так, например, относительная атомная масса природного углерода равна 12,011.

*Изобары* — нуклиды с одинаковыми  $A$ , но разными  $Z$ . Примером ядер изобар могут служить ядра  ${}^{10}_4\text{Be}$ ,  ${}^{10}_5\text{B}$ ,  ${}^{10}_6\text{C}$ .

*Изотоны* — нуклиды с одинаковыми  $N$  ( $N = A - Z$ ). Примером ядер изотонов могут служить ядра  ${}^{13}_6\text{C}$ ,  ${}^{14}_7\text{N}$ .

*Изомеры* — ядра с одинаковыми  $Z$  и  $A$ , отличающиеся периодом полураспада. Например, изомеры ядра  ${}^{80}_{35}\text{Br}$  имеют периоды полураспада 18 минут и 4,4 часа.

**Размеры ядер.** Если представить себе ядро как шарик определенного радиуса  $R$ , внутри которого упакованы  $A$  нуклонов, то объем такого шарика растет пропорционально  $A$ . Следовательно, радиус атомного ядра определяется эмпирической формулой:

$$R = R_0 A^{1/3},$$

где  $R_0 = (1,3 - 1,7) \cdot 10^{-15}$  м.

Плотность ядерного вещества примерно одинакова для всех ядер  $\sim 10^{17}$  кг/м<sup>3</sup>.

## § 82. Энергия связи ядер

**Ядерные силы.** Для того чтобы атомные ядра были устойчивыми, протоны и нейтроны должны удерживаться внутри ядер огромными силами, во много раз превосходящими силы кулоновского отталкивания протонов.

Силы, удерживающие нуклоны в ядре, называются **ядерными**. Они представляют собой проявление так называемого сильного взаимодействия. Ядерные силы примерно в 100 раз превосходят электростатические силы и на десятки порядков превосходят силы гравитационного взаимодействия нуклонов. Особенностью ядерных сил является их *короткодействующий* характер. Ядерные силы заметно проявляются лишь на расстояниях порядка размеров ядра ( $10^{-14}$ – $10^{-15}$  м). На больших расстояниях проявляется действие сравнительно медленно убывающих кулоновских сил.

Протоны и нейтроны в ядре ведут себя одинаково в отношении сильного взаимодействия, т. е. ядерные силы не зависят от наличия у частиц электрического заряда (*зарядовая независимость*).

**Энергия связи.** Энергия связи ядра равна минимальной энергии, которую необходимо затратить для полного расщепления ядра на отдельные частицы.

Из закона сохранения энергии следует, что энергия связи равна той энергии, которая выделяется при образовании ядра из отдельных частиц.

Масса любого ядра  $M_{\text{я}}$  всегда меньше суммы масс входящих в его состав протонов и нейтронов:  $M_{\text{я}} < Zm_{\text{p}} + Nm_{\text{n}}$ .

Дефектом массы называется разность масс:

$$\Delta M = Zm_{\text{p}} + Nm_{\text{n}} - M_{\text{я}}.$$

По дефекту массы можно определить с помощью формулы Эйнштейна  $E = mc^2$  энергию, выделившуюся при образовании данного ядра, т. е. энергию связи ядра  $E_{\text{св}}$ :

$$E_{\text{св}} = \Delta Mc^2 = (Zm_{\text{p}} + Nm_{\text{n}} - M_{\text{я}})c^2.$$

Эта энергия выделяется в виде излучения  $\gamma$ -квантов.

**Удельная энергия связи** — это энергия связи, приходящаяся на один нуклон. На рис. 14.1 приведен график зависимости удельной энергии связи от массового числа  $A$ .

Для легких ядер удельная энергия связи сначала круто возрастает от 1,1 МэВ/нуклон у дейтерия  ${}^2_1\text{H}$  до 7,1 МэВ/нуклон у гелия  ${}^4_2\text{He}$ . Затем, претерпев ряд скачков, удельная

энергия медленно возрастает до максимальной величины 8,7 МэВ/нуклон у элементов с массовым числом  $A = 50-60$ , а потом сравнительно медленно уменьшается у тяжелых элементов. У урана  ${}^{238}_{92}\text{U}$  она составляет 7,6 МэВ/нуклон. Уменьшение удельной энергии связи при переходе к тяжелым элементам объясняется увеличением энергии кулоновского отталкивания протонов. В тяжелых ядрах связь между нуклонами ослабевает, а сами ядра становятся менее прочными.

В случае стабильных легких ядер, где роль кулоновского взаимодействия невелика, числа протонов и нейтронов  $Z$  и  $N$  оказываются одинаковыми ( ${}^4_2\text{He}$ ,  ${}^6_3\text{Li}$ ,  ${}^{10}_5\text{B}$ ). Но у тяжелых ядер, содержащих большое число протонов, из-за возрастания энергии кулоновского отталкивания протонов для обеспечения устойчивости требуются дополнительные нейтроны. Из рис. 14.1 видно, что наиболее устойчивыми с энергетической точки зрения являются ядра элементов средней части таблицы Менделеева.

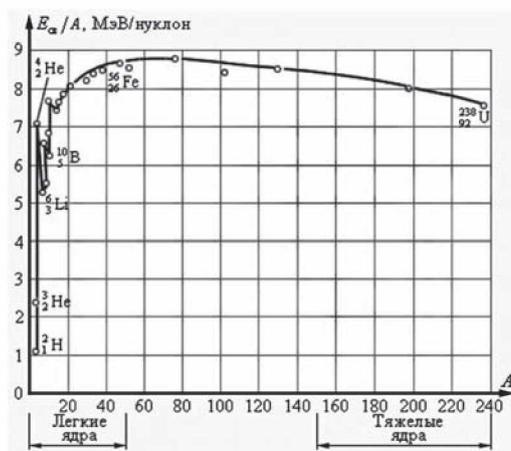


Рис. 14.1

Существуют две возможности получения положительного энергетического выхода при ядерных превращениях:

- 1) деление тяжелых ядер на более легкие;
- 2) слияние легких ядер в более тяжелые.

Синтез легких ядер сопровождается примерно в 6 раз большим выделением энергии на один нуклон по сравнению с делением тяжелых ядер.

## § 83. Радиоактивность

**Радиоактивностью** называется свойство атомных ядер самопроизвольно превращаться в другие ядра с испусканием частиц.

Почти 90 % из известных 2500 атомных ядер нестабильны, то есть *радиоактивны*. У больших ядер нестабильность возникает вследствие конкуренции между притяжением нуклонов ядерными силами и кулоновским отталкиванием протонов. Не существует стабильных ядер с зарядовым числом  $Z > 83$  и массовым числом  $A > 209$ . Но радиоактивными могут оказаться и ядра атомов с существенно меньшими значениями чисел  $Z$  и  $A$ . Если ядро содержит значительно больше протонов, чем нейтронов, то нестабильность обуславливается избытком энергии кулоновского взаимодействия. Ядра, которые содержали бы большой избыток нейтронов над числом протонов, оказываются нестабильными вследствие того, что масса нейтрона превышает массу протона. Увеличение массы ядра приводит к увеличению его энергии.

Явление радиоактивности было открыто в 1896 г. французским физиком А. Беккерелем, который обнаружил, что соли урана испускают неизвестное излучение, способное проникать через непрозрачные для света преграды и вызывать почернение фотоэмульсии. Через два года французские физики Мария и Пьер Кюри обнаружили радиоактивность тория и открыли два новых радиоактивных элемента — полоний  ${}_{84}^{210}\text{Po}$  и радий  ${}_{88}^{226}\text{Ra}$ .

В последующие годы исследованием природы радиоактивных излучений занимались многие физики, в том числе Э. Резерфорд и его ученики.

### Состав радиоактивного излучения.

Радиоактивные ядра могут испускать частицы трех видов: положительно и отрицательно заряженные и нейтральные. Эти три вида излучений были названы  $\alpha$ -,  $\beta$ -,  $\gamma$ -излучениями.

На рис. 14.2 изображена схема эксперимента, позволяющая обнаружить сложный состав радиоактивного излучения.

В магнитном поле  $\alpha$ - и  $\beta$ -лучи испытывают отклонения в

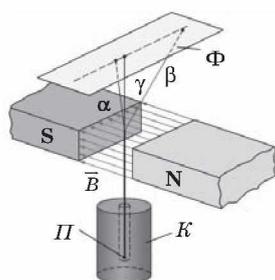
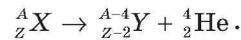


Рис. 14.2.  $K$  — свинцовый контейнер;  $\Pi$  — радиоактивный препарат;  $\Phi$  — фотопластинка;  $B$  — магнитное поле.

противоположные стороны, причем  $\beta$ -лучи отклоняются значительно больше.  $\gamma$ -лучи в магнитном поле вообще не отклоняются.

Наименьшей проникающей способностью обладает  $\alpha$ -излучение. В воздухе при нормальных условиях  $\alpha$ -лучи проходят путь в несколько сантиметров.  $\beta$ -лучи гораздо меньше поглощаются веществом. Они способны пройти через слой алюминия толщиной в несколько миллиметров. Наибольшей проникающей способностью обладают  $\gamma$ -лучи, способные проходить через слой свинца толщиной 5–10 см.  $\alpha$ -лучи представляют собой поток  $\alpha$ -частиц — ядер гелия  ${}^4_2\text{He}$ .  $\beta$ -лучи — это поток электронов,  $\gamma$ -лучи представляют собой коротко-волновое электромагнитное излучение с чрезвычайно малой длиной волны  $\gamma < 10^{-10}$  м и вследствие этого — ярко выраженными корпускулярными свойствами, т. е. является потоком частиц —  $\gamma$ -квантов.

**Альфа-распад.** Альфа-распадом называется самопроизвольное превращение атомного ядра с числом протонов  $Z$  и нейтронов  $N$  в другое (дочернее) ядро, содержащее число протонов  $Z - 2$  и нейтронов  $N - 2$ . При этом испускается  $\alpha$ -частица — ядро атома гелия  ${}^4_2\text{He}$ .

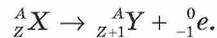


Правило смещения при  $\alpha$ -распаде: *в результате  $\alpha$ -распада элемент смещается на две клетки к началу периодической системы.*

В теории  $\alpha$ -распада предполагается, что внутри ядер могут образовываться группы, состоящие из двух протонов и двух нейтронов, т. е.  $\alpha$ -частица.

**Бета-распад.** При бета-распаде из ядра вылетает электрон. Внутри ядер электронов нет, они возникают при  $\beta$ -распаде в результате превращения нейтрона в протон.

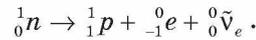
При  $\beta$ -распаде зарядовое число  $Z$  увеличивается на единицу, а массовое число  $A$  остается неизменным. дочернее ядро оказывается ядром одного из изотопов элемента, порядковый номер которого в таблице Менделеева на единицу превышает порядковый номер исходного ядра.



Правило смещения при  $\beta$ -распаде: *в результате  $\beta$ -распада элемент смещается на одну клетку ближе к концу периодической системы.*

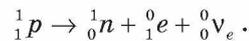
Процесс превращения нейтрона в протон может происходить не только внутри ядра, но и со свободными нейтронами. Среднее время жизни свободного нейтрона составляет около 15 минут. При распаде нейтрон  ${}^1_0n$  превращается в протон  ${}^1_1p$  и электрон  ${}^0_{-1}e$ .

При распаде нейтрона выделяется еще одна частица — *нейтрино* (маленький нейтрон), с нулевыми значениями массы и заряда  ${}^0_0\tilde{\nu}_e$ . Поэтому реакция распада нейтрона записывается в виде



Аналогичный процесс происходит и внутри ядер при  $\beta$ -распаде. Электрон, образующийся в результате распада одного из ядерных нейтронов, выбрасывается из «родительского» ядра с огромной скоростью, которая может отличаться от скорости света лишь на доли процента. Так как распределение энергии, выделяющейся при  $\beta$ -распаде, между электроном, нейтрино и дочерним ядром носит случайный характер,  $\beta$ -электроны могут иметь различные скорости в широком интервале.

Наряду с *электронным*  $\beta$ -распадом обнаружен *позитронный*  $\beta^+$ -распад, при котором из ядра вылетает *позитрон*  ${}^0_{+1}e$ :



**Гамма-распад.** В отличие от  $\alpha$ - и  $\beta$ -радиоактивности  $\gamma$ -радиоактивность ядер не связана с изменением внутренней структуры ядра и не сопровождается изменением зарядового или массового чисел. Как при  $\alpha$ -, так и при  $\beta$ -распаде дочернее ядро может оказаться в некотором возбужденном состоянии и иметь избыток энергии. Переход ядра из возбужденного состояния в основное сопровождается испусканием одного или нескольких  $\gamma$ -квантов, энергия которых может достигать нескольких МэВ.

## § 84. Закон радиоактивного распада

Радиоактивный распад имеет случайный характер и не зависит от внешних условий. Закон убывания количества  $N(t)$  нераспавшихся к данному моменту времени  $t$  ядер имеет статистический характер. Так как вероятность распада каждого ядра одинакова и неизменна во времени, то

число распадов  $\Delta N$  будет пропорционально количеству ядер  $N(t)$  и промежутку времени  $\Delta t$ :

$$\Delta N = -\lambda N(t) \Delta t.$$

Коэффициент пропорциональности  $\lambda$  — постоянная для данного радиоактивного вещества величина, называемая *постоянной радиоактивного распада*. Эта формула означает, что скорость изменения функции  $N(t)$   $\frac{dN}{dt}$  (или  $\frac{\Delta N}{\Delta t}$ ) прямо пропорциональна самой функции:

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda N.$$

Решение этого уравнения приводит к экспоненциальному закону:

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t},$$

где  $N_0$  — начальное число радиоактивных ядер при  $t = 0$ . За время  $\tau = 1/\lambda$  количество нераспавшихся ядер уменьшится в  $e \approx 2,7$  раза. Величину  $\tau$  называют *средним временем жизни радиоактивного ядра*.

Для практического использования закон радиоактивного распада удобно записать в другом виде, используя в качестве основания число 2, а не  $e$ :

$$N(t) = N_0 \cdot 2^{-t/T}.$$

Величина  $T$  называется *периодом полураспада*. За время  $T$  распадается половина первоначального количества радиоактивных ядер. Величины  $T$  и  $\tau$  связаны соотношением

$$T = \frac{1}{\lambda} \ln 2 = \tau \ln 2 = 0,693\tau.$$

Рисунок 14.3 иллюстрирует закон радиоактивного распада.

Период полураспада — основная величина, характеризующая скорость радиоактивного распада. Чем меньше период полураспада, тем интенсивнее протекает распад. Так, для урана  $T \approx 4,5$  млрд лет, а для радия  $T \approx 1600$  лет.

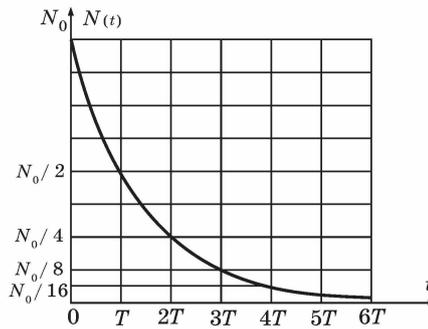


Рис. 14.3.

Поэтому активность радия выше, чем урана. Существуют радиоактивные элементы с периодом полураспада в доли секунды.

В тех случаях, когда время  $t$  мало по сравнению с периодом полураспада  $T$  ( $t \ll T$ ), количество распавшихся атомов  $\Delta N$  можно определить по приближенной формуле:

$$\Delta N = \frac{0,693}{T} N_0 t.$$

### § 85. Применение и биологическое действие радиоактивности

Интересным применением радиоактивности является метод датирования археологических и геологических находок по концентрации радиоактивных изотопов. Наиболее часто используется радиоуглеродный метод датирования. Нестабильный изотоп углерода  $^{14}_6\text{C}$  возникает в атмосфере вследствие ядерных реакций, вызываемых космическими лучами. Небольшой процент этого изотопа содержится в воздухе наряду с обычным стабильным изотопом  $^{12}_6\text{C}$ . Растения и другие организмы потребляют углерод из воздуха, и в них накапливаются оба изотопа в той же пропорции, как и в воздухе. После гибели растений они перестают потреблять углерод и нестабильный изотоп в результате  $\beta$ -распада постепенно превращается в азот  $^{14}_7\text{N}$  с периодом полураспада 5730 лет. Путем точного измерения относительной концентрации радиоактивного углерода  $^{14}_6\text{C}$  в останках древних организмов можно определить время их гибели.

Радиоактивное излучение всех видов (альфа, бета, гамма, нейтроны), а также электромагнитная радиация (рентгеновское излучение) оказывают сильное биологическое воздействие на живые организмы, которое заключается в процессах возбуждения и ионизации атомов и молекул, входящих в состав живых клеток. Под действием ионизирующей радиации разрушаются сложные молекулы и клеточные структуры, что приводит к *лучевому поражению организма*. Степень поражения живого организма зависит от поглощенной дозы излучения, равной отношению поглощенной энергии излучения  $E$  к массе облученного тела  $m$ :

$$D = E / m.$$

Размерность поглощенной дозы:  $[D] = \text{Гр (грей)} = 1 \text{ Дж/кг}$ .

Предельно допустимая за год доза ионизирующей радиации для человека равна 0,05 Гр. Доза в 3–10 Гр, полученная за короткое время, смертельна.

Однако человек может подвергаться действию ионизирующей радиации и в бытовых условиях. Серьезную опасность для здоровья человека может представлять инертный, бесцветный, радиоактивный газ радон  ${}^{222}_{86}\text{Rn}$ . Радон является продуктом  $\alpha$ -распада радия и имеет период полураспада  $T = 3,82$  сут. Радий в небольших количествах содержится в почве, в камнях, в различных строительных конструкциях. Несмотря на сравнительно небольшое время жизни, концентрация радона непрерывно восполняется за счет новых распадов ядер радия, поэтому радон может накапливаться в закрытых помещениях. По данным Американской комиссии радиационной безопасности и контроля, человек в среднем получает 55 % ионизирующей радиации за счет радона и 11 % за счет медицинских обследований. Вклад космических лучей составляет примерно 8 %.

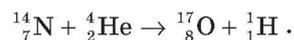
Общая доза облучения, которую получает человек за жизнь, во много раз меньше *предельно допустимой дозы*, которая устанавливается для людей некоторых профессий, подвергающихся дополнительному облучению ионизирующей радиацией.

## § 86. Ядерные реакции

*Ядерная реакция* — это процесс взаимодействия атомного ядра с другим ядром или элементарной частицей, сопровождающийся изменением состава и структуры ядра и выделением вторичных частиц (или  $\gamma$ -квантов).

В результате ядерных реакций могут образовываться новые радиоактивные изотопы, которых нет на Земле в естественных условиях.

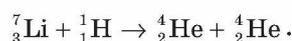
Первая ядерная реакция была осуществлена Э. Резерфордом в 1919 году в опытах по обнаружению протонов в продуктах распада ядер. Резерфорд бомбардировал атомы азота  $\alpha$ -частицами:



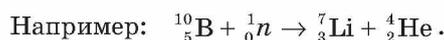
При ядерных реакциях выполняется несколько *законов сохранения*: энергии, заряда, импульса, момента импуль-

са. При ядерных реакциях выполняется также закон сохранения *барионного заряда* (т. е. числа нуклонов — протонов и нейтронов)

Ядерные реакции могут протекать при бомбардировке атомов *быстрыми заряженными частицами* (протоны, нейтроны,  $\alpha$ -частицы, ионы). Первая реакция такого рода была осуществлена с помощью протонов большой энергии, полученных на ускорителе:



Интересными для практического использования являются реакции, протекающие при взаимодействии ядер с нейтронами. Так как нейтроны лишены заряда, они беспрепятственно могут проникать в атомные ядра и вызывать их превращения.



Итальянский физик Э. Ферми первым начал изучать реакции, вызываемые нейтронами. Он обнаружил, что ядерные превращения вызываются не только быстрыми, но и медленными нейтронами, движущимися с тепловыми скоростями.

*Энергетическим выходом* ядерной реакции называется величина

$$Q = (M_A + M_B - M_C - M_D)c^2 = \Delta M c^2.$$

где  $M_A$  и  $M_B$  — массы исходных продуктов,  $M_C$  и  $M_D$  — массы конечных продуктов реакции. Величина  $\Delta M$  называется *дефектом масс*. Ядерные реакции могут протекать с выделением ( $Q > 0$ ) или с поглощением энергии ( $Q < 0$ ).

Для того чтобы ядерная реакция имела положительный энергетический выход, удельная энергия связи нуклонов в ядрах исходных продуктов должна быть меньше удельной энергии связи нуклонов в ядрах конечных продуктов. Это означает, что величина  $\Delta M$  должна быть положительной.

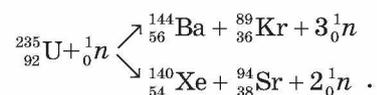
## § 87. Деление тяжелых ядер

В 1939 г. немецкими учеными О. Ганом и Ф. Штрассманом было открыто деление ядер урана. Продолжая исследования, начатые Ферми, они установили, что при бомбардировке урана нейтронами возникают элементы сред-

ней части периодической системы – радиоактивные изотопы бария ( $Z = 56$ ), криптона ( $Z = 36$ ) и др.

Уран встречается в природе в виде двух изотопов:  ${}^{238}_{92}\text{U}$  (99,3 %) и  ${}^{235}_{92}\text{U}$  (0,7 %). При бомбардировке нейтронами ядра обоих изотопов могут расщепляться на два осколка. При этом реакция деления наиболее интенсивно идет на медленных (тепловых) нейтронах, в то время как ядра  ${}^{238}_{92}\text{U}$  вступают в реакцию деления только с быстрыми нейтронами с энергией порядка 1 МэВ.

Основной интерес для ядерной энергетики представляет реакция деления ядра  ${}^{235}_{92}\text{U}$ . В настоящее время известны около 100 различных изотопов с массовыми числами примерно от 90 до 145, возникающих при делении этого ядра. Две типичные реакции деления этого ядра имеют вид:



В результате деления ядра, инициированного нейтроном, возникают новые нейтроны, способные вызвать реакции деления других ядер. Продуктами деления ядер урана-235 могут быть и другие изотопы бария, ксенона, стронция, рубидия и т. д.

Кинетическая энергия, выделяющаяся при делении одного ядра урана — порядка 200 МэВ. Оценку выделяющейся при делении ядра энергии можно сделать с помощью удельной энергии связи нуклонов в ядре. Удельная энергия связи нуклонов в ядрах с массовым числом  $A \approx 240$  порядка 7,6 МэВ/нуклон, в то время как в ядрах с массовыми числами  $A = 90-145$  удельная энергия примерно равна 8,5 МэВ/нуклон. Следовательно, при делении ядра урана освобождается энергия порядка 0,9 МэВ/нуклон, или приблизительно 210 МэВ на один атом урана. При полном делении всех ядер, содержащихся в 1 г урана, выделяется такая же энергия, как и при сгорании 3 т угля или 2,5 т нефти.

Продукты деления ядра урана нестабильны, так как в них содержится значительное избыточное число нейтронов. Действительно, отношение  $N/Z$  для наиболее тяжелых ядер порядка 1,6, для ядер с массовыми числами от 90 до 145 — это отношение порядка 1,3–1,4. Поэтому ядра-осколки испытывают серию последовательных  $\beta$ -распадов,

в результате которых число протонов в ядре увеличивается, а число нейтронов уменьшается до тех пор, пока не образуется стабильное ядро.

При делении ядра урана-235, которое вызвано столкновением с нейтроном, освобождается 2 или 3 нейтрона. Эти нейтроны могут попасть в другие ядра урана и вызвать их деление. На этом этапе появятся уже от 4 до 9 нейтронов, способных вызвать новые распады ядер урана и т. д. Такой лавиннообразный процесс называется *цепной реакцией*.

*Коэффициентом размножения нейтронов  $k$  называется число, равное отношению числа нейтронов в данном поколении к числу нейтронов в предыдущем поколении.*

Для осуществления цепной реакции необходимо, чтобы коэффициент размножения нейтронов был больше единицы. При  $k > 1$  реакция протекает в виде взрыва. При  $k < 1$  число нейтронов убывает и цепная реакция невозможна. При  $k = 1$  осуществляется управляемая реакция в ядерных реакторах.

Коэффициент размножения определяется не только числом нейтронов, образующихся в каждом элементарном акте, но и условиями, в которых протекает реакция – часть нейтронов может поглощаться другими ядрами или выходить из зоны реакции. Нейтроны, освободившиеся при делении ядер урана-235, способны вызвать деление лишь ядер этого же урана, на долю которого в природном уране приходится всего лишь 0,7 %. Такая концентрация оказывается недостаточной для начала цепной реакции. Изотоп  $^{238}_{92}\text{U}$  также может поглощать нейтроны, но при этом не возникает цепной реакции.

Цепная реакция в уране с повышенным содержанием урана-235 может развиваться только тогда, когда масса урана превосходит так называемую *критическую массу*. В небольших кусках урана большинство нейтронов, не попав ни в одно ядро, вылетают наружу. Для чистого урана-235 критическая масса составляет около 50 кг. Критическую массу урана можно во много раз уменьшить, если использовать *замедлители* нейтронов и *отражающие оболочки*. Нейтроны, рождающиеся при распаде ядер урана, имеют большие скорости, а вероятность захвата медленных нейтронов ядрами урана-235 в сотни раз больше, чем быстрых. Наилучшим замедлителем нейтронов является *тяжелая вода*  $\text{D}_2\text{O}$ . (Обычная вода при взаимодействии с нейтронами превращается в тяжелую воду). Хорошим замед-

лителем является также графит, ядра которого не поглощают нейтронов. При упругом взаимодействии с ядрами дейтерия или углерода нейтроны замедляются до тепловых скоростей.

Применение замедлителей нейтронов и оболочки из бериллия, которая отражает нейтроны, позволяет снизить критическую массу до 250 г.

В атомных бомбах цепная неуправляемая ядерная реакция возникает при быстром соединении двух кусков урана-235, каждый из которых имеет массу несколько ниже критической.

Устройство, в котором поддерживается управляемая реакция деления ядер, называется *ядерным* (или атомным) *реактором*.

Схема ядерного реактора на медленных нейтронах приведена на рис. 14.4. Ядерная реакция протекает в активной зоне реактора, которая заполнена замедлителем и пронизана стержнями, содержащими обогащенную смесь изотопов урана с повышенным содержанием урана-235 (до 3 %). В активную зону вводятся регулирующие стержни, содержащие кадмий или бор, которые интенсивно поглощают нейтроны, что позволяет управлять скоростью цепной реакции. Активная зона охлаждается с помощью прокачиваемого теплоносителя, в качестве которого может применяться вода или металл с низкой температурой плавления (например, натрий, имеющий температуру плавления  $98^{\circ}\text{C}$ ).

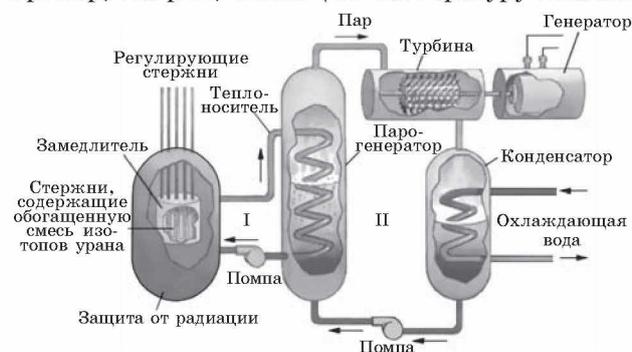


Рис. 14.4.

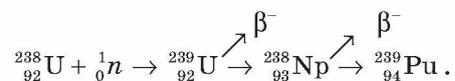
В парогенераторе теплоноситель передает тепловую энергию воде, превращая ее в пар высокого давления. Пар направляется в турбину, соединенную с электрогенератором. Из турбины пар поступает в конденсатор. Во избежание

утечки радиации контуры теплоносителя I и парогенератора II работают по замкнутым циклам.

Турбина атомной электростанции является тепловой машиной, определяющей в соответствии со вторым законом термодинамики общую эффективность станции. У современных атомных электростанций коэффициент полезного действия приблизительно равен  $\approx 33\%$ . Следовательно, для производства 1000 МВт электрической мощности тепловая мощность реактора должна достигать 3000 МВт. 2000 МВт должны уноситься водой, охлаждающей конденсатор. Это приводит к локальному перегреву естественных водоемов и последующему возникновению экологических проблем.

Главная проблема применения АЭС состоит в обеспечении полной радиационной безопасности людей, работающих на атомных электростанциях, и предотвращении случайных выбросов радиоактивных веществ из активной зоны реактора. После аварий на некоторых АЭС, в частности на АЭС в Пенсильвании (США, 1979 г.) и на Чернобыльской АЭС (1986 г.), проблема безопасности ядерной энергетики встала с особенной остротой, поэтому этой проблеме уделяется особое внимание.

Наряду с описанным выше ядерным реактором, работающем на медленных нейтронах, большой практический интерес представляют реакторы, работающие без замедлителя на быстрых нейтронах. В таких реакторах ядерным горючим является обогащенная смесь, содержащая не менее 15 % изотопа  ${}^{235}_{92}\text{U}$ . Преимущество реакторов на быстрых нейтронах состоит в том, что при их работе ядра урана-238, поглощая нейтроны, посредством двух последовательных  $\beta$ -распадов превращаются в ядра плутония, которые затем можно использовать в качестве ядерного топлива:



Коэффициент воспроизводства таких реакторов достигает 1,5, т. е. на 1 кг урана-235 получается до 1,5 кг плутония. В обычных реакторах также образуется плутоний, но в гораздо меньших количествах.

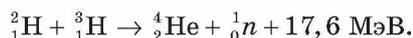
Первый ядерный реактор был построен в 1942 г. в США под руководством Э. Ферми. В СССР первый реактор был построен в 1946 г. под руководством И. В. Курчатова.

## § 88. Термоядерные реакции

Второй путь освобождения ядерной энергии связан с реакциями синтеза. Как видно из кривой зависимости удельной энергии связи от массового числа  $A$  (рис. 14.1.), удельная энергия связи нуклонов растет вплоть до ядер с массовым числом около 60. Поэтому синтез любого ядра с  $A < 60$  из более легких ядер должен сопровождаться выделением энергии.

Реакции слияния легких ядер носят название *термоядерных реакций*, так как они могут протекать только при очень высоких температурах. Чтобы два ядра вступили в реакцию синтеза, они должны сблизиться на расстояние действия ядерных сил порядка  $2 \cdot 10^{-15}$  м, преодолев электрическое отталкивание их положительных зарядов. Для этого средняя кинетическая энергия теплового движения молекул должна превосходить потенциальную энергию кулоновского взаимодействия. Расчет необходимой для этого температуры  $T$  приводит к величине порядка  $10^8$ – $10^9$  К. Это чрезвычайно высокая температура. При такой температуре вещество находится в полностью ионизированном состоянии, которое называется *плазмой*.

Энергия, которая выделяется при термоядерных реакциях, в расчете на один нуклон в несколько раз превышает удельную энергию, выделяющуюся в цепных реакциях деления ядер. Так, например, в реакции слияния ядер дейтерия и трития выделяется 3,5 МэВ/нуклон. В целом в этой реакции выделяется 17,6 МэВ:



Это одна из наиболее перспективных термоядерных реакций.

Осуществление *управляемых термоядерных реакций* даст человечеству новый экологически чистый и практически неисчерпаемый источник энергии. Однако получение сверхвысоких температур и удержание плазмы, нагретой до миллиарда градусов, представляет собой трудную научно-техническую задачу на пути осуществления управляемого термоядерного синтеза.

На данном этапе удалось осуществить *неуправляемую реакцию синтеза* в водородной бомбе. Высокая температура, необходимая для ядерного синтеза, достигается здесь с помощью взрыва урановой или плутониевой бомбы. Энер-

гия излучения Солнца и звезд имеет термоядерное происхождение. Термоядерные реакции играют важную роль в эволюции Вселенной.

## § 89. Элементарные частицы

*Задача физики элементарных частиц — это исследование природы, свойств и взаимных превращений элементарных частиц.*

В 1932 г. в космических лучах был открыт позитрон (К. Андерсон). Позитрон — положительно заряженная частица, имеющая ту же массу и тот же (по модулю) заряд, что и электрон. Существование позитрона было предсказано П. Дираком в 1928 г. Были обнаружены и исследованы взаимные превращения протонов и нейтронов и стало ясно, что эти частицы также не являются неизменными элементарными «кирпичиками» природы. В 1937 г. в космических лучах были обнаружены частицы с массой в 207 электронных масс, названные *мюонами* ( $\mu$ -мезонами). Затем в 1947–1950 годах были открыты *пионы* (т. е.  $\pi$ -мезоны), которые, по современным представлениям, осуществляют взаимодействие между нуклонами в ядре. В последующие годы число вновь открываемых частиц стало быстро расти.

В настоящее время известно около 400 субъядерных частиц, которые принято называть *элементарными*. Подавляющее большинство этих частиц являются *нестабильными*. *Стабильными элементарными частицами являются: фотон, электрон, протон и нейтрино*. Все остальные частицы через определенные промежутки времени испытывают самопроизвольные превращения в другие частицы. Нестабильные элементарные частицы сильно отличаются друг от друга по времени жизни. Наиболее долгоживущей частицей является нейтрон. Время жизни нейтрона порядка 15 мин. Другие частицы «живут» гораздо меньше время. Например, среднее время жизни  $\mu$ -мезона равно  $2,2 \cdot 10^{-6}$  с, нейтрального  $\mu$ -мезона —  $0,87 \cdot 10^{-16}$  с. Многие массивные частицы — гипероны имеют среднее время жизни порядка  $10^{-10}$  с.

Существует несколько десятков частиц со временем жизни, превосходящим  $10^{-17}$  с. По масштабам микромира это значительное время. Такие частицы называют

относительно стабильными. Большинство короткоживущих элементарных частиц имеют время жизни порядка  $10^{-22}$ – $10^{-23}$  с.

*Способность к взаимным превращениям* — это наиболее важное свойство всех элементарных частиц. Элементарные частицы способны рождаться и уничтожаться (испускаться и поглощаться). Это относится также и к стабильным частицам с той разницей, что превращения стабильных частиц происходят не самопроизвольно, а при взаимодействии с другими частицами. Примером может служить *аннигиляция* (т. е. исчезновение) электрона и позитрона, сопровождающаяся рождением фотонов большой энергии. Может протекать и обратный процесс — рождение электронно-позитронной пары, например, при столкновении фотона с достаточно большой энергией с ядром. Такой опасный двойник, каким для электрона является позитрон, есть и у протона. Он называется *антипротоном*. Электрический заряд антипротона отрицателен. В настоящее время античастицы найдены у всех частиц. Античастицы противопоставляются частицам потому, что *при встрече любой частицы со своей античастицей происходит их аннигиляция*, т. е. обе частицы исчезают, превращаясь в кванты излучения или другие частицы.

Античастица обнаружена даже у нейтрона. Нейтрон и антинейтрон отличаются только знаками магнитного момента и барионного заряда. Возможно существование атомов *антивещества*, ядра которых состоят из антинуклонов, а оболочка — из позитронов. При аннигиляции антивещества с веществом энергия покоя превращается в энергию квантов излучения. Это огромная энергия, значительно превосходящая ту, которая выделяется при ядерных и термоядерных реакциях.

В многообразии элементарных частиц, известных к настоящему времени, обнаруживается более или менее стройная система классификации. В таблице представлены некоторые сведения о свойствах элементарных частиц со временем жизни более  $10^{-20}$  с. Из многих свойств, характеризующих элементарную частицу, в таблице указаны масса частицы (в электронных массах), электрический заряд (в единицах элементарного заряда), момент импульса (спин) в единицах постоянной Планка  $\hbar = h/2\pi$  и среднее время жизни частицы.

Таблица элементарных частиц.

Группа	Название частицы	Символ		Масса (в электронных массах)	Электрический заряд	Спин	Время жизни (с)	
		Частица	Античастица					
Фотоны	Фотон	$\gamma$		0	0		Стабилен	
Лептоны	Нейтрино электронное	$\nu_e$	$\bar{\nu}_e$	0	0	1/2	Стабильно	
	Нейтрино мюонное	$\nu_\mu$	$\bar{\nu}_\mu$	0	0	1/2	Стабильно	
	Электрон	$e^-$	$e^+$	1	-1	1/2	Стабилен	
	Мю-мезон	$\mu^-$	$\mu^+$	206,8	-1	1/2	$2,2 \cdot 10^{-6}$	
Адроны	Мезоны	Пи-мезоны	$\pi^0$	$\pi^0$	264,1	0	0	$0,87 \cdot 10^{-16}$
			$\pi^+$	$\pi^-$	273,1	1	0	$2,6 \cdot 10^{-8}$
		К-мезоны	$K^+$	$K^-$	966,4	1	0	$1,24 \cdot 10^{-8}$
	$K^0$		$\bar{K}^0$	974,1	0	0	$\approx 10^{-10} - 10^{-8}$	
	Эта-нуль-мезон	$\eta^0$	$\eta^0$	1074	0	0	$\approx 10^{-18}$	
	Барионы	Протон	$p$	$\bar{p}$	1836,1	1	1/2	Стабилен
		Нейтрон	$n$	$\bar{n}$	1838,6	0	1/2	898
		Лямбда-гиперон	$\Lambda^0$	$\bar{\Lambda}^0$	2183,1	0	1/2	$2,63 \cdot 10^{-10}$
		Сигма-гипероны	$\Sigma^+$	$\bar{\Sigma}^+$	2327,6	1	1/2	$0,8 \cdot 10^{-10}$
			$\Sigma^0$	$\bar{\Sigma}^0$	2333,6	0	1/2	$7,4 \cdot 10^{-20}$
			$\Sigma^-$	$\bar{\Sigma}^-$	2343,1	-1	1/2	$1,48 \cdot 10^{-10}$
		Кси-гипероны	$\Xi^0$	$\bar{\Xi}^0$	2572,8	0	1/2	$2,9 \cdot 10^{-10}$
	$\Xi^-$		$\bar{\Xi}^-$	2585,6	-1	1/2	$1,64 \cdot 10^{-10}$	
Омега-минус-гиперон	$\Omega^-$	$\bar{\Omega}^-$	3273	-1	1/2	$0,82 \cdot 10^{-11}$		

### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ К ГЛАВЕ XIV

1. В чем сущность модели атомного ядра?
2. Дайте характеристику частиц, составляющих атомное ядро.
3. Каков физический смысл зарядового числа?
4. Каков физический смысл массового числа в модели атомного ядра?
5. Как в ядерной физике обозначается любой химический элемент?

6. Как определить число нейтронов в ядре любого элемента таблицы Менделеева?
7. Что называют изотопами химического элемента? Приведите примеры.
8. Как называются изотопы водорода и как их обозначают?
9. Почему атомная масса многих химических элементов не выражается целым числом?
10. Какие силы действуют между нуклонами в атомных ядрах? Проявлением какого вида фундаментальных взаимодействий являются эти силы?
11. Какими свойствами обладают ядерные силы?
12. Что называют энергией связи атомного ядра?
13. Что называют дефектом массы? Напишите формулу дефекта массы.
14. По какой формуле определяется энергия связи атомного ядра?
15. Что называют удельной энергией связи? Ядра каких химических элементов обладают максимальной удельной энергией связи?
16. Что называют радиоактивностью?
17. Какова природа и свойства  $\alpha$ -излучения,  $\beta$ -излучения,  $\gamma$ -излучения?
18. Объясните правило смещения для  $\alpha$ -распада.
19. Объясните правило смещения для  $\beta$ -распада.
20. Какие законы сохранения выполняются при радиоактивных превращениях?
21. Что называют периодом полураспада радиоактивного вещества?
22. Запишите формулу закона радиоактивного распада. Каков характер этого распада?
23. Как выглядит график зависимости активности радиоактивного элемента от времени?
24. Что называют ядерными реакциями?
25. Назовите типы ядерных реакций.
26. Что называют энергетическим выходом ядерной реакции? В каких случаях реакция идет с поглощением энергии, а в каких — с выделением?
27. Назовите два принципиально различных способа освобождения ядерной энергии.
28. Почему при делении ядер происходит выделение энергии?
29. Опишите механизм деления ядра урана.
30. Приведите типичные реакции деления ядра  ${}_{92}^{235}\text{U}$ .
31. Что называют цепной ядерной реакцией?
32. Что называют коэффициентом размножения нейтронов?
33. Изобразите графически и объясните процессы, происходящие при цепной ядерной реакции.
34. При каких условиях возможно протекание цепной ядерной реакции?

35. Как можно уменьшить критическую массу урана?
36. Что называют ядерным реактором?
37. Что является ядерным горючим в реакторах?
38. Каково назначение замедлителя нейтронов и какие вещества служат замедлителем нейтронов в ядерных реакторах?
39. Что используют в качестве теплоносителя в ядерных реакторах?
40. Что используется в системе управления ходом управляемой ядерной реакции деления?
41. Расскажите о превращении внутриядерной энергии в электрическую на АЭС.
42. Какие реакции называют термоядерными? Как иначе называют термоядерные реакции?
43. Объясните, почему при синтезе легких ядер выделяется энергия?
44. Каковы условия осуществления термоядерной реакции?
45. Приведите пример термоядерной реакции и напишите её уравнение.
46. Сравните энергию, выделяющуюся при термоядерной реакции и при цепной ядерной реакции в расчете на один нуклон.
47. Перечислите стабильные элементарные частицы.
48. Назовите наиболее важное свойство всех элементарных частиц.
49. Что такое античастица (приведите примеры)? Все ли элементарные частицы имеют античастицу?
50. В чем заключается процесс аннигиляции?

#### ТЕСТОВЫЕ ЗАДАНИЯ К ГЛАВЕ XIV

1. (99/7-61). Порядковый номер урана в таблице Менделеева 92, а массовое число 238. Сколько нейтронов имеется в ядре урана?  
A) 92. B) 143. C) 146. D) 238. E) 330.
2. (98/11-43). Каков состав ядра атома полония  ${}_{84}^{210}\text{Po}$ ?  
A) 84 протона, 210 нейтронов.  
B) 84 нейтрона, 126 протонов.  
C) 210 протонов, 84 нейтрона.  
D) 84 протона, 126 нейтронов.  
E) 126 нейтронов, 210 протонов.
3. (03/8-55). Сколько электронов имеется в оболочке нейтрального атома, если в атомном ядре содержатся 6 протонов и 8 нейтронов?  
A) 2. B) 6. C) 8. D) 14. E) 0.
4. (03/9-16). Сколько нуклонов имеется в изотопе кислорода  ${}_{8}^{17}\text{O}$ ?  
A) 8. B) 9. C) 17. D) 25. E) недостаточно данных.
5. (03/9-76). Каково массовое число  $A$  атомного ядра, если число протонов в ядре равно  $Z$ , а число нейтронов  $N$ ?  
A)  $Z + N$ . B)  $N - Z$ . C)  $Z - N$ . D)  $N$ . E)  $Z$ .

6. (98/9-62). Что такое  $\gamma$ -излучение?
- А) поток электронов.  
 В) поток протонов.  
 С) поток квантов электромагнитного излучения.  
 Д) поток нейтронов.  
 Е) поток ядер гелия.
7. (99/7-62). Что такое  $\beta$ -излучение?
- А) поток протонов.                    Д) поток ядер гелия.  
 В) поток электронов.                Е) поток квантов  
 С) поток нейтронов.                    электромагнитного излучения.
8. (98/5-67). Что такое  $\alpha$ -излучение?
- А) поток электронов.  
 В) поток протонов.  
 С) поток нейтронов.  
 Д) поток квантов электромагнитного излучения.  
 Е) поток ядер гелия.
9. (03/7-66). Определите скорость  $\alpha$ -частицы (м/с), имеющей кинетическую энергию  $3,32 \cdot 10^{-19}$  Дж.  $m_\alpha = 6,64 \cdot 10^{-27}$  кг.
- А) 2000.    В) 8000.    С) 6000.    Д) 7700.    Е) 10000.
10. (98/5-59). Какое из трех типов излучений  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  не отклоняется магнитными и электрическими полями?
- А)  $\gamma$ -излучение.                    Д)  $\alpha$ -излучение.  
 В)  $\beta$ -излучение.                    Е) все три отклоняются.  
 С) все три не отклоняются.
11. (03/11-41). Когда возникает  $\gamma$ -излучение?
- А) при переходе нуклонов в ядре из возбужденного состояния в основное.  
 В) при переходе электронов атома с нижнего энергетического уровня на верхний.  
 С) при переходе электронов атома с верхнего энергетического уровня на нижний.  
 Д) при бомбардировке металлов потоками электронов.  
 Е) НПО.
12. (01/1-17). При испускании радиоактивным ядром двух  $\beta^-$ -частиц количество нейтронов в ядре ...
- А) увеличится на 4. С) уменьшится на 2. Е) уменьшится на 4.  
 В) увеличится на 2. Д) не изменится.
13. (01/3-12). Сколько должно произойти  $\alpha$ -распадов и  $\beta$ -распадов при радиоактивном распаде ядра урана  ${}_{92}^{238}\text{U}$  и конечном превращении его в ядро свинца  ${}_{82}^{206}\text{Pb}$ ?
- А) 8 и 10.    В) 10 и 8.    С) 8 и 6.    Д) 10 и 9.    Е) 10 и 10.
14. (98/2). Какой порядковый номер в таблице Менделеева у элемента, который получается в результате  $\beta^-$ -распада ядра элемента с порядковым номером  $z$ ?
- А)  $z + 2$ .    В)  $z - 2$ .    С)  $z - 1$ .    Д)  $z + 1$ .    Е)  $z$ .

15. (01/3-15). Атомный номер элемента, образовавшегося в результате радиоактивного распада ядра урана  ${}_{92}^{238}\text{U}$  с последовательным испусканием  $\alpha$ -,  $\alpha$ -,  $\beta$ -,  $\beta$ -,  $\alpha$ -,  $\alpha$ -частиц, равен ...

- А) 86. В) 88. С) 90. D) 92. E) 94.

16. (03/9-26). В какой изотоп превращается уран  ${}_{92}^{238}\text{U}$  после двух  $\beta$  и одного  $\alpha$ -распада?

- А)  ${}_{90}^{235}\text{Th}$ . В)  ${}_{92}^{238}\text{U}$ . С)  ${}_{92}^{238}\text{U}$ . D)  ${}_{92}^{235}\text{U}$ . E)  ${}_{87}^{235}\text{Fr}$ .

17. (03/8-53). В каком приборе возникает кратковременный импульс тока, при прохождении через него ионизирующей частицы?

- А) пузырьковая камера. С) фотоэлемента. E) осциллограф.  
В) камера Вильсона. D) счетчик Гейгера.

18. (98/12). Определите, чем бомбардирован дейтерий в реакции  ${}^2_1\text{H} + ? \rightarrow {}^1_1\text{H} + {}^1_0n$ ?

- А)  $\gamma$ -квантом. С)  $n$ -нейтроном. E)  ${}^1_1\text{H}$ -протоном.  
В)  $e$ -электроном. D)  $\alpha$ -частицей.

19. (98/6). Определите частицу, испускаемую в результате ядерной реакции  ${}^9_4\text{Be} + {}^2_1\text{H} \rightarrow {}^{10}_5\text{B} + x$ .

- А)  $\alpha$ -частица. В)  ${}^1_0n$ . С)  $e^-$ . D)  $\gamma$ . E)  $e^+$

20. (01/3-10). В результате захвата ядром нептуния  ${}^{234}_{93}\text{Np}$  электрона из электронной оболочки атома с последующим испусканием  $\alpha$ -частицы образовалось ядро ...

- А)  ${}^{230}_{90}\text{Th}$ . В)  ${}^{230}_{91}\text{Pa}$ . С)  ${}^{231}_{92}\text{U}$ . D)  ${}^{234}_{94}\text{Pu}$ . E)  ${}^{231}_{91}\text{Pa}$ .

21. (03/11-38). В какое ядро превращается ядро меди  ${}^{64}_{29}\text{Cu}$  после позитронного бета-распада?

- А)  ${}^{63}_{29}\text{Cu}$ . В)  ${}^{64}_{28}\text{Ni}$ . С)  ${}^{65}_{29}\text{Cu}$ . D)  ${}^{65}_{28}\text{Ni}$ . E)  ${}^{64}_{30}\text{Zn}$ .

22. (03/8-56). Какая из перечисленных ниже частиц легко проникает в ядро и вызывает ядерную реакцию?

- А) нейтрон. С)  $\alpha$ -частица. E) все перечисленные частицы.  
В) протон. D) электрон.

23. (03/8-57). В какое атомное ядро превращается ядро азота, поглощая нейтрон в ядерной реакции  ${}^{14}_7\text{N} + {}^1_0n \rightarrow x + {}^1_1\text{p}$ ?

- А)  ${}^{15}_7\text{N}$ . В)  ${}^{16}_7\text{N}$ . С)  ${}^{15}_6\text{C}$ . D)  ${}^{14}_6\text{C}$ . E)  ${}^{12}_6\text{C}$ .

24. (98/7-70). Энергия связи ядра гелия равна  $4,5 \cdot 10^{-12}$  Дж. Определите его дефект масс (в кг).

- А)  $1,5 \cdot 10^{-24}$  кг. С)  $5 \cdot 10^{-29}$  кг. E)  $9 \cdot 10^{-29}$  кг.  
В)  $2 \cdot 10^{-29}$  кг. D)  $2,25 \cdot 10^{-29}$  кг.

25. (03/10-49). Укажите выражение энергии связи ядра алюминия  ${}^{27}_{13}\text{Al}$  ( $m_p$  — масса протона,  $m_n$  — масса нейтрона,  $M_x$  — масса ядра).

- А)  $M_x c^2$ . В)  $(13m_p - 14m_n - M_x)c^2$ .

- С)  $(27m_p + 13m_n - M_\alpha)c^2$ .      Е)  $(13m_p + 14m_n - M_\alpha)c^2$ .  
 D)  $(27m_p - 13m_n - M_\alpha)c^2$ .
26. (03/10-48). Каков период полураспада (сутки) радиоактивного элемента, если его активность за 8 суток уменьшилась в 4 раза?  
 А) 8.      В) 4.      С) 3.      D) 2.      Е) 1.
27. (03/). Каков период полураспада радиоактивного элемента (в сутках), если его активность в течение 160 суток уменьшилась в 16 раз?  
 А) 80.      В) 40.      С) 20.      D) 16.      Е) 10.
28. (03/11-40). Период полураспада изотопа йода  $^{131}_{53}\text{I}$  равен 8 суткам. Какой процент изотопа йода распадется через 32 суток?  
 А) 12,5.      В) 25.      С) 81,25.      D) 87,5.      Е) 93,75.
29. (03/11-39). Период полураспада изотопа радия  $^{226}_{88}\text{Ra}$  равен 1600 годам. Сколько ядер распадется за 3200 лет, если их исходное число равно  $N_0 = 109$ ?  
 А)  $10^8$ .      В)  $2,5 \cdot 10^8$ .      С)  $5 \cdot 10^8$ .      D)  $7,5 \cdot 10^8$ .      Е)  $2 \cdot 10^8$ .
30. (01/1-1). При слиянии двух частиц массы покоя  $m_0$  выделилась энергия  $E$ . Какова масса покоя получившейся частицы?  
 А)  $2m_0 + E/c^2$ .      С)  $2m_0 - E/c^2$ .      Е)  $2m_0 c^2 - E$ .  
 В)  $2m_0 c^2 + E$ .      D)  $2m_0 - Ec^2$ .
31. (98/1-63). Какие из перечисленных веществ обычно используются в ядерных реакторах в качестве поглотителей нейтронов: 1) уран; 2) графит; 3) кадмий; 4) тяжелая вода; 5) бор; 6) плутоний?  
 А) 2, 4.      В) 3, 5.      С) 2, 3.      D) 3, 4.      Е) 1, 6.
32. (98/1-64). Какие из перечисленных веществ обычно используются в ядерных реакторах в качестве ядерного горючего: 1) уран; 2) графит; 3) кадмий; 4) тяжелая вода; 5) бор; 6) плутоний?  
 А) 1 и 5.      В) 1 и 2.      С) 1 и 3.      D) 1 и 6.      Е) 1 и 4.
33. (98/11). Какое количество энергии (в МэВ) выделяется при термоядерной реакции  $^2_1\text{H} + ^2_1\text{H} \rightarrow ^4_2\text{He} + \Delta E$ ? Энергия связи дейтрона  $^2_1\text{H}$  равна 2,2 МэВ, энергия связи гелия  $^4_2\text{He}$  равна 28,3 МэВ.  
 А) 30,5.      В) 26,1.      С) 20.      D) 32,7.      Е) 23,9.
34. (98/11-52). При термоядерной реакции  $^2_1\text{H} + ^3_1\text{H} \rightarrow ^4_2\text{He} + ^1_0n$  выделяется энергия 17,4 МэВ. Оцените, какая энергия (в МэВ) выделяется при синтезе 4 г гелия с использованием этой реакции?  $N_A = 6 \cdot 10^{23}$  моль $^{-1}$ ,  $M = 4 \cdot 10^{-3}$  кг/моль.  
 А)  $1 \cdot 10^{24}$  МэВ.      С)  $2 \cdot 10^{25}$  МэВ.      Е)  $1 \cdot 10^{25}$  МэВ.  
 В)  $1 \cdot 10^{26}$  МэВ.      D)  $1 \cdot 10^{23}$  МэВ.
35. (96/7-120). Как изменяется ядро при  $\alpha$ -распаде?  
 А) теряет заряд  $-e$ , масса не изменяется.  
 В) теряет заряд  $-2e$ , масса увеличивается на 4 а.е.м.  
 С) теряет заряд  $+e$ , масса уменьшается на 4 а.е.м.  
 D) теряет заряд  $+2e$ , масса уменьшается на 4 а.е.м.  
 Е) теряет заряд  $+2e$ , масса увеличивается на 2 а.е.м.

## КОДЫ ОТВЕТОВ К ТЕСТОВЫМ ЗАДАНИЯМ

### Глава I. ЭЛЕКТРОСТАТИКА

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
C	C	C	B	A	E	E	A	D	A	E	D
13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
E	D	B	B	E	D	C	C	D	C	A	A
25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
D	E	B	C	D	A	E	B	C	E	D	E
37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48
E	A	C	E	B	D	A	E	D	B	C	C
49	50	51	52	53	54	55	56	57	58		
E	D	E	B	A	E	C	C	B	E		

### Глава II. ПОСТОЯННЫЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
E	D	D	B	E	C	D	A	B	C	B	B
13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
A	E	B	D	A	D	E	B	D	E	E	B
25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
A	C	A	D	E	A	E	B	A	C	E	C
37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48
B	D	E	A	C	E	C	E	B	D	D	A
49	50	51	52	53	54	55	56				
B	D	C	C	B	B	A	E				

### Глава III. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК В РАЗЛИЧНЫХ СРЕДАХ

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
E	B	B	A	A	B	D	E	A	A	A	C
13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
C	C	C	A	B	A	A	B	A	C	C	D
25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
D	E	A	B	E	E	C	A	D	C	D	B

**Глава IV. МАГНИТНОЕ ПОЛЕ**

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
C	B	D	D	C	C	A	A	E	B	E	E	D
14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26
D	A	E	A	B	C	B	C	A	B	D	E	E
27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39
D	C	A	C	B	D	D	E	E	D	B	C	B

**Глава V. ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ИНДУКЦИЯ**

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
C	C	A	B	B	D	E	D	A	E	A	C	D	B	E	A
17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32
B	C	D	A	E	B	A	B	A	C	C	E	B	B	A	B

**Глава VI. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ КОЛЕБАНИЯ**

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
D	E	A	C	B	C	C	D	C	D	A	E	C	B	D
16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
A	D	C	A	B	B	A	B	E	C	D	D	C	E	A
31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42			
E	B	D	B	E	B	C	E	B	A	D	E			

**Глава VII. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ВОЛНЫ**

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
C	A	E	B	D	B	D	D	C	A	D	E	B
14	15	16	17	18	19	20	21	22	23			
C	A	E	D	C	C	A	B	E	A			

**Глава VIII. ГЕОМЕТРИЧЕСКАЯ ОПТИКА**

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
A	D	C	B	D	A	B	E	C	A	D	B	B	B
15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28
B	D	A	E	A	B	C	D	C	C	D	A	B	C
29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42
D	D	B	E	E	C	C	B	E	D	C	A	B	C
43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56
B	C	D	E	A	A	D	C	B	E	C	C	B	D

**Глава IX. ВОЛНОВАЯ ОПТИКА**

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
В	С	В	Е	Е	Д	В	Д	С	Е
11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
А	С	Е	С	Д	А	А	В	Е	Д
21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
В	Д	Е	Е	Д	В	Д	В	С	Е
31	32	33	34	35	36	37	38		
Е	В	Д	С	А	Д	В	А		

**Глава X. ОСНОВЫ СПЕЦИАЛЬНОЙ ТЕОРИИ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ**

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
А	В	В	А	С	В	Е	С	Д	А	В	С
13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Е	С	Е	Д	А	В	С	Д	Д	С	А	Д
25	26	27	28	29	30	31	32	33	34		
В	Д	А	Е	Е	Д	А	С	С	А		

**Глава XI. ИЗЛУЧЕНИЯ И СПЕКТРЫ**

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Д	А	В	Д	В	Д	Е	Е	А	С	В	Е	Е	Е

**Глава XII. КВАНТОВАЯ ФИЗИКА**

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Д	С	Е	Д	А	А	В	Д	Е	Е	В	А
13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
В	Д	С	В	А	Е	Д	С	В	С	Е	С
25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
Д	А	Е	Д	А	Д	С	Е	Д	В	С	Д
37	38	39	40	41	42	43	44				
Е	С	Е	Е	В	С	Д	В				

**Глава XIII. АТОМНАЯ ФИЗИКА**

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
Е	В	В	С	С	В	А	Д	С	Д	А	Е	А	Е	С	Д	В	Д	А

**Глава XIV. ФИЗИКА АТОМНОГО ЯДРА И ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ**

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
С	Д	В	С	А	С	В	Е	Е	А	А	С	С
14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26
Д	А	Д	Д	А	В	А	В	А	Д	С	Е	В
27	28	29	30	31	32	33	34	35				
В	Е	Д	С	В	Д	Е	Е	Д				

## ЛИТЕРАТУРА

- Гладкова Р. А., Жданов Л. С.* Сборник задач и вопросов по физике для средних специальных учебных заведений. М.: Наука. 1983 г.
- Гольдфарб Н. И.* Сборник вопросов и задач по физике. М.: Высшая школа. 1982 г.
- Жданов Л. С., Жданов Г. Л.* Физика для средних специальных учебных заведений М: Наука. 1989 г.
- Н. И. Кошкин.* Элементарная физика. Справочник. М.: Наука. 1991 г.
- Кикоин И. К., Кикоин А. К.* Физика, 9. М.: Просвещение. 1990 г.
- Ландсберг Г. С.* Элементарный учебник физики. Т. I–III. М.: Наука. 1970 г.
- Савельев И. В.* Курс физики. Т. 3. М.: Наука. 1989 г.
- Сборник тестовых вопросов для поступающих в учебные заведения.* Вестник. Т. 1998–2004 гг.
- Тарасов Л. В.* Современная физика в средней школе. М.: Просвещение. 1990 г.
- Трофимова Т. И.* Курс физики. М.: Высшая школа. 1985 г.
- Турдиев Н. Ш.* Физика. Методическое пособие для учителей. Т.: Ташкентская картографическая фабрика. 2003 г.
- Хабибуллаев П. К., Войдедаев А., Бахромов А.* Физика, 7. Механика. Т. 2005 г.
- Шахмаев Н. М., Шахмаев С. Н., Шодиев Д. Ш.* Физика, 9. М.: Просвещение. 1995 г.
- Шаталов В. Ф., Шейман В. М., Хайт А. М.* Опорные конспекты по кинематике и динамике. М.: Просвещение. 1989 г.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

<i>Предисловие</i> .....	3
<b>Глава I. ЭЛЕКТРОСТАТИКА</b>	
§ 1. Электрический заряд. Электризация тел.....	4
§ 2. Взаимодействие точечных зарядов. Закон Кулона....	6
§ 3. Электрическое поле точечных зарядов .....	8
§ 4. Работа поля. Потенциальная энергия .....	10
§ 5. Потенциал .....	11
§ 6. Эквипотенциальные поверхности.....	12
§ 7. Проводники и диэлектрики в электрическом поле.....	14
§ 8. Электроемкость. Конденсаторы .....	18
§ 9. Соединение конденсаторов.....	21
§ 10. Энергия электрического поля .....	22
<i>Контрольные вопросы к главе I</i> .....	24
<i>Тестовые задания к главе I</i> .....	25
<b>Глава II. ПОСТОЯННЫЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК</b>	
§ 11. Электрический ток. Сила тока. Плотность тока .....	33
§ 12. Закон Ома для однородного участка цепи. Сопротивление .....	35
§ 13. Соединения проводников .....	38
§ 14. Измерение напряжения и силы тока .....	39
§ 15. Источники постоянного тока.....	41
§ 16. Химические источники постоянного тока .....	42
§ 17. Обобщенный закон Ома.....	45
§ 18. Соединения источников постоянного тока .....	47
§ 19. Правила Кирхгофа для разветвленных цепей.....	48
§ 20. Работа и мощность тока .....	50
<i>Контрольные вопросы к главе II</i> .....	52
<i>Тестовые задания к главе II</i> .....	53
<b>Глава III. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК В РАЗЛИЧНЫХ СРЕДАХ</b>	
§ 21. Электрический ток в металлах.....	60
§ 22. Электрический ток в электролитах. ....	64
§ 23. Электрический ток в полупроводниках .....	67
§ 24. Электронно-дырочный переход Полупроводниковый диод. Транзистор .....	71
§ 25. Электрический ток в газах .....	74
§ 26. Электрический ток в вакууме .....	79
<i>Контрольные вопросы к главе III</i> .....	84
<i>Тестовые задания к главе III</i> .....	85

#### **Глава IV. МАГНИТНОЕ ПОЛЕ**

§ 27. Магнитное поле и его характеристики .....	90
§ 28. Закон Ампера .....	92
§ 29. Магнитное взаимодействия токов .....	93
§ 30. Рамка с током в магнитном поле .....	95
§ 31. Движение заряженных частиц в магнитном поле .....	97
§ 32. Магнитное поле в веществе .....	101
<i>Контрольные вопросы к главе IV</i> .....	106
<i>Тестовые задания к главе IV</i> .....	107

#### **Глава V. ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ИНДУКЦИЯ**

§ 33. Явление электромагнитной индукции .....	113
§ 34. Причины изменения магнитного потока .....	115
§ 35. Самоиндукция. Индуктивность. Энергия магнитного поля .....	117
<i>Контрольные вопросы к главе V</i> .....	120
<i>Тестовые задания к главе V</i> .....	120

#### **Глава VI. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ КОЛЕБАНИЯ**

§ 36. Колебательный контур .....	125
§ 37. Затухающие электрические колебания .....	128
§ 38. Вынужденные колебания. Переменный ток .....	130
§ 39. Явление электрического резонанса .....	134
§ 40. Мощность в цепи переменного тока .....	136
§ 41. Генератор переменного тока .....	138
§ 42. Трансформаторы. Передача электрической энергии .....	140
<i>Контрольные вопросы к главе VI</i> .....	143
<i>Тестовые задания к главе VI</i> .....	144

#### **Глава VII. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ВОЛНЫ**

§ 43. Основные свойства электромагнитных волн .....	149
§ 44. Излучение электромагнитных волн .....	153
§ 45. Применение электромагнитных волн .....	154
<i>Контрольные вопросы к главе VII</i> .....	157
<i>Тестовые задания к главе VII</i> .....	157

#### **Глава VIII. ГЕОМЕТРИЧЕСКАЯ ОПТИКА**

§ 46. Основные законы геометрической оптики .....	160
§ 47. Прохождение света через пластинку с параллельными гранями .....	163

§ 48. Прохождение света через трехгранную призму .....	164
§ 49. Плоское зеркало .....	165
§ 50. Сферическое зеркало .....	166
§ 51. Тонкие линзы .....	168
§ 52. Оптические приборы .....	173
§ 53. Глаз как оптический инструмент .....	174
§ 54. Оптические приборы для визуальных наблюдений .....	176
<i>Контрольные вопросы к главе VIII</i> .....	181
<i>Тестовые задания к главе VIII</i> .....	182
<b>Глава IX. ВОЛНОВАЯ ОПТИКА</b>	
§ 55. Развитие представлений о природе света .....	189
§ 56. Определение скорости света .....	191
§ 57. Интерференция световых волн .....	192
§ 58. Дифракция света .....	201
§ 59. Дифракционная решетка .....	203
§ 60. Дисперсия света .....	205
§ 61. Поляризация света .....	207
<i>Контрольные вопросы к главе IX</i> .....	212
<i>Тестовые задания к главе IX</i> .....	213
<b>Глава X. ОСНОВЫ СПЕЦИАЛЬНОЙ ТЕОРИИ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ</b>	
§ 62. Постулаты специальной теории относительности .....	218
§ 63. Относительность промежутков времени .....	220
§ 64. Относительность расстояний .....	223
§ 65. Преобразования Лоренца .....	225
§ 66. Элементы релятивистской динамики .....	229
<i>Контрольные вопросы к главе X</i> .....	232
<i>Тестовые задания к главе X</i> .....	233
<b>Глава XI. ИЗЛУЧЕНИЯ И СПЕКТРЫ</b>	
§ 67. Спектры. Спектральный анализ .....	237
§ 68. Инфракрасное и ультрафиолетовое излучения ...	240
§ 69. Рентгеновское излучение .....	242
§ 70. Шкала электромагнитных волн .....	244
<i>Контрольные вопросы к главе XI</i> .....	246
<i>Тестовые задания к главе XI</i> .....	247
<b>Глава XII. КВАНТОВАЯ ФИЗИКА</b>	
§ 71. Тепловое излучение тел .....	249
§ 72. Фотоны .....	253

§ 73. Фотоэффект .....	254
§ 74. Эффект Комптона .....	261
§ 75. Давление света .....	263
§ 76. Действия света .....	265
<i>Контрольные вопросы к главе XII</i> .....	268
<i>Тестовые задания главе XII</i> .....	270

### **Г л а в а XIII. АТОМНАЯ ФИЗИКА**

§ 77. Опыт Резерфорда. Ядерная модель атома .....	276
§ 78. Квантовые постулаты Бора .....	278
§ 79. Атом водорода. Линейчатые спектры .....	280
§ 80. Лазеры .....	285
<i>Контрольные вопросы к главе XIII</i> .....	292
<i>Тестовые задания главе XIII</i> .....	292

### **Г л а в а XIV. ФИЗИКА АТОМНОГО ЯДРА И ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ**

§ 81. Состав атомных ядер .....	296
§ 82. Энергия связи ядер .....	298
§ 83. Радиоактивность .....	300
§ 84. Закон радиоактивного распада .....	302
§ 85. Применение и биологическое действие радиоактивности .....	304
§ 86. Ядерные реакции .....	305
§ 87. Деление тяжелых ядер .....	306
§ 88. Термоядерные реакции .....	311
§ 89. Элементарные частицы .....	312
<i>Контрольные вопросы к главе XIV</i> .....	314
<i>Тестовые задания к главе XIV</i> .....	316
<i>Коды ответов к тестовым заданиям</i> .....	320
<i>Литература</i> .....	323

О-61 **Оплачко Тамара Михайловна.**

**Физика:** Учебное пособие для акад. лицеев и профессиональных колледжей/Т. М. Оплачко, К. А. Турсунметов; Министерство высшего и среднего специального образования Республики Узбекистан, Центр среднего специального, профессионального образования. — Ташкент: «ИЛМ ЗИҲО», 2016 — Ч. II: Электродинамика. Оптика. Атомная физика. — 328 с.

УДК 340 (075)

ББК 22.3я722

ISBN 978-9943-16-297-6

*Учебное издание*

**ТАМАРА МИХАЙЛОВНА ОПЛАЧКО,  
КАМИЛЖОН АХМЕДОВИЧ ТУРСУНМЕТОВ**

## **ФИЗИКА**

### **ЧАСТЬ II**

**ЭЛЕКТРОДИНАМИКА. ОПТИКА.  
АТОМНАЯ ФИЗИКА**

*Учебное пособие для академических лицеев  
и профессиональных колледжей*

Издание четвертое

Издательство «ИЛМ ЗИҲО»

Ташкент — 2016

Редактор *О. Вульф*

Художественный редактор *Ш. Адылов, М. Бурханов*

Компьютерная верстка *Г. Полещиковой*

Издательская лицензия АИ № 275, 15.07.2015 г.

Подписано в печать с оригинала-макета 26.08.2016. Формат

60×90<sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Кегль 11 н/шп. Гарнитура Школьная.

Печать офсетная. Печ.л. 20,5. Изд.л. 19,5.

Тираж 1400. Заказ № 44.

Издательство «ИЛМ ЗИҲО». Ташкент, 129, ул. Навои, 30.

Договор № 24–2016.

Отпечатано в ЧП «PAPER MAX» Ташкент, ул. Навои, 30.