

**Елабужский государственный педагогический университет**

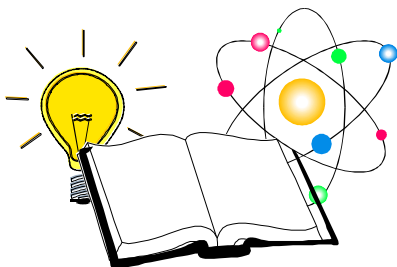
**Ф. М. САБИРОВА**

# **ФИЗИКА**

## **Часть 2.**

**Электричество и магнетизм.**

**Оптика. Квантовая физика.**



**Елабуга – 2009**

Печатается по решению редакционно-издательского совета Елабужского государственного педагогического университета (прот. № 30 от 27.11.2008 г.)

**УДК 553 (075)**

**ББК 22.3я7**

**С12**

**Кафедра общей физики**

**Рецензенты:**

зав.кафедрой теоретической физики, канд. физ.-мат. наук, доцент

**Хвалченко И.И.,**

доцент каф. ИТ КГТУ им. А.Н.Туполева, канд. тех. наук,

**Конюхов М.И.**

**Сабирова Ф.М. Физика. Часть 2. Электричество и магнетизм. Оптика. Квантовая физика / Ф.М. Сабирова/Учебно-методическое пособие для студентов биологического факультета. – Елабуга: Изд-во Елабужского пед. ун-та, 2009.– 82 с.**

**Елабужский государственный педагогический университет, 2009 ©**

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Предлагаемое учебное пособие предназначено для организации самостоятельной и аудиторной работы на лекционных и практических занятиях по курсу физики со студентами биологического факультета педагогического вуза. Оно подготовлено по разделам “Электричество и магнетизм”, «Оптика» и «Квантовая физика» в соответствии с государственными образовательными стандартами высшего профессионального образования для указанной специальности.

Материал распределен по основным темам, изучаемым в данных разделах физики: 1) электростатика; 2) постоянный электрический ток ; 3) магнитное поле и электромагнетизм; 4) элементы геометрической и волновой оптики; 5) квантовая и атомная физика. По каждой теме, во-первых, достаточно подробно приведен теоретический материал, позволяющий использовать пособие в качестве конспектов для подготовки к экзаменам или зачетам. Во-вторых, представлен набор задач для самостоятельного решения, позволяющий использовать пособие для организации практических занятий, а также для проведения письменных контрольных работ. В-третьих, по каждой теме приведен перечень вопросов для самостоятельного изучения, которые включены в программу изучения дисциплины и которые могут служить основой тематики рефератов

Пособие не исключает работу с учебниками и задачками для вузов, более того, ряд вопросов в него не вошли в связи с дефицитом аудиторного времени и ограниченными возможностями данного пособия.

### ТЕМА 1. ЭЛЕКТРОСТАТИКА

#### §1. Закон сохранения электрического заряда. Закон Кулона. Диполь.

Все тела в природе способны электризоваться, то есть приобретать электрический заряд. В природе существуют частицы с электрическими зарядами противоположных знаков. Заряд электрона считают отрицательным, а заряд протона – элементарной частицы, которая входит в состав ядра атома, – положительным. *Большинство тел электрически нейтрально*; число электронов в них равно числу протонов. Если нарушить электрическую нейтральность тела, то оно становится *наэлектризованным (заряженным)*. Тело заряжено отрицательно – значит, оно имеет избыток электронов. Тело, в котором электронов меньше, чем положительно заряженных частиц, заряжено положительно. При взаимодействии одноименные заряды отталкиваются, разноименные – притягиваются.

Электрический заряд обладает свойством *дискретности* – при элек-

тризации электрический заряд изменяется на строго определенное значение, равное или кратное минимальному количеству электричества, называемому **элементарным электрическим зарядом**. Наименьшая по массе стабильная частица, обладающая элементарным электрическим отрицательным зарядом, называется **электроном**. Заряд электрона  $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл. Масса электрона  $m_e = 9,11 \cdot 10^{-31}$  кг. Заряд протона положителен и по модулю равен заряду электрона, его масса  $m_p = 1,67 \cdot 10^{-27}$  кг. Заряд тела, состоящего из  $N$  заряженных частиц, кратен целым значениям заряда электрона:  $q = \pm Ne$ . Заряд электрона впервые был измерен *Р.Э. Милликеном* в 1909 г. Дробных зарядов в свободном состоянии не существует.

Опытным путем был установлен фундаментальный закон природы – **закон сохранения электрического заряда**: алгебраическая сумма электрических зарядов любой замкнутой системы остается неизменной, какие бы процессы не происходили внутри этой системы: 
$$\sum_{i=1}^N q_i = const .$$

Единица заряда – **кулон** (Кл).

Основным законом электростатики является закон взаимодействия двух неподвижных точечных зарядов. Закон был экспериментально установлен французским физиком *Ш. О. Кулоном* в 1785 г.: *сила электрического взаимодействия между двумя неподвижными точечными зарядами, находящимися в вакууме, пропорциональна произведению зарядов  $q_1$  и  $q_2$  и обратно пропорциональна квадрату расстояния  $r$  между ними*: 
$$F = k \frac{|q_1| |q_2|}{r^2},$$

где  $k$  – коэффициент пропорциональности, зависящий от выбора системы единиц физических величин.

Сила  $\vec{F}$  направлена по прямой, соединяющей заряды, то есть является центральной. Сила отталкивания  $\vec{F}$ , действующая на заряд  $q_2$  со стороны одноименного заряда  $q_1$ , совпадает по направлению с радиусом-вектором  $r$ , проведенным из  $q_1$  к этому заряду. Сила притяжения, действующая на заряд  $q_2$  со стороны разноименного заряда  $q_1$ , имеет противоположное направление (рис.1.1). Силы отталкивания принято считать положительными, силы притяжения – отрицательными. В векторной форме **закон Кулона** записывается в виде:

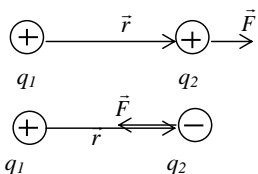


Рис. 1.1

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

Коэффициент  $k$  в законе Кулона в СИ определяется по формуле :

$$k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} = 9 \cdot 10^9 \text{ Н} \cdot \text{м}^2 / \text{Кл}^2, \text{ а } \epsilon_0 = \frac{1}{4\pi \cdot 9 \cdot 10^9} \text{ Ф/м} = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}.$$

Здесь  $\epsilon_0$  – электростатическая постоянная.

Таким образом, закон Кулона в скалярном виде:  $F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2}$ .

Этот закон мы сформулировали для вакуума. С учетом среды:

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{\epsilon r^2},$$

где  $\epsilon$  – диэлектрическая проницаемость среды. Для вакуума  $\epsilon=1$ . Диэлектрическая проницаемость показывает, во сколько раз в данной среде силы взаимодействия между точечными зарядами меньше, чем в вакууме, при одинаковых расстояниях.

*Электрическим диполем* называется система, состоящая из двух одинаковых по значению, но разноименных точечных зарядов, расположенных на некотором расстоянии  $l$  друг от друга. Отрезок прямой  $l$ , соединяющий оба заряда, называют *осью диполя*.

Основной характеристикой диполя является его *электрический* или *дипольный момент* – вектор, численно равный произведению  $ql$  и направленный от отрицательного заряда к положительному:  $\vec{p} = q\vec{l}$ . Единица электрического момента диполя – *кулон-метр* (Кл · м)



Рис. 1.2.

## § 2. Электростатическое поле.

### Напряженность электростатического поля.

Если имеем систему неподвижно распределенных электрических зарядов, то их взаимодействие осуществляется посредством электрического (*электростатического*) поля. *Электростатическое поле не изменяется во времени и создается только электрическими зарядами.*

Электростатическое поле отдельного заряда можно обнаружить, если в пространство, окружающее этот заряд  $q$ , внести другой, *пробный* заряд  $q'$ .

Отношение  $\vec{E} = \vec{F} / q'$  называют *напряженностью электростатического поля*. Единица напряженности – *вольт на метр* (В/м).

Например, напряженность поля точечного заряда:

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q'} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^2} \frac{\vec{r}}{r}$$

*Напряженность* – величина векторная. За направление вектора напряженности  $E$  принимают направление силы, с которой поле действует на пробный заряд, помещенный в данную точку поля.

Напряженность – силовая характеристика поля; она численно равна силе, действующей на единичный положительный заряд.

Если электростатическое поле создается не одним, а несколькими зарядами  $q_1, q_2, \dots, q_n$ , то результирующее поле определяется в соответствии с принципом суперпозиции полей: 
$$\vec{E} = \sum_{i=1}^n \vec{E}_i .$$

Электростатическое поле графически удобно представлять силовыми линиями. **Силовыми линиями** или **линиями напряженности** поля называют линии, касательные к которым в каждой точке совпадают с вектором напряженности в данной точке поля. Линии напряженности электрического поля направлены от положительного заряда к отрицательному, т.е. выходят из положительного, а входят в отрицательный заряды.

Густотой линий напряженности характеризуют величину напряженности поля. В местах, где напряженность поля меньше, линии проходят реже. Примеры простейших электрических полей представлены на рис.2.1.

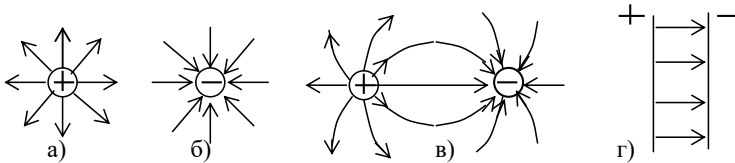


Рис.2. 1.

Электростатическое поле, во всех точках которого напряженность поля одинакова по модулю и направлению ( $\vec{E} = \text{const}$ ), называют **однородным**. Примером такого поля могут быть электрические поля равномерно заряженной плоскости и плоского конденсатора вдали от краев его обкладок.

Линии напряженности электростатического поля никогда не могут быть замкнуты сами на себя. Они начинаются и кончаются на зарядах, либо уходят в бесконечность. Это свидетельствует о наличии в природе двух родов электрических зарядов.

Еще одна силовая характеристика электростатического поля – электрическое смещение. Это величина, определяемая для вакуума формулой:  $\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E}$ , а для среды  $\vec{D} = \epsilon_0 \epsilon \vec{E}$ , где  $\epsilon$  – диэлектрическая проницаемость среды.

### § 3. Работа перемещения заряда в электростатическом поле. Потенциал поля. Разность потенциалов.

Если в поле заряда  $+q$  перемещаем пробный заряд  $q'$  из точки 1, удаленной от заряда  $+q$  на расстояние  $r_1$ , в точку 2, находящуюся на расстоянии  $r_2$  от заряда  $+q$ , то работу по перемещению пробного

заряда можно определить как:  $A = \int_1^2 F ds \cos \alpha$ . Из

рис.  $ds \cos \alpha = dr$  (см. рис.3.1), тогда  $A = \int_{r_1}^{r_2} F dr$ .

Учтем: 1)  $F = Eq'$  – кулоновская сила, действующая на пробный заряд  $q'$  в каждой точке поля с

напряженностью  $E$ ; 2) Напряженность поля точечного заряда:  $E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^2}$  и

произведем подстановки в формулу для работы:

$$A = \int_{r_1}^{r_2} F dr = \int_{r_1}^{r_2} Eq' dr = \frac{qq'}{4\pi\epsilon_0} \int_{r_1}^{r_2} \frac{dr}{r^2} = \frac{qq'}{4\pi\epsilon_0} \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right)$$

*Работа сил электрического поля при перемещении заряда не зависит от формы пути, а зависит лишь от взаимного расположения начальной и конечной точек траектории. Это свойство **потенциальных** полей. Из него следует, что работа, совершаемая в электрическом поле по замкнутому контуру, равна нулю.*

При перемещении зарядов изменяется их взаимное расположение, поэтому работа, совершаемая электрическими силами, в этом случае равна изменению потенциальной энергии перемещаемого заряда:  $A = -\Delta W_n = W_{n1} - W_{n2}$ , откуда следует, что потенциальная энергия заряда  $q'$ :

$$W_n = \frac{qq'}{4\pi\epsilon_0} \frac{1}{r} + const.$$

Принято считать  $const = 0$  (при  $r \rightarrow \infty$   $W \rightarrow 0$ ), поэтому:

$$W_n = \frac{qq'}{4\pi\epsilon_0} \frac{1}{r}.$$

В любой точке поля *потенциальная энергия  $W$  заряда численно равна работе, которую необходимо совершить для перемещения заряда из бесконечности в эту точку.* Отношение  $W/q'$  зависит только от  $q$  и  $r$ . Эту величину называют **потенциалом**:

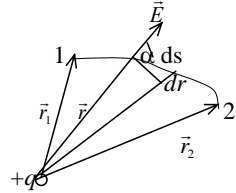


Рис.3.1.

$$\varphi = \frac{W}{q'}$$

Единица электрического потенциала – *вольт* (В).

Потенциал является *энергетической характеристикой* электрического поля. **Он характеризует потенциальную энергию, которой обладает бы положительный единичный заряд, помещенный в данную точку поля.** Как скалярная величина потенциал может принимать положительные или отрицательные значения. Например, для поля точечного заряда:

$$\varphi = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 r}$$

Потенциал поля, создаваемого системой точечных зарядов, равен алгебраической сумме потенциалов всех этих зарядов:  $\varphi = \sum_i \varphi_i$ .

Работа сил поля при перемещении заряда  $q'$  из точки 1 в точку 2 может быть записана в виде:

$$A = -\Delta W = W_1 - W_2 = \frac{qq'}{4\pi\epsilon_0 r_1} - \frac{qq'}{4\pi\epsilon_0 r_2} = q'(\varphi_1 - \varphi_2)$$

$$A = q'(\varphi_1 - \varphi_2)$$

Величину  $(\varphi_1 - \varphi_2)$  называют *разностью потенциалов (напряжением) электрического поля*. Понятие разности потенциалов применимо лишь к двум различным точкам поля.

Если принять  $r_2 \rightarrow \infty$ , то  $A = q'\varphi_1 = q'\varphi$ . Потенциал данной точки поля равен работе перемещения единичного положительного заряда из данной точки в бесконечность.

#### § 4. Связь между напряженностью и потенциалом.

Напряженность и потенциал – силовая и энергетическая характеристики одной и той же точки поля; следовательно, между ними должна существовать однозначная связь.

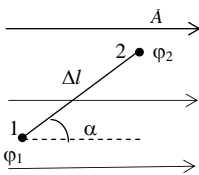


Рис.4.1.

Рассмотрим перемещение заряда  $q'$  в однородном электрическом поле, напряженность которого  $\vec{E}$  (рис.12). Заряд перемещается из точки, потенциал которой  $\varphi_1$ , в точку с потенциалом  $\varphi_2$ . Работа, которую совершают силы электростатического поля при этом перемещении:  $A = q'(\varphi_1 - \varphi_2) = -q'\Delta\varphi$ . С другой стороны, эта работа может быть представлена как:



$A = F_l \Delta l = q' E_l \Delta l$ . Приравнявая правые части этих уравнений, получаем

$$E_l = - \frac{\Delta \varphi}{\Delta l}.$$

В общем случае неоднородного поля точки 1 и 2 нужно выбрать так, чтобы можно было считать напряженность постоянной. Переходя к пределу  $\Delta l \rightarrow 0$ , получим  $E_l = - \frac{d\varphi}{dl}$ .

Через  $l$  обозначено произвольно выбранное направление в пространстве.

В векторном виде:  $\vec{E} = -\text{grad } \varphi$

Выражение  $\text{grad } \varphi$  называется *градиентом потенциала*. Эта величина характеризует быстроту изменения потенциала в направлении силовой линии. Знак «минус» означает, что *вектор напряженности направлен в сторону убывания потенциала*. Связь между напряженностью поля и потенциалом позволяет по известной напряженности поля найти разность потенциалов между двумя произвольными точками этого поля.

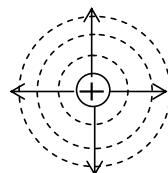


Рис.4.2.

Графически распределение потенциала электрического поле можно изображать с помощью *эквипотенциальных поверхностей* – совокупностей точек, имеющих одинаковый потенциал. Пересекаясь с плоскостью чертежа, эквипотенциальные поверхности дают эквипотенциальные линии.

*Эквипотенциальные линии (поля точечного заряда) представляют собой concentric окружности, эквипотенциальные поверхности – concentric сферы*. Из рис. 4.2. видно, что линии напряженности (радиальные лучи) *перпендикулярны* эквипотенциальным линиям.

## § 5. Проводники и диэлектрики в электрическом поле.

По электрическим свойствам все вещества делятся на три больших класса: диэлектрики, полупроводники и проводники. К проводникам относятся: *металлы* (проводимость осуществляется свободными электронами), *электролиты* (проводимость осуществляется ионами и сопровождается переносом вещества), *плазма* (носителями тока являются свободные электроны, а также положительные и отрицательные ионы).

Рассмотри твердые металлы. В металлических проводниках концентрация свободных электронов достаточно велика, порядка  $10^{28} \text{ м}^{-3}$ . Если проводник поместить в электростатическое поле  $\vec{E}_0$ , то произойдет перераспределение свободных электронов, часть из них будет находиться на по-

верхности проводника (индуцированные заряды), создавая поле, напряженность которого  $\vec{E}_{\text{инд}}$  противоположна напряженности внешнего электростатического поля. При этом установится электростатическое равновесие. При равновесии не будет направленного движения электронов, а это означает отсутствие результирующего электрического поля внутри проводника. (Вследствие принципа суперпозиции:  $\vec{E} = \vec{E}_{\text{инд}} + \vec{E}_0$ ,  $E = E_{\text{инд}} - E_0$ , но  $E_{\text{инд}} = E_0 \Rightarrow E = 0$ ). Таким образом, нейтральный проводник, внесенный в электрическое поле, разрывает часть линий напряженности.

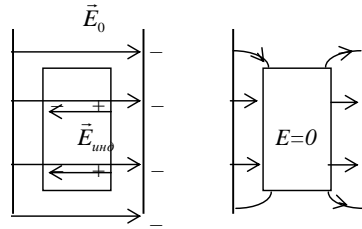


Рис. 5.1

Из связи потенциала и напряженности следует, что в этом случае потенциал внутри проводника  $\varphi = \text{const}$ . Следовательно, напряженность поля на поверхности проводника должна быть в каждой точке направлена по нормали к поверхности ( $E = E_0$ ), то есть в случае равновесия зарядов поверхность проводника *эквипотенциальна*.

Индукцированные заряды распределяются по внешней поверхности проводника. Если внутри проводника имеется полость, то при равновесном индукцированном распределении зарядов напряженность поля внутри полости равна нулю. Индукцированные заряды исчезают при удалении проводника из электрического поля.

Идеальный **диэлектрик** тот, который не проводит электрический ток. У диэлектриков нет свободных электронов, но положительные и отрицательные заряды в атомах смещаются друг относительно друга, то есть образуют диполь с электрическим моментом  $\vec{p} = q\vec{l}$ . В отсутствии поля эти диполи ориентированы произвольным образом, то есть суммарный дипольный момент равен нулю:

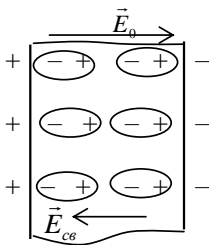


Рис.5.2.

$\sum_{i=1}^n \vec{p}_i = 0$ . Если диэлектрик поместить во внешнее

поле с напряженностью  $\vec{E}_0$ , тогда диполи ориентруются в этом поле (рис.5.2). Такое состояние диэлектрика называется **поляризацией**. Поляризация диэлектрика приводит к появлению связанных зарядов  $\sigma_{\text{св}}$ , на его поверхности. Напряженность  $\vec{E}_{\text{св}}$  электростатического поля, создаваемого связанными зарядами, направлена про-

тивоположно напряженности  $\vec{E}_0$  внешнего, поляризующего диэлектрик электростатического поля. Напряженность суммарного поля внутри диэлектрика равна:  $\vec{E} = \vec{E}_0 + \vec{E}_{cs} \Rightarrow E = E_0 - E_{cs}$ . Но  $E_0 \neq E_{cs} \Rightarrow E \neq 0$ .

Степень поляризации диэлектрика характеризуется векторной величиной  $P$ , называемой **поляризованностью**, т.е. *векторной суммой дипольных моментов молекул, находящихся в единице объема*:

$$\vec{P} = \frac{\sum_{i=1}^n \vec{p}_i}{V}$$

где  $\vec{p}_i$  – дипольный момент отдельно взятой молекулы,  $n$  – концентрация атомов или молекул в объеме  $V$ .

Единица поляризованности – *кулон на квадратный метр* (Кл/м<sup>2</sup>).

Для изотропного диэлектрика поляризованность пропорциональна напряженности поля внутри него:  $\vec{P} = \chi \varepsilon_0 \vec{E}$ , (5.1)

где  $\chi$  – диэлектрическая восприимчивость диэлектрика, зависящая от строения вещества и температуры, величина безразмерная. Она отражает степень реакции среды на внешнее воздействие электрического поля.

Поляризованность направлена вдоль внешнего электростатического поля  $E_0$ , в котором находится диэлектрик. Вектор электрического смещения для диэлектрика:  $\vec{D} = \varepsilon_0 \vec{E} + \vec{P}$ .

Подставим сюда (5.1):  $\vec{D} = \varepsilon_0 \vec{E} + \chi \varepsilon_0 \vec{E} = \varepsilon_0 (1 + \chi) \vec{E} = \varepsilon_0 \varepsilon \vec{E}$

где  $\varepsilon = 1 + \chi$  – *относительная диэлектрическая проницаемость среды*.

$\varepsilon = \frac{E_0}{E} \Rightarrow$  относительная диэлектрическая проницаемость среды показывает, во сколько раз напряженность поля в вакууме больше, чем в диэлектрике. Эта величина безразмерная.

## §6. Электроемкость. Конденсаторы. Энергия электростатического поля.

Сообщенный проводнику заряд  $q$  распределяется по его поверхности так, что напряженность поля внутри проводника равна нулю. Если проводнику сообщить такой же заряд  $q$ , то он также распределится по поверхности проводника. Отсюда вытекает, что потенциал проводника пропорционален находящемуся на нем заряду:  $q = C\varphi$ . Коэффициент пропорцио-

нальности  $C$  называют *электроемкостью*:  $C = \frac{q}{\varphi}$ .

*Электроемкость проводника или системы проводников – физическая величина, характеризующая способность проводника или системы проводников накапливать электрические заряды.*

**Единица электроемкости – фарад (Ф).**

Например, зная потенциал заряженного шара (сферы)  $\varphi = \frac{q}{4\pi\epsilon\epsilon_0 R}$ ,

можно найти *электроемкость уединенной сферы*:

$$C = q / \varphi = 4\pi\epsilon\epsilon_0 R$$

Из этого соотношения видно, что электроемкость зависит как от геометрии проводника, так и от относительной диэлектрической проницаемости среды.

Практический интерес представляют **конденсаторы** – система из двух проводников, обкладок, разделенных диэлектриком, толщина которого мала по сравнению с размерами обкладок. Электроемкость определяется геометрией конденсатора и диэлектрическими свойствами среды, заполняющей пространство между обкладками. При этом расстояние между обкладками значительно меньше их площади. По форме исполнения различают плоские, цилиндрические, сферические и слоистые конденсаторы. Электроемкость плоского конденсатора:

$$C = \frac{\epsilon\epsilon_0 S}{d},$$

где  $S$  – площадь пластины,  $d$  – расстояние между пластинами.

Для получения необходимой электроемкости конденсаторы соединяют в батарею. Различают два вида соединений: параллельное и последовательное.

При *последовательном* соединении конденсаторов (рис.6.1):  $q_1=q_2=\dots=q_n=q_0$ ;

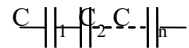


Рис.6.1

$$U_0 = U_1 + U_2 + \dots + U_n = \sum_{i=1}^n U_i ;$$

$$\frac{1}{C_0} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_n} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{C_i}$$

При *параллельном* соединении конденсаторов (рис.6.2):

$$U_1 = U_2 = \dots = U_n = U_0 \quad q_0 = q_1 + q_2 + \dots + q_n = \sum_{i=1}^n q_i$$

$$C_0 = C_1 + C_2 + \dots + C_n = \sum_{i=1}^n C_i .$$

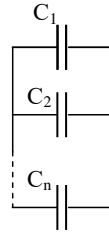


Рис.6.2.

### Энергия уединенного заряженного проводника.

Уединенный незаряженный проводник можно зарядить до потенциала  $\varphi$ , многократно перенося порции заряда  $dq$  из бесконечности на проводник. Элементарная работа, которая совершается против сил поля, в этом случае равна  $dA = \varphi dq$ . Перенос заряда  $dq$  из бесконечности на проводник изменяет его потенциал на  $d\varphi$ , тогда  $dq = Cd\varphi$ . Следовательно,  $dA = \varphi dq = C\varphi d\varphi$ , т. е. при переносе заряда  $dq$  из бесконечности на проводник увеличиваем потенциальную энергию поля на величину:  $dW = dA = C\varphi d\varphi$ . Проинтегрировав данное выражение, находим потенциальную энергию электростатического поля заряженного проводника при увеличении его потенциала от 0 до  $\varphi$ :

$$W = \int_0^{\varphi} C\varphi d\varphi = \frac{C\varphi^2}{2} .$$

Применяя соотношение  $\varphi = q/C$ , получаем следующие выражения для потенциальной энергии:  $W = \frac{q\varphi}{2}$ ,  $W = \frac{q^2}{2C}$ .

Энергия конденсатора  $W = \frac{qU}{2} = \frac{CU^2}{2} = \frac{q^2}{2C}$ , где  $U = \varphi_1 - \varphi_2$  – разность потенциалов между обкладками. Полученные формулы справедливы при любой форме обкладок конденсатора.

## ВОПРОСЫ

### *для самопроверки и подготовки к тестированию по теме 1.*

1. Как формулируется закон сохранения зарядов для замкнутой системы?
2. Записать формулу закона Кулона, определяющего силу взаимодействия зарядов в вакууме в скалярном и векторном виде.
3. По какой формуле определяется сила взаимодействия двух точечных зарядов в вакууме?
4. Как зависит сила кулоновского взаимодействия двух точечных зарядов от расстояния?
5. Как зависит сила кулоновского взаимодействия двух точечных зарядов от величины зарядов?
6. Что называется напряженностью электрического поля?
7. По какой формуле определяется напряженность электрического поля в данной точке среды, удаленной на расстояние  $r$  от заряженного тела?
8. Как направлены силовые линии электрического поля?
9. Какая величина является силовой характеристикой электрического поля?
10. С каким вектором совпадает касательная к силовой линии в любой точке?
11. Что характеризует густота линий напряженности?
12. Что такое электрический диполь?
13. Записать принцип суперпозиции полей.
14. От чего зависит работа по перемещению заряда между двумя точками в электростатическом поле?
15. Чему равна работа по перемещению точечного заряда  $q$  из точки с потенциалом  $\varphi_1$  в точку с потенциалом  $\varphi_2$  ?
16. По какой формуле вычисляется потенциал поля, создаваемого точечным зарядом  $q$  на расстоянии  $r$ ?
17. Что такое эквипотенциальные поверхности?
18. Какую форму имеют эквипотенциальные поверхности поля точечного заряда?
19. Записать формулу, связывающая напряженность и потенциал электростатического поля.
20. Как направлен вектор напряженности поля индуцированных зарядов внутри полого проводника, помещенного в электростатическом поле?
21. Чему равна напряженность результирующего поля внутри полого проводника, помещенного в электростатическом поле?
22. Как направлен вектор напряженности электрического поля на поверхности проводника?

23. Как направлен вектор напряженности поля связанных зарядов внутри диэлектрика, помещенного в электростатическом поле?

24. Как называется величина, равная векторной сумме дипольных моментов молекул, находящихся в единице объема?

25. Что показывает диэлектрической проницаемости среды?

26. Как связана диэлектрическая проницаемость среды  $\epsilon$  с её диэлектрической восприимчивостью  $\chi$ ?

27. Что называют электроемкостью проводника?

28. По какой формуле рассчитывается результирующая емкость при параллельном подключении конденсаторов?

29. По какой формуле рассчитывается результирующая емкость при последовательном подключении конденсаторов?

30. По какой формуле вычисляется энергия электрического поля уединенного заряженного проводника?

31. Что определяет формула  $W = \frac{CU^2}{2} = \frac{qU}{2} = \frac{q^2}{2C}$  ?

## ЗАДАЧИ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО РЕШЕНИЯ ПО ТЕМЕ 1

1.1. Незаряженная цинковая пластинка при освещении потеряла 4 электрона. Каким стал заряд пластинки?

1.2. От капли, имевшей электрический заряд  $+2e$ , отделилась капля с зарядом  $+e$ . Как изменился модуль заряда капли.

1.3. На двух одинаковых металлических шарах находится положительный заряд  $+Q$  и отрицательный заряд  $-Q$ . Каким станет заряд шаров после соприкосновения?

1.4. С какой силой взаимодействуют два маленьких заряженных шарика, находящихся в вакууме на расстоянии 9 см друг от друга? Заряд каждого шарика равен  $3 \cdot 10^{-6}$  Кл.

1.5. Два точечных заряда, находясь в воздухе ( $\epsilon=1$ ) на расстоянии 20 см друг от друга, взаимодействуют с некоторой силой. На каком расстоянии нужно поместить заряды в масле ( $\epsilon=5$ ), чтобы получить ту же силу взаимодействия?

1.6. Два проводящих шарика малых размеров расположены в воздухе на расстоянии 60 см друг от друга. Их заряды равны  $4 \cdot 10^{-7}$  Кл и  $0,8 \cdot 10^{-7}$  Кл. Шарики приводят в соприкосновение, а затем удаляют на прежнее расстояние. Определить силу их взаимодействия до и после соприкосновения.

1.7. Два положительных заряда  $q$  и  $2q$  находятся на расстоянии 10 мм. Заряды взаимодействуют с силой  $7,2 \cdot 10^{-4}$  Н. Как велик каждый заряд?

1.8. Два точечных заряда  $1,1 \text{ нКл}$  каждый находятся на расстоянии  $17 \text{ см}$ . С какой силой и в каком направлении они действуют на положительный заряд в  $1 \text{ мКл}$ , находящийся на таком же расстоянии от каждого из них?

1.9. Сила, действующая в поле на заряд в  $4 \cdot 10^{-5} \text{ Кл}$ , равна  $20 \text{ Н}$ . Чему равна напряженность поля в этой точке?

1.10. Напряженность поля в некоторой точке  $0,4 \text{ кВ/м}$ . Определить величину силы, с которой поле в этой точке будет действовать на заряд  $4,5 \text{ мкКл}$ .

1.11. Два точечных заряда  $4 \text{ нКл}$  и  $-2 \text{ нКл}$  расположены на расстоянии  $60 \text{ см}$ . Найти напряженность электрического поля в точке, лежащей посередине между зарядами.

1.12. Два точечных заряда  $4 \text{ нКл}$  и  $2 \text{ нКл}$  расположены на расстоянии  $60 \text{ см}$ . Найти напряженность электрического поля в точке, лежащей посередине между зарядами.

1.13. Два точечных положительных заряда расположены в вершинах А и В правильного треугольника и создают в третьей его стороне С поле напряженностью  $100 \text{ В/м}$  каждый. Чему равна суммарная напряженность поля в вершине?

1.14. В какую среду помещен точечный электрический заряд  $q=4,5 \cdot 10^{-7} \text{ Кл}$ , если на расстоянии  $r=5 \text{ см}$  от него напряженность поля равна  $E=2 \cdot 10^4 \text{ В/м}$ ?

1.15. Металлический шар радиусом  $5 \text{ см}$  несет заряд  $q=10 \text{ нКл}$ . Определить потенциал электростатического поля на поверхности шара.

1.16. Два заряда по  $6 \text{ нКл}$  каждый находятся на расстоянии  $100 \text{ см}$  друг от друга. Какую работу надо совершить, чтобы сблизить их до расстояний  $50 \text{ см}$ ?

1.17. Какую скорость приобретает электрон, пролетевший ускоряющую разность потенциалов  $10^4 \text{ В}$ ?

1.18. Разность потенциалов между точками, расположенными на одной силовой линии однородного электрического поля, напряженность которого  $50 \text{ В/м}$ , равна  $10 \text{ В}$ . Чему равно расстояние между этими точками.

1.19. Какова емкость конденсатора, если он получил заряд  $6 \cdot 10^{-5} \text{ Кл}$  от источника напряжения  $120 \text{ В}$ ?

1.20. Чему равна емкость плоского воздушного конденсатора с квадратными пластинами со стороной  $10 \text{ см}$ , расположенными на расстоянии  $1 \text{ мм}$  друг от друга?

1.21. Определите толщину диэлектрика конденсатора, емкость которого  $1400 \text{ пФ}$ , площадь покрывающих друг друга пластин  $14 \text{ см}^2$ , если диэлектрик слюда с  $\epsilon=6$ .

1.22. Найти емкость системы конденсаторов, изображенной на рисунке 1.22 (а-в). Емкость каждого конденсатора  $0,5 \text{ мкФ}$ .



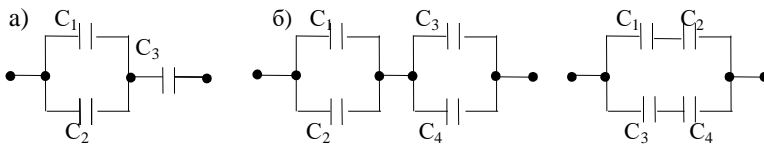


Рис. 1.22

1.23. Разность потенциалов между точками А и В 6 В (см.рис.1.23). Емкость первого конденсатора 2 мкФ и емкость второго конденсатора 4 мкФ. Найти заряды  $q_1$  и  $q_2$  и разности потенциалов  $U_1$  и  $U_2$  на обкладках каждого конденсатора.

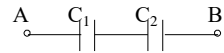


Рис.1.23.

1.24. Шар радиусом 1 м заряжен до потенциала 30кВ. Найти энергию заряженного шара.

1.25. Конденсатору, емкость которого равна 10 пФ, сообщен заряд 1 нКл. Определить энергию конденсатора.

### ***ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО ИЗУЧЕНИЯ ПО ТЕМЕ 1***

1. Теорема Гаусса и применение ее для заряженных плоскостей, сфер.
2. Вектор электрической индукции. Граница двух диэлектриков.
3. Биопотенциалы.
4. Физические основы электрокардиографии.

## ТЕМА 2. ПОСТОЯННЫЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК

### § 7. Электрический ток и его характеристики. Закон Ома для участка цепи.

*Направленное движение электрических зарядов под действием сил электрического поля называют электрическим током.*

Ток может идти в твердых телах, жидкостях и газах. Если среда является проводником с большим количеством свободных электронов, то течение электрического тока осуществляется за счет дрейфа этих электронов. Различают **ток проводимости** (упорядоченное движение электронов в проводниках, ионов в электролитах, электронов и дырок в полупроводниках, ионов и электронов в газах) и **конвекционный ток** (упорядоченное перемещение электрических зарядов, связанное с перемещением заряженного тела в пространстве).

За направление тока принят дрейф положительных зарядов (электроны проводимости всегда движутся в направлении, противоположном направлению тока). Количественной характеристикой электрического тока являются сила тока  $I$  и плотность тока  $j$ .

**Сила тока** – скалярная величина, равная отношению количества электричества  $dq$ , которое за время  $dt$  переносится через данное сечение проводника, ко времени  $dt$ :  $I = dq / dt$

**Постоянным током** называют электрический ток, сила и направление которого с течением времени не изменяются. Для постоянного тока:

$$I = q / t$$

Единица силы электрического тока – ампер (А).

**Плотность тока** – векторная физическая величина, модуль которой равен отношению силы тока  $I$  к площади поперечного сечения проводника  $S$ :  $j = I / S$ . Вектор  $\vec{j}$  направлен вдоль направления тока, т.е. совпадает с направлением упорядоченного движения положительных зарядов.

Единица плотности электрического тока – А/м<sup>2</sup>.

Прохождение электрического тока проявляется по следующим признакам: 1) по действию на магнитную стрелку, помещенную вблизи проводника; 2) по термическому действию – при прохождении тока проводник нагревается; 3) по химическому действию (электролиз–выделение составляющих сложных соединений с помощью тока).

Для того чтобы в проводнике все время шел ток, необходимо поддерживать в нем постоянное электрическое поле. Возьмем металлический проводник длиной  $l$ . Пусть  $E$  – напряженность электрического поля внутри проводника, а  $\phi_1 - \phi_2 = U$  – постоянная разность потенциалов на концах про-

водника. Тогда:  $E = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{l} = \frac{U}{l}$ .

Г.Ом экспериментально установил, что сила тока в металлических проводниках пропорциональна приложенному напряжению:

$$I = GU.$$

Коэффициент пропорциональности  $G$  называют *электропроводимостью проводника*, а обратную величину  $R = G^{-1}$  – его *электрическим сопротивлением*.

**Закон Ома для участка цепи:** сила тока в проводнике пропорциональна напряжению на его концах и обратно пропорциональна сопротивлению проводника:

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

Единица сопротивления – *ом* (Ом).

Электрическое сопротивление обусловлено тем, что свободные электроны при дрейфе взаимодействуют с положительными ионами кристаллической решетки металла. При повышении температуры учащаются соударения электронов с ионами, поэтому сопротивление проводников зависит от температуры:  $R = R_0(1 + \alpha t)$ , где  $R_0$  – сопротивление при  $0^\circ\text{C}$ ,  $R$  – сопротивление при  $t^\circ\text{C}$ ,  $\alpha$  – термический коэффициент сопротивления. Для всех чистых металлов  $\alpha \sim 1/273 \text{ K}^{-1}$ . Зависимость сопротивления металлов от температуры положена в основу устройства термометров сопротивления. Они используются как при очень высокой, так и при очень низкой температуре, когда применение жидкостных термометров невозможно.

Сопротивление проводников зависит также от материала проводника, т. е. строения его кристаллической решетки. Для однородного цилиндрического проводника длиной  $l$  и площадью поперечного сечения  $S$  сопротивление определяется по формуле:

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

где  $\rho = RS/l$  – удельное сопротивление проводника (сопротивление однородного цилиндрического проводника, имеющего единичную длину и единичную площадь поперечного сечения).

Единица удельного сопротивления – *ом-метр* (Ом·м).

Величина  $\gamma = 1/\rho$ , обратная удельному сопротивлению, называется *удельной электрической проводимостью проводника*. Единица электрической проводимости – *сименс* (См). *Сименс* – электрическая проводимость проводника сопротивлением 1 Ом;  $1 \text{ См} = 1 \text{ Ом}^{-1}$ .

Закон Ома можно представить в дифференциальной форме:

$$I = \frac{1}{\rho} \frac{U}{l} S \text{ или } \frac{I}{S} = \gamma \frac{U}{l}. \text{ Тогда: } j = \gamma E.$$

Направления векторов  $j$  и  $E$  совпадают, так как носители заряда в каждой точке движутся в направлении вектора  $E$ . Следовательно, этот закон можно переписать в виде:

$$\vec{j} = \gamma \vec{E}.$$

Это закон Ома в дифференциальной форме.

## § 8. Соединения проводников.

### Закон Ома для неоднородного участка цепи.

Проводники в электрической цепи могут соединяться последовательно или параллельно.

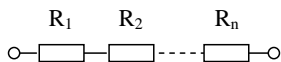


Рис.8.1.

При последовательном соединении (рис.8.1) сила тока во всех частях одинакова:  $I_1 = I_2 = \dots = I_n = \text{const}$ , а падение напряжения суммируется:  $U = U_1 + U_2 + \dots + U_n$ . Тогда:

$$R = R_1 + R_2 + \dots + R_n = \sum_{i=1}^n R_i$$

Если имеется последовательное соединение двух проводников с  $R_1$  и  $R_2$ , то для них выполняется соотношение:  $\frac{U_1}{U_2} = \frac{R_1}{R_2}$ .

При параллельном соединении проводников сила тока в неразветвленной части цепи равна сумме сил токов, текущих в разветвленных участках:

$$I = I_1 + I_2 + \dots + I_n$$

Падение напряжения в параллельно соединенных (рис.8.2) участках одинаково:  $U = U_1 = U_2 = \dots = U_n = \text{const}$ .

$$\text{Тогда } \frac{1}{R} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{R_i}.$$

Здесь  $R_i$  - сопротивление  $i$ -го проводника,  $n$  - число проводников. Если имеется параллельное соединение двух проводников с  $R_1$  и  $R_2$ , то для них выполняется соотношение:

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{R_2}{R_1}.$$

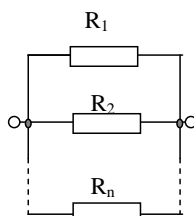


Рис. 8.2.

**Закон Ома для участка цепи, содержащей ЭДС (неоднородного участка цепи):** сила тока в цепи пропорциональна действующей в цепи

ЭДС и обратно пропорциональна сумме сопротивлений цепи и внутренне-

го сопротивления источника:

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

где  $\mathcal{E}$  – ЭДС источника,  $r$  – его внутреннее сопротивление (рис.8.3).

ЭДС источника тока численно равен *работе, которую совершают сторонние силы* (т.е. силы неэлектрической природы) при перемещении единичного положительного электрического заряда вдоль всей цепи.

Устройства, обеспечивающие возникновение и действие сторонних сил, называют **источниками тока**. В этих устройствах происходит разделение разноименных зарядов. Под действием сторонних сил электрические заряды внутри источника тока движутся в направлении, противоположном действию сил электрического поля. В результате этого на полюсах источника тока поддерживается постоянная разность потенциалов.

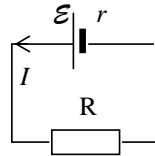


Рис.8.3

Единица ЭДС – *вольт* (В).

ЭДС, как и сила тока, – величина алгебраическая. Если ЭДС способствует движению положительных зарядов в выбранном направлении, то она считается положительной ( $\mathcal{E} > 0$ ). Если ЭДС препятствует движению положительных зарядов, то она считается отрицательной.

## § 9. Работа и мощность электрического тока. Закон Джоуля–Ленца.

При перемещении заряда вдоль электрической цепи совершается работа  $A$  кулоновскими и сторонними силами. Если электрическая цепь неподвижна, а ток, протекающий по ней, постоянен ( $I = const$ ), то совершаемая за промежутки времени  $dt$  работа равна:  $dA = U dq = IU dt$

По этой формуле можно вычислить работу, совершаемую электрическим током, независимо от того, в какой вид энергии превращается электрическая энергия. Эта работа может пойти на увеличение внутренней энергии, например, на движение проводника с током в магнитном поле и т. д. Работа, совершаемая за время  $dt$  источником тока с ЭДС  $E$ :  $dA = EI dt$ .

Единица работы электрического тока – *джоуль* (Дж).

*Мощность – это отношение работы электрического тока ко времени, за которое совершается работа:*  $N = \frac{dA}{dt} = IU$ .

Единица мощности электрического тока – *ватт* (Вт).

Необратимые преобразования электрической энергии в тепловую можно объяснить взаимодействием электронов с ионами металлического проводника. Сталкиваясь с ионами металлического проводника, электроны передают им свою энергию. Вследствие этого увеличивается интенсивность колебаний ионов около положения равновесия. А с чем большей скоростью колеблются ионы, тем выше температура проводника.

Чтобы вычислить электрическую энергию, затраченную на нагревание проводника, нужно знать падение напряжения на данном участке проводника  $U = IR$ . Подставляя в формулу для  $dA$  это выражение, получаем  $dA = Udq = I^2 Rdt$

Если проводник однородный и неподвижный, то, согласно закону сохранения энергии, вся работа тока идет на его нагревание:  $dQ = dA$ . Отсюда:  $dQ = I^2 Rdt$  или  $Q = I^2 Rt$ .

**Это закон Джоуля–Ленца: количество теплоты, которое выделяется в проводнике с током, пропорционально квадрату силы тока, времени его прохождения и сопротивлению проводника.**

Закон Джоуля–Ленца можно представить в дифференциальной форме. Для этого выделим в проводнике элементарный цилиндрический объем  $dV = Sdl$ , сопротивление которого  $R = \rho \frac{dl}{dS}$ . За промежуток времени  $dt$  в этом объеме выделится количество теплоты:

$$dQ = I^2 Rdt = I^2 \rho \frac{dl}{dS} dt = \rho \frac{dl}{dS} (\gamma dS)^2 dt = \rho j^2 dV dt$$

Используя дифференциальную форму закона Ома  $j = \gamma E$  и соотношение  $\rho = 1/\gamma$ , получаем:  $dQ = \gamma E^2 dV dt$ .

Количество теплоты, выделяющееся за единицу времени в единице объема, называют удельной **тепловой мощностью тока**:  $w = dQ/(dV dt)$ . Отсюда **закон Джоуля–Ленца в дифференциальной форме**:  $w = \gamma E^2$ .

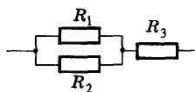
## ВОПРОСЫ

*для самопроверки и подготовки к тестированию по теме 2.*

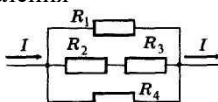
1. Что называют электрическим током?
2. Дрейф каких частиц принимается за направление тока?
3. Что называют силой тока?
4. Как называется величина, численно равная отношению заряда  $dq$ , переносимого через поперечное сечение проводника за интервал времени

dt, к этому интервалу времени?

5. Что такое электрическое сопротивление?
6. Как называется величина, обратная удельному сопротивлению?
7. Как связаны между собой электрическое сопротивление и удельное электрическое сопротивление?
8. По какой формуле может быть вычислено удельное сопротивление проводника?
9. Как называют векторную физическую величину, модуль которой равен отношению силы тока  $dI$  к площади поперечного сечения проводника  $dS$ ?
10. На рисунках изображены схема соединения проводников. Определите, как включены между собой сопротивления? Записать формулу для расчета общего сопротивления



а)



б)

11. Как записывается закон Ома для участка цепи?
12. По какой формуле вычисляется сила тока в схеме, изображенной на рис. 8.3?
13. Записать закон Ома в дифференциальной форме?
14. Каким выражением определяется работа электрического тока на участке цепи?
15. Какой формулой выражается закон Джоуля – Ленца?
16. Каким выражением определяется мощность электрического тока на участке цепи?
17. Как записывается закон Джоуля - Ленца в дифференциальном виде?

## ЗАДАЧИ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО РЕШЕНИЯ ПО ТЕМЕ 2

2.1. В течение  $\tau=20$  с сила тока равномерно возростала от 0 до 5 А. Какой заряд был перенесен?

2.2. Катушка из медной проволоки имеет сопротивление 10,8 Ом. Масса медной проволоки 3,41 кг. Какой длины и какого диаметра проволока намотана на катушке? (удельное сопротивление меди  $1,7 \cdot 10^{-8}$  Ом·м, плотность меди  $8,9 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>).

2.3. Найти падение потенциала на медном проводе длиной 500 м и диаметром 2 мм, если ток в нем 2 А.

2.4. Определить плотность тока в стальном проводнике длиной 10 см, если провод находится под напряжением 6 В. Удельное сопротивление стали

$1,2 \cdot 10^{-7}$  Ом·м.

2.5. Какие сопротивления можно получить с помощью трех резисторов сопротивлением по 2 Ом каждый?

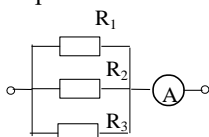


Рис.2.6.

2.6. В цепи на рисунке амперметр показывает  $I=1,5$  А. Сила тока через сопротивление  $R_1=4$  Ом равна  $I_1=0,5$  А. Сопротивления  $R_2=6$  Ом,  $R_3=3$  Ом. Определите токи  $I_2$  и  $I_3$ , протекающие через сопротивления  $R_2$  и  $R_3$ .

2.7. Найти силу тока (рис. 2.7) на участке АВ, если  $R_1=3$  Ом,  $R_2=2$  Ом,  $R_3=7,55$  Ом,  $R_4=2$  Ом,  $R_5=5$  Ом,  $R_6=10$  Ом,  $U_{AB}=100$  В.

2.8. Батарейка для карманного фонаря замкнута на реостат. При сопротивлении реостата 1,65 Ом напряжение на нем равно 3,3 В, а при сопротивлении 3,5 Ом напряжение 3,5 В. Найдите ЭДС и внутреннее сопротивление батарейки.

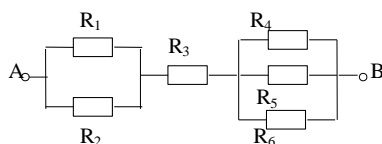


Рис. 2.7.

2.9. Имеются две лампы на напряжение 220 В, одна из которых рассчитана на мощность 60 Вт, другая – на 100 Вт. Сопротивление какой лампы больше и во сколько раз?

2.10. Как изменится количество теплоты, выделяемое электрической плиткой, если ее спираль укоротить вдвое?

2.11. Элемент с внутренним сопротивлением 4 Ом и ЭДС 12 В замкнут проводником с сопротивлением 8 Ом. Какое количество теплоты будет выделяться во внешней части цепи за 1 с?

### ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО ИЗУЧЕНИЯ ПО ТЕМЕ 2

1. Атмосферные токи, токи Земли.
2. Электропроводность твердых тел.
3. Термоэлектронная эмиссия.
4. Контактные явления.
5. Зонная теория твердых тел.
6. Полупроводники. Электронная и дырочная проводимости, p-n переход. Диод, транзистор, интегральная схема.
7. Токи в газах. Ионизация газов. Газоразрядная плазма. Газовая плазма Земли.
8. Токи в электролитах. Закон Фарадея. Химические источники тока.
9. Электрическая проводимость биологических жидкостей и тканей.
10. Электрический разряд в газах и аэроионотерапия.



### Тема 3. МАГНИТНОЕ ПОЛЕ. ЭЛЕКТРОМАГНЕТИЗМ

#### § 10. Магнитное поле в вакууме.

#### Магнитный момент контура с током. Магнитная индукция

Опыт показывает, что электрические токи взаимодействуют между собой, например, токи, текущие в одном направлении, притягиваются, а токи противоположных направлений отталкиваются. Взаимодействие токов осуществляется через поле, которое называется магнитным. Следовательно, движущиеся заряды (токи) изменяют свойства окружающего их пространства - создают в нем магнитное поле. Это поле проявляется в том, что на движущиеся в нем заряды (токи) действуют силы. Подобно тому, как для исследования электрического поля мы использовали пробный заряд, применим для исследования магнитного поля пробный ток, циркулирующий в плоском замкнутом контуре очень малых размеров (своим магнитным полем не искажают исследуемое поле). Будем называть такой контур *пробным контуром*. Ориентацию его в пространстве характеризует направление нормали  $\vec{n}$  к контуру, восстанавливаемой по правилу правого буравчика: вращаем рукоятку правого буравчика по направлению тока в контуре, тогда направление его поступательного движения даст направление нормали  $\vec{n}$  (рис.10.1). Помещая пробный контур в магнитное поле, обнаружим, что поле стремится повернуть контур (нормаль) в определенном направлении (рис.10.2).

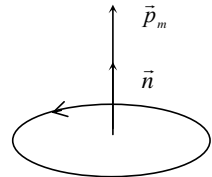


Рис. 10.1.

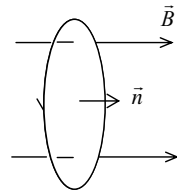


Рис.10.2.

Вращающий момент, действующий на контур, зависит как от свойств магнитного поля в данной точке, так и от свойств контура. Оказывается, что максимальная величина вращающего момента пропорциональна  $IS$ , т.е.  $M^{\text{магн}} \sim IS$ , где  $I$  - ток контуре,  $S$  - площадь контура с током. Векторную величину  $\vec{p}_m = IS\vec{n}$  называют магнитным моментом контура, который в СИ измеряется в  $\text{А} \cdot \text{м}^2$ .

На контур с током, помещенный в магнитное поле с индукцией  $\vec{B}$ , действует вращающий момент  $\vec{M} = \vec{p}_m \times \vec{B}$ . Величина его

$M = p_m B \sin \alpha$ . При  $\alpha = \pi/2$  имеем  $M = M^{\text{магн}} = p_m B$ , при  $\alpha = 0$  или  $\alpha = \pi$   $M = 0$ .

На пробные контуры с разными  $p_m$ , помещаемыми в данную точку магнитного поля, будут действовать разные по величине максимальные вращающие моменты  $M^{\text{макс}}$ , но отношение  $M^{\text{макс}}/p_m$  будет для всех контуров одинаково, оно будет являться силовой характеристикой магнитного поля, которая называется магнитной индукцией  $\vec{B} = \vec{M}_{\text{макс}} / p_m$ .

Магнитная индукция есть вектор, направление которого совпадает с направлением нормали контура с током, свободно установившегося во внешнем магнитном поле.

Магнитная индукция в СИ измеряется в теслах:  $1\text{Тл} = 1\text{Н м/А}\cdot\text{м}^2$ . Тесла равен магнитной индукции однородного поля, в котором на плоский контур с током, который имеет магнитный момент  $1\text{ А}\cdot\text{м}^2$ , действует максимальный вращающий момент, равный  $1\text{ Н м}$ .

Подобно тому, как электрические поля графически изображают с помощью линий напряженности (силовых линий), магнитные поля изображают с помощью линий магнитной индукции (силовых линий). *Линии магнитной индукции – линии, касательные к которым в данной точке совпадают по направлению с вектором В в этой точке. Направление линий магнитной индукции связано с направлением тока в проводнике. Направление силовых линий магнитного поля, создаваемого проводником с током, определяется по правилу правого винта (буравчика): если правого винтовой буравчик ввинчивать по направлению тока, то направление вращения рукоятки буравчика будет совпадать с направлением линий магнитной индукции.*

*Линии магнитной индукции всегда замкнуты и охватывают проводники с токами.* Это отличает их от линий напряженности электрического поля. Замкнутость (вихревой характер) линий магнитной индукции говорит о том, что в природе не существует магнитных зарядов, на которых бы они начинались или кончались.

*Магнитное поле называют однородным, если векторы магнитной индукции во всех его точках одинаковы:  $\vec{B} = \text{const}$ .* Примером однородного магнитного поля может служить поле внутри соленоида, т.е. катушки, длина которой много больше ее диаметра. *Линии магнитной индукции однородного поля параллельны, и их густота везде одинакова.*

## § 11. Закон Ампера. Работа в магнитном поле.

Одним из проявлений магнитного поля является его силовое воздействие на проводник с током, помещенный в магнитное поле. Ампером было установлено, что на проводник с током, помещенный в однородное магнитное поле, индукция которого В, действует сила, пропорциональная силе тока и индукции

магнитного поля:  $dF = B I dl \sin \alpha$ ,

где  $\alpha$  – угол между векторами  $\vec{B}$  и  $d\vec{l}$ . Или в векторной форме:

$$d\vec{F} = I[d\vec{l} \times \vec{B}],$$

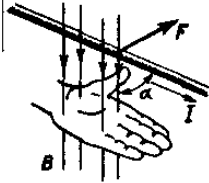


Рис.11.1

где  $dl$  – малый участок проводника, имеющий направление, совпадающее с направлением тока]. Произведение  $I dl$  называют *элементом тока*. В случае прямолинейного проводника длиной  $l$ :

$$\vec{F} = I[\vec{l} \times \vec{B}].$$

Если  $l \perp B$ , то  $F = I B l$ .

Для определения направления силы пользуются *правилом левой руки*: линии магнитной индукции входят в ладонь, четыре пальца совпадают с направлением тока, отогнутый большой палец укажет направление действия силы (рис.11.1).

Так как на проводник с током в магнитном поле действует сила Ампера, то под ее действием магнитным полем совершается *работа по перемещению проводника с током*. Для определения этой работы рассмотрим проводник длиной  $l$  с током  $I$ , помещенный в однородное магнитное поле, перпендикулярное плоскости контура (рис. 11.2). Под действием силы Ампера  $F = F_A = I B l$  проводник переместится параллельно самому себе на расстояние  $dx$ . Работа, совершаемая магнитным полем, равна  $dA = F dx$ :

$$dA = F dx = I B l dx = I B dS \quad (\text{т.к. } l dx = dS).$$

У нас направление поля  $B$  перпендикулярно площадке  $dS$ . В общем случае берем составляющую  $B_n$ :  $dA = I B_n dS$

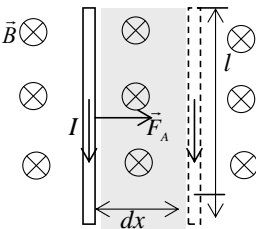


Рис. 11.2

Введем понятие потока вектора магнитной индукции (*магнитный поток*):

$$\Phi = B S \cos \alpha,$$

где  $\alpha$  – угол между вектором нормали к поверхности и вектором магнитной индукции, или  $\Phi = B_n S$ . В случае неоднородного поля рассматривают магнитный поток через элементарную площадку:  $d\Phi = B_n dS$ , затем суммируют по всей площади  $S$ :

$$\Phi = \int_S B_n dS.$$

$[\Phi] = \text{Вб (вебер)}$ .

Тогда работа по перемещению проводника с током в магнитном по-

$$\text{ле: } dA = IB_n dS = Id\Phi \Rightarrow A = \int_{\Phi_1}^{\Phi_2} Id\Phi = I\Delta\Phi$$

где  $\Delta\Phi = \Phi_2 - \Phi_1$  – изменение магнитного потока.

## §12. Действие магнитного поля на движущиеся заряды. Сила Лоренца.

Движущиеся электрические заряды создают вокруг себя магнитное поле, которое распространяется в вакууме со скоростью света. При движении заряда во внешнем магнитном поле возникает силовое взаимодействие магнитных полей, определяемое по закону Ампера. Процесс взаимодействия магнитных полей исследовался Лоренцем, который вывел формулу для расчета силы, действующей со стороны магнитного поля на движущуюся заряженную частицу.

Силу, действующую со стороны магнитного поля на движущийся заряд, можно найти исходя из закона Ампера. Пусть по проводнику длиной  $dl$  за промежуток времени  $dt$  проходит  $n$  одинаковых зарядов величиной  $dq$ , т.е. через проводник протекает ток, сила которого:  $I = \frac{ndq}{dt}$ . Согласно закону Ампера, на  $n dq$  зарядов будет действовать сила  $dF = BIdl \sin \alpha = B \frac{ndq}{dt} dl \sin \alpha$ .

Сила, с которой поле действует на каждый заряд, равна:

$$F_{\text{л}} = \frac{dF}{n} = Bq \frac{dl}{dt} \sin \alpha ,$$

где  $\frac{dl}{dt} = v$  – скорость движения заряда,  $\alpha$  – угол между вектором скорости заряда и вектором магнитной индукции. Сила, действующая со стороны магнитного поля на движущийся заряд, равна

$$F_{\text{л}} = qvB \sin \alpha$$

и называется *силой Лоренца*. Эта сила перпендикулярна векторам  $\vec{v}$  и  $\vec{B}$ . Направление силы Лоренца, действующей на положительный заряд, определяется по правилу левой руки. С изменением знака заряда направление силы изменяется на противоположное.

В векторном виде сила Лоренца записывается:

$$\vec{F}_{\text{л}} = q[\vec{v} \vec{B}]$$

Анализируя полученное выражение, можно сделать выводы:

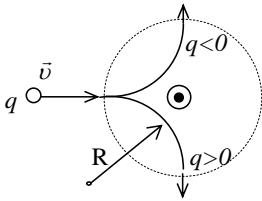


Рис. 12.1

- если скорость заряда  $v = 0$ , то  $F_L = 0$ , т. е. магнитное поле *не действует на неподвижную* заряженную частицу;
- если  $\alpha = 0$ ,  $\sin \alpha = 0$ , то  $F_L = 0$ , т. е. если частица движется так, что *вектор скорости  $\vec{v}$  параллелен вектору магнитной индукции  $\vec{B}$* , то со стороны магнитного поля сила *не действует*.

Так как сила Лоренца всегда направлена перпендикулярно вектору скорости летящей частицы, то она не изменяет величину скорости, а *изменяет лишь направление движения* частиц. Если заряженная частица движется в однородном магнитном поле, вектор индукции которого перпендикулярен направлению скорости заряженной частицы, то сила Лоренца искривляет траекторию движения, выполняя роль центростремительной силы. Действие этой силы не приводит к изменению энергии заряженной частицы, т.е. эта сила не совершает работы.

Попадание летящей частицы в магнитное поле вызывает изменение ее траектории в зависимости от знака заряда (рис. 12.1). На рис. вектор индукции магнитного поля направлен перпендикулярно плоскости чертежа (на нас). Частица будет двигаться по окружности, радиус  $R$  которой можно определить из равенства центростремительной силы и силы Лоренца:

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

Если частица движется под углом  $\beta$  к линиям  $B$ , то траектория движения частицы будет винтовой линией (спиралью) (рис.12.2). Шаг  $h$  спирали определяется  $v_t$  – тангенциальной составляющей скорости  $v$  частицы. Радиус спирали зависит от  $v_n$  – нормальной составляющей скорости  $v$ .

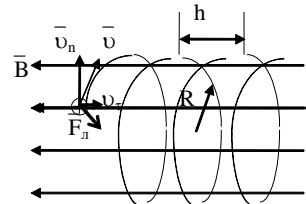


Рис.12.2

Когда электрический заряд движется одновременно в электрическом и магнитном полях, то результирующая сила, действующая на частицу, равна:  $\vec{F} = q[\vec{v}\vec{B}] + q\vec{E}$ .

В этом случае сила имеет две составляющие: от воздействия магнитного и электрического полей. Между этими составляющими имеется принципиальная разница. Электрическое поле изменяет величину скорости, а следовательно, и кинетическую энергию частицы, однородное маг-

нитное поле изменяет только направление ее движения.

### § 13. Магнитное поле в веществе.

#### Диа-, пара- и ферромагнетики.

Магнитными свойствами обладают все вещества, поэтому термин «магнетики» применим ко всем без исключения материалам. Посмотрим, как магнитное поле действует на движущиеся заряды (электроны) в молекулах и атомах вещества.

Электрон, вращающийся вокруг ядра атома по замкнутой орбите, представляет собой ток, направление которого противоположно движению электрона (рис.34).

Поскольку это движение аналогично круговому току, возникает магнитное поле и движение электрона можно охарактеризовать орбитальным магнитным моментом  $\vec{p}_m = I\vec{S}$ .

Вектор орбитального магнитного момента  $P_m$  атома равен векторной сумме орбитальных моментов  $\vec{p}_{mi}$  отдельных электронов, входящих в атом

$$\vec{P}_m = \sum_{i=1}^Z \vec{p}_{mi}, \text{ где } Z - \text{ порядковый номер элемента в таблице Менделеева.}$$

Независимо от орбитального движения электроны являются источниками магнитного поля, так как они «вращаются вокруг собственной оси», т. е. обладают собственным моментом импульса (*спином*).

Таким образом, магнетизм атомов обусловлен двумя причинами: *движением электронов по орбитам вокруг ядра и собственным моментом импульса* (рис.13.1). Кроме того, ядро атома обладает собственным магнитным моментом.

При внесении магнетика во внешнее магнитное поле происходит изменение его свойств, т.е. магнетик намагничивается. Намагниченный магнетик создает собственное магнитное поле с индукцией  $B'$ , которое складывается с внешним магнитным полем, индукция которого  $B_0$ . Вектор магнитной индукции  $B$  в магнетике определяется по принципу суперпозиции:  $\vec{B} = \vec{B}_0 + \vec{B}'$ .

Индукция  $\vec{B}'$  собственного магнитного поля зависит как от  $\vec{B}_0$ , так и от магнитной восприимчивости  $\chi$  вещества:  $\vec{B}' = \chi \vec{B}_0$ . Тогда

$$\vec{B} = \vec{B}_0 + \chi \vec{B}_0 = \vec{B}_0(1 + \chi). \quad (13.1)$$

Магнитная индукция поля внутри магнетика зависит от магнитной проницаемости вещества:

$$\vec{B} = \mu \vec{B}_0. \quad (13.2)$$

Из сопоставления формул (13.1) и (13.2) следует, что  $\mu = 1 + \chi$ .

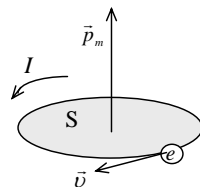


Рис.13.1.

При наложении внешнего магнитного поля происходит упорядочение направлений векторов магнитных моментов  $p_m$  отдельных атомов или молекул магнетика, в результате чего макроскопический объем приобретает определенный суммарный магнитный момент. Магнитные свойства магнетика характеризуются *вектором намагниченности*  $\vec{J}$  – величиной, равной отношению магнитного момента тела к его объему: 
$$\vec{J} = \frac{1}{V} \sum_{i=1}^n \vec{P}_{mi}$$

где  $n$  – число атомов или молекул, входящих в объем.

Различают *диамагнетики* ( $\mu < 1$ ), *парамагнетики* ( $\mu > 1$ ) и *ферромагнетики* ( $\mu \gg 1$ ).

**Диамагнетики.** У большинства атомов диамагнетиков нет собственного магнитного момента, его магнитный момент индуцирован внешним полем. Во внешнем поле атомы приобретают магнитные моменты, направленные противоположно внешнему полю ( $\mu < 1$ ). Диамагнетиками являются вода, мрамор, некоторые металлы, например золото, ртуть, медь, инертные газы.

**Парамагнетики.** Молекулы парамагнетиков имеют отличные от нуля собственные магнитные моменты. В отсутствие магнитного поля эти моменты расположены хаотически, поэтому вектор намагниченности  $\vec{J}$  равен нулю. При внесении парамагнетика в магнитное поле магнитные моменты отдельных атомов или молекул ориентируются вдоль линий  $B$ , так что собственное поле парамагнетика усиливает внешнее магнитное поле. Если такой эффект существует, то он играет значительную роль и всегда преобладает над диамагнетизмом ( $\mu > 1$ ). Парамагнетиками являются щелочные металлы, кислород, алюминий, платина, оксиды марганца, азота.

**Ферромагнетики.** Предельным случаем парамагнетизма является ферромагнетизм. В соответствии с квантовой теорией в некоторых веществах возникают области, имеющие значительные магнитные моменты. Эти области получили название *доменов*. В отсутствие поля распределение направлений магнитных моментов доменов имеет случайный характер. У ферромагнетиков  $\mu$  зависит от внешнего магнитного поля, т. е. между  $B$  и  $H$ , связанных между собой соотношением  $\vec{B} = \mu\mu_0\vec{H}$ , существует нелинейная зависимость. Зависимость  $B$  от  $H$  для ферромагнетиков можно изобразить кривой, называемой «петля гистерезиса» (рис. 13.2).

$B_r$  – остаточная индукция (индукция при  $H=0$ ). Напряженность магнитного поля, при

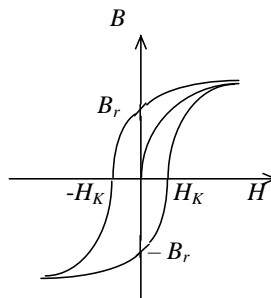


Рис. 13.2.

которой  $B=0$ , называют *задерживающей* или *коэрцитивной силой*  $H_K$ . В зависимости от значения коэрцитивной силы ферромагнетики делят на мягкие и жесткие.

*Мягкие ферромагнетики* имеют узкую петлю гистерезиса и малые значения коэрцитивной силы. Для *жестких ферромагнетиков* характерны широкая петля гистерезиса и соответственно большие значения коэрцитивной силы. К мягким ферромагнетикам относят железо, пермаллой и другие материалы. Из мягких ферромагнетиков изготавливают сердечники трансформаторов, генераторов, электродвигателей. Из жестких ферромагнетиков, к которым относятся сталь и ее сплавы, изготавливают постоянные магниты.

*При возрастании температуры намагниченность ферромагнетиков уменьшается, они теряют свои ферромагнитные свойства и превращаются в парамагнитные вещества.*

Для каждого ферромагнитного материала есть своя температура перехода, называемая *точкой Кюри*  $T_K$ , так, например, для Fe  $T_K = 1043$  К, для Ni  $T_K = 631$  К.

#### § 14. Явление электромагнитной индукции. Энергия магнитного поля.

Как сказано выше, магнитное поле порождается движущимися электрическими зарядами. В 1831 г. *М.Фарадей* обнаружил, что между электрическими и магнитными полями существует еще более глубокая связь. Им экспериментально было обнаружено, что *при изменении магнитного потока, пронизывающего какой-либо замкнутый контур, в нем возникает электрический ток*. Этот ток называется индукционным, а само явление было названо *электромагнитной индукцией*. Итак, не только меняющееся электрическое поле вызывает появление магнитного, но и изменение магнитного поля приводит к появлению электрического поля. Фарадей показал, что *величина индуцируемой в контуре ЭДС прямо пропорциональна скорости изменения магнитного потока, пронизывающего контур*:

$$\mathcal{E}_i = - \frac{d\Phi}{dt},$$

где  $\Phi = B S \cos \alpha$  – магнитный поток. Это закон электромагнитной индукции Фарадея.

Используя закон Ома для полной цепи и закон Фарадея, получаем выражение для индукционного тока:  $I = \frac{\mathcal{E}_i}{R} = - \frac{1}{R} \frac{d\Phi}{dt}$

Из данного уравнения следует, что *индукционный ток зависит от со-*



противления контура. Знак минус в формуле закона Фарадея обусловлен *правилом Ленца*, которое гласит, что индуцируемый ток имеет такое направление, при котором возникающее магнитное поле препятствует изменению магнитного поля, вызвавшего индуцируемый ток. Т.е. индукционный ток всегда направлен так, что его действие противоположно действию причины, вызывающей ток. При возрастании магнитного потока  $\frac{d\Phi}{dt} > 0$  получаем, что:  $\mathcal{E}_i < 0$ ,  $I < 0$ ; при уменьшении магнитного потока

имеем:  $\frac{d\Phi}{dt} < 0 \Rightarrow \mathcal{E}_i > 0$ ,  $I > 0$ .

Если замкнутый контур содержит  $N$  последовательно соединенных витков (например, катушка или соленоид), то ЭДС индукции равна сумме ЭДС каждого витка:

$$\mathcal{E}_i = -N \frac{d\Phi}{dt} = -\frac{d\Psi}{dt},$$

где  $d\Psi = N d\Phi$  – потокосцепление, т.е. суммарный магнитный поток сквозь  $N$  витков.

Для возникновения индукционного тока безразлична причина и способ изменения магнитного потока через контур. Расположим вблизи друг от друга два контура (рис. 14.1), в одном из которых течет изменяющийся ток  $I_1$ . Возникающий при этом изменяющийся магнитный поток будет пронизывать контур 2, и в нем возникнет индукционный ток  $I_2$ . Это явление называется *взаимной индукцией*.

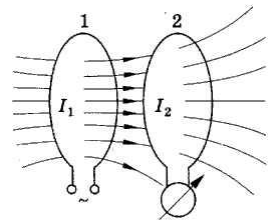


Рис.14.1.

Если в контуре 1 будет изменяться ток, то собственный изменяющийся магнитный поток будет пронизывать и сам этот контур, т.е., и в контуре 1 будет индуцироваться ЭДС. Это явление называется *самоиндукцией*. Магнитный поток, сцепленный с контуром 1, всегда пропорционален силе тока в нем:  $\Phi = L I_1$ . Коэффициент пропорциональности  $L$  называется *индуктивностью контура*. Индуктивность – одна из основных характеристик цепи переменного тока. Подставляя  $\Phi = L I_1$  в формулу закона Фарадея, получаем:

$$\mathcal{E}_{si} = -L \frac{dI}{dt}.$$

В системе СИ единицей индуктивности  $L$  служит *генри* (Гн). Из последнего выражения видно, что индуктивностью в 1 Гн будет обладать такой контур, при изменении тока в котором со скоростью 1 А/с индуцирует

ся ЭДС в 1 В.

Если контур представляет собой соленоид, содержащий  $N$  витков, то  $\mathcal{E}_{si} = -\frac{d\Psi}{dt} = -LN \frac{dI}{dt}$ . В результате самоиндукции при замыкании цепи сила тока в соленоиде никогда сразу не достигает максимального значения, а нарастает постепенно. При размыкании цепи возникает индукционный ток, идущий в том же направлении, что и основной, и проявляющийся в виде искры на контактах рубильника.

Индуктивность  $L$  зависит от формы и размеров соленоида, а также от магнитных свойств окружающей среды. Если размеры, форма соленоида и магнитные свойства окружающей среды не изменяются, то  $L = \text{const}$ .

*Индуктивность соленоида:*  $L = \mu\mu_0 n^2 V$  или  $L = \mu\mu_0 n^2 l S$ .

Если в контуре с индуктивностью  $L$  течет ток  $I$ , то в момент размыкания цепи возникает индукционный ток и им совершается работа. Эта работа совершается за счет энергии исчезнувшего при размыкании цепи магнитного поля. На основании закона сохранения и превращения энергии энергия магнитного поля превращается главным образом в энергию электрического поля, за счет которой происходит нагревание проводников. Работа может быть определена из соотношения

$dA = \mathcal{E}_{si} I dt = -L \frac{dI}{dt} dt = -LI dI$ . Уменьшение энергии магнитного поля равно работе тока, поэтому:

$$W_M = \int_I^0 dA = -\int_I^0 IdI = \frac{LI^2}{2}.$$

Эта формула справедлива для любого контура и показывает, что энергия магнитного поля зависит от индуктивности контура и силы тока, протекающего по нему.

## §15. Электромагнитные колебания и волны.

Для возбуждения электромагнитных колебаний служат системы, называемые *колебательным контуром*, состоящие из параллельно соединенных между собой индуктивности  $L$  и емкости  $C$ . Рассмотрим идеальный контур, т.е. контур, сопротивление которого равно нулю ( $R = 0$ ). Чтобы возбудить колебания в этом контуре, необходимо либо сообщить обкладкам конденсатора некоторый заряд, либо возбудить в катушке индуктивности ток. Пусть в начальный момент времени конденсатор заряжен до разности потенциалов  $U_0$  (рис.15.1,

а); следовательно, он обладает потенциальной энергией  $W_E = \frac{CU_0^2}{2}$ .

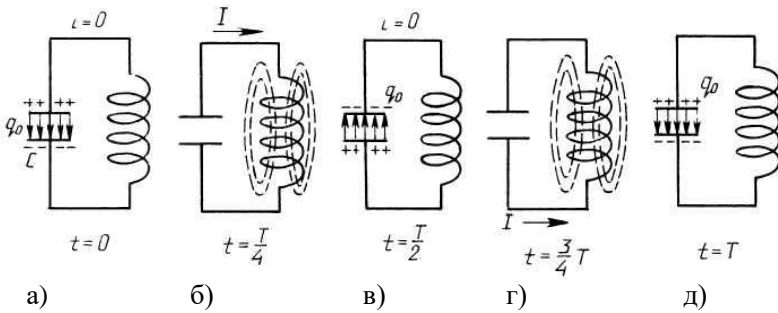


Рис.15.1

В этот момент времени ток в катушке  $I=0$ . В идеальном контуре через четверть периода вся энергия электрического поля переходит в энергию магнитного поля  $W_M = \frac{LI^2}{2}$  (рис., б). В этом случае напряжение между обкладками конденсатора равно нулю:  $U = 0$ , а через катушку протекает максимальный ток  $I_0$  (рис. б). Состояния системы, изображенные на рис., соответствуют последовательным моментам времени  $T=0, T/4, T/2, 3T/4$  и  $T$ .

*Гармонические колебания заряда, тока и напряжения в контуре описываются уравнениями:  $q = q_0 \cos \omega_0 t$ ,  $I = I_0 \cos(\omega_0 t + \varphi)$ ,  $U = U_0 \cos \omega_0 t$ .*

Частота колебаний контура определяется формулой:  $\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{LC}}$ , а

период  $T_0 = \frac{2\pi}{\omega_0} = 2\pi\sqrt{LC}$  – формула Томсона.

Энергия контура:  $W = W_E + W_M = \frac{q^2}{2C} + \frac{LI^2}{2}$ . Подставив выражения

для заряда и тока, получим что  $W_E = \frac{q_0^2}{2C} \cos^2(\omega t + \varphi_0)$ ,

$W_M = \frac{LI_0^2}{2} \sin^2(\omega t + \varphi_0)$ . Полная энергия контура определяется по формулам  $W = \frac{LI_0^2}{2}$  и  $W = \frac{CU_0^2}{2}$ . Таким образом,  $\frac{LI_0^2}{2} = \frac{CU_0^2}{2}$ .

Ток достигает максимального значения в те моменты времени, когда заряд (напряжение) на обкладках конденсатора равен нулю, и наоборот. Энергии электрического и магнитного полей изменяются со временем, причем, когда энергия электрического поля максимальна, энергия электрического поля обращается в нуль, и наоборот. Полная энергия системы в каждый

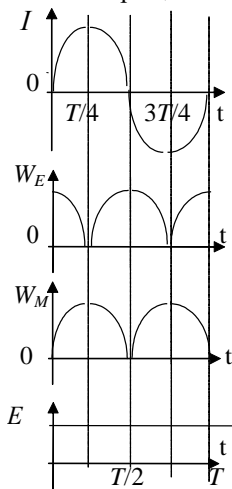


Рис.15.2.

момент времени остается величиной постоянной. Период колебания энергий электрического и магнитного полей вдвое меньше периода колебания  $T$  системы. Постоянство полной энергии в рассматриваемом случае обусловлено пренебрежением потерями энергии на совершение работы против сил сопротивления. Если  $R \neq 0$ , то колебания в контуре будут затухать. Для восполнения этих потерь необходим источник питания.

Открыв явление электромагнитной индукции, Фарадей показал, что переменное магнитное поле приводит к появлению вихревого электрического поля. Анализируя связь между величинами электрического и магнитного полей и обобщая результаты опытов Эрстеда и Фарадея, Максвелл предположил, что переменное электрическое поле может, в свою очередь, породить переменное магнитное поле в соседних областях пространства. Переменные электрические

и магнитные поля не могут существовать раздельно друг от друга, так как в пространстве, где существует переменное магнитное поле, возбуждается переменное электрическое поле, и наоборот. Максвелл создал теорию **электромагнитного поля**. Электромагнитное поле – один из видов материи, характеризуемый наличием электрического и магнитного полей, связанных непрерывным взаимным превращением.

Распространение в пространстве магнитного и электрического полей, меняющихся во времени, называют **электромагнитными волнами**. Максвелл математически доказал, что они должны распространяться с конечной скоростью, равной в вакууме  $c = 1/\sqrt{\epsilon_0 \mu_0} = 300000$  км/с, что совпало со значением для скорости света. Опыты Г. Герца и изобретение радио А.С. Поповым подтвердили теоретическое предсказание Максвелла. Длина волны электромагнитных волн  $\lambda = cT = c/\nu$ .

Согласно теории Максвелла, электромагнитные волны излучаются при любом движении с ускорением заряженных частиц, при этом в окружающей среде распространяются колебания напряженности электрического поля  $\vec{E}$  и индукции магнитного поля  $\vec{B}$ . Направления векторов  $\vec{B}$

и  $\vec{E}$  при распространении волны перпендикулярны друг другу и перпендикулярны направлению, в котором распространяется волна. Электромагнитная волна обладает следующими свойствами: распространяется прямолинейно, способна преломляться, отражаться, ей присущи свойства интерференции, дифракции, интерференции, поляризации. Источникам электромагнитных волн являются ускоренно движущиеся заряды или изменяющиеся во времени электрические токи.

## ВОПРОСЫ

*для самопроверки и подготовки к тестированию по теме 3.*

1. Чем создается магнитное поле?
2. По какому правилу определяют направление линий магнитного поля, создаваемого проводником с током?
3. Что служит силовой характеристикой магнитного поля?
4. Чем силовые линии магнитного поля отличаются от силовых линий электрического поля?
5. Электрический ток в прямолинейном проводнике направлен перпендикулярно плоскости рисунка и входит в него (рис.5). Какое расположение и направление имеют линии магнитной индукции?

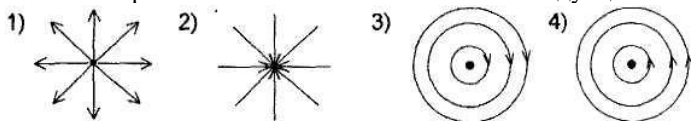


Рис. 5.

6. Магнитное поле создано двумя параллельными одинаковыми по силе ( $I_1=I_2$ ) прямолинейными токами, но текущими как показано на рис. 4 (а-г). Как направлен вектор магнитной индукции в точке А в каждом из случаев?

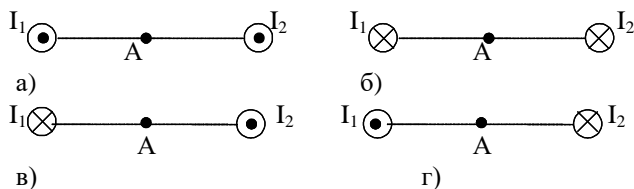


Рис. 6.

7. Направление действия силы Ампера определяется по правилу
8. Какое выражение характеризует силу действия магнитного поля на проводник с током?
9. По какой формуле определяется магнитный поток, пронизывающий контур площадью  $S$ ?

10. Какое выражение характеризует силу действия магнитного поля на движущийся заряд?
11. Что называют силой Лоренца?
12. Какова траектория заряженной частицы, влетающей в магнитное поле перпендикулярно к силовым линиям?
13. Какова траектория заряженной частицы, влетающей в магнитное поле под углом к силовым линиям?
14. Чем обусловлен магнетизм атомов?
15. Как направлены магнитные моменты атомов диамагнетиков, внесенных во внешнее магнитное поле?
16. Как направлены магнитные моменты атомов парамагнетиков, внесенных во внешнее магнитное поле?
17. Чему равна магнитная проницаемость для диа-, пара- и ферромагнетиков?
18. Какое явление называется электромагнитной индукцией?
19. Как называется явление возникновения электрического тока в катушке с замкнутыми выводами при любом изменении магнитного потока через нее?
20. По какому правилу определяют направление индукционного тока?
21. Что порождает меняющееся со временем магнитное поле?
22. Какой формулой выражается закон электромагнитной индукции?
23. Как определяется ЭДС индукции в замкнутом контуре из одного витка?
24. По какой формуле определяется ЭДС самоиндукции?
25. От чего зависит индуктивность катушки?
26. По какой формуле вычисляется энергия магнитного поля?
27. Каковы единицы измерения магнитной индукции, силы Ампера, силы Лоренца, потока магнитной индукции, ЭДС индукции, индуктивности?
28. По какой формуле определяется период колебаний контура?
29. Что такое электромагнитная волна?
30. Как направлены вектора  $\vec{B}$  и  $\vec{E}$  электромагнитной волны по отношению к направлению распространения?

### ЗАДАЧИ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО РЕШЕНИЯ ПО ТЕМЕ 3

- 3.1. Найти индукцию магнитного поля в точке, отстоящей на расстоянии 2 м от бесконечно длинного провода, по которому течет ток 5 А.
- 3.2. На рис. изображены сечения двух прямолинейных бесконечно длинных про-

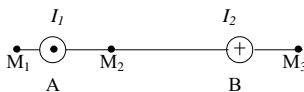


Рис. 3.2.

водников с токами. Расстояние между токами  $AB=10\text{см}$ , токи  $I_1=20\text{ А}$ ,  $I_2=30\text{ А}$ . Найти индукции магнитного поля, вызванного токами  $I_1$  и  $I_2$  в точках  $M_1$ ,  $M_2$  и  $M_3$ . Расстояния  $M_1A=2\text{ см}$ ,  $AM_2=4\text{ см}$  и  $BM_3=3\text{ см}$ .

3.3. Решить предыдущую задачу при условии, что токи текут в одном направлении.

3.4. Определить модуль силы, действующей на проводник длиной  $20\text{ м}$  при силе тока  $10\text{ А}$  в магнитном поле с индукцией  $0,13\text{ Тл}$ , если угол  $\alpha$  между вектором магнитной индукции и проводником равен а)  $90^\circ$ ; б)  $30^\circ$ .

3.5. Прямой провод, по которому течет ток  $1\text{ кА}$ , расположен в однородном магнитном поле перпендикулярно линиям индукции. С какой силой действует поле на отрезок провода длиной  $1\text{ м}$ , если магнитная индукция равна  $1\text{ Тл}$ ?

3.6. На проводник длиной  $50\text{ см}$ , находящийся в однородном магнитном поле с магнитной индукцией  $0,1\text{ Тл}$ , действует сила  $0,05\text{ Н}$ . Найти угол между направлением силы тока и вектором магнитной индукции, если сила тока равна  $2\text{ А}$ .

3.7. Прямой провод длиной  $10\text{ см}$ , по которому течет ток  $10\text{ А}$ , находится в однородном магнитном поле с индукцией  $0,01\text{ Тл}$ . Найти угол между направлением вектора  $B$  и тока, если на провод действует сила  $10\text{ мН}$ .

3.8. В магнитном поле с индукцией  $0,1\text{ Тл}$  расположен стержень длиной  $1\text{ м}$ , который движется перпендикулярно к направлению линий магнитной индукции со скоростью  $5\text{ см/с}$ . Определить поток магнитной индукции сквозь поверхность, которую образует стержень перемещении за  $1\text{ секунду}$ .

3.9. Электрон влетает в однородное магнитное поле с индукцией  $2\text{ Тл}$  со скоростью  $10^5\text{ м/с}$  перпендикулярно линиям магнитной индукции. Вычислите силу, действующую на электрон.

Таблица 1.

	масса, кг	заряд, Кл
электрон	$9 \cdot 10^{-31}$	$-1,6 \cdot 10^{-19}$
протон	$1,67 \cdot 10^{-27}$	$+1,6 \cdot 10^{-19}$

3.10. Траектория пучка электронов, движущихся в вакууме в магнитном поле с индукцией  $B=7 \cdot 10^{-3}\text{ Тл}$ , – дуга окружности с радиусом  $R=3\text{ см}$ . Определить скорость и энергию электронов.

3.11. Протон и электрон, двигаясь с одинаковой скоростью, влетают в однородное магнитное поле. Во сколько раз радиус кривизны траектории протона больше радиуса кривизны траектории электрона?

3.12. Какой величины ЭДС индукции возбуждается в контуре, если в нем за  $0,1\text{ секунды}$  магнитный поток равномерно изменяется на  $0,05\text{ Вб}$ ?

3.13. За какой промежуток времени магнитный поток изменится на 0,04 Вб, если в контуре возбуждается ЭДС индукции 16 В?

3.14. Соленоид содержит 100 витков проволоки. Найти ЭДС индукции, если в этом соленоиде за 5 мс магнитный поток равномерно изменился от 3 мВб до 1,5 мВб.

3.15. Какая ЭДС самоиндукции возникает в катушке с индуктивностью 68 мГн, если ток 3,8 А исчезает в ней за 0,12 с?

3.16. Определить индуктивность катушки, в которой при изменении силы тока от 5 до 10 А за 0,1 с возникает ЭДС самоиндукции 10 В.

3.17. Магнитное поле катушки с индуктивностью 95 мГн обладает энергией 0,19 Дж. Чему равна сила тока в катушке?

3.18. Какой должна быть сила тока в обмотке дросселя индуктивностью 2 Гн, чтобы энергия поля оказалась равной 9 Дж?

3.19. Индуктивность и емкость колебательного контура соответственно равны 70 Гн и 70 мкФ. Определить период колебаний в контуре.

3.20. Индуктивность катушки колебательного контура 0,5 мГн. Требуется настроить этот контур на частоту 1 МГц. Какова должна быть емкость конденсатора?

3.21. Частота электромагнитных колебаний, создаваемых передатчиком радиостанции, равна 6 МГц. Какова длина электромагнитных волн, излучаемых радиостанцией.

### **ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО ИЗУЧЕНИЯ ПО ТЕМЕ 3**

1. Закон полного тока
2. *Магнитные свойства тканей организма.*
3. *Физические основы магнитобиологии.*
4. *Физические процессы в тканях при воздействии током и электромагнитными полями.*
5. Переменный ток.
6. Вихревое электрическое поле.
7. Вихревые токи. Ток смещения.
8. Трансформатор
9. Уравнения Максвелла.
10. Роль колебаний в биологии.
11. Электромагнитные волны.
12. *Шкала электромагнитных излучений, классификация частотных интервалов.*



## Тема 4. ЭЛЕМЕНТЫ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ И ВОЛНОВОЙ ОПТИКИ

*Оптика*, или точнее – *физическая оптика*, это раздел физики, изучающий свойства и физическую природу света, а также его взаимодействие с веществом. При этом под светом понимают электромагнитные волны, длина которых лежит в интервале  $10^{-4}$ – $10^{10}$  м. Электромагнитный спектр принято делить на радиоволны, инфракрасное, видимое, ультрафиолетовое, рентгеновское и гамма-излучения. Эти участки спектра имеют общую физическую природу, а различаются по способу генерации и приема излучения. Различные участки спектра электромагнитного излучения отличаются друг от друга длиной волны  $\lambda$  и частотой  $\nu$  – величинами, характеризующими не только волновые, но и квантовые свойства электромагнитного излучения. Видимое инфракрасное и ультрафиолетовое излучение составляют так называемую оптическую область спектра. Выделение этой области обусловлено близостью соответствующих участков спектра, а также сходством методов и приборов, используемых для исследования.

По современным представлениям, свету присуща двойственная природа. Свет – это электромагнитные волны, но эти волны состоят из отдельных порций – квантов, которые ведут себя как целые частицы. В одних явлениях ярче проявляются волновые свойства, в других – корпускулярные. Этот дуализм волна-частица был назван корпускулярно-волновым дуализмом.

### §16. Основные законы оптики.

В основе оптики лежат четыре закона, установленные опытным путем: 1) закон прямолинейного распространения света; 2) закон независимости световых пучков; 3) закон отражения; 4) закон преломления. Первые три закона были известны еще древним грекам, четвертый закон вошел в науку в формулировке Р.Декарта (1637 г.).

1. Свет в прозрачной однородной среде распространяется по *прямым линиям*. Опытным доказательством этого закона может быть образование теней за непрозрачными объектами при освещении их точечными источниками света (рис. 16.1). Закон о прямолинейном распространении света ограничен явлением дифракции.

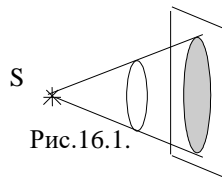


Рис.16.1.

2. *Закон независимости световых пучков* состоит в том, что распространение любого светового пучка не за-

висит от наличия других световых пучков в этой среде. Иллюстрацией этому закону может служить наблюдение двух различных объектов при

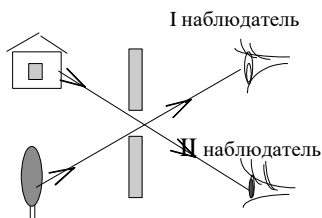


Рис.16.2.

условии, что световые пучки в пространстве пересекаются (рис.16.2). Если пучки не влияют друг на друга, то каждый наблюдатель видит только "свой" предмет, причем неискаженным, Закон независимости световых пучков дополняется утверждением, определяющим совместное действие световых пучков при их наложении друг на друга. Освещенность экрана, создаваемая несколькими световыми пучками, равна сумме

освещенностей создаваемых каждым пучком в отдельности. Границы применения этого закона - явление интерференции.

3. При падении света на плоскую границу раздела двух прозрачных сред свет частично проходит во вторую среду (преломляется), частично возвращается обратно (отражается) (рис.16.3). При этом выполняются *законы отражения*:

а) падающий луч (АВ), отраженный луч (ВС) и нормаль к границе раздела в точке падения (КР) лежат в одной плоскости;

б) угол падения  $i$  равен углу отражения  $i'$ :  $i = i'$

4. *Законы преломления*:

а) падающий луч (АВ), преломленный луч (ВД) и нормаль в точку падения к границе раздела (КР) лежат в одной плоскости;

б) отношение синуса угла падения к синусу угла преломления для данных двух сред есть величина постоянная и называется *относительным показателем преломления* второй среды относительно первой:

$$\frac{\sin i}{\sin r} = n \quad (16.1)$$

Показатель преломления среды относительно вакуума называют абсолютным показателем (коэффициентом) преломления этой среды. Относительный показатель преломления связан с абсолютным показателем  $n_1$  и  $n_2$  соотношением:

$$n = \frac{n_2}{n_1} = \frac{v_1}{v_2} \quad (16.2)$$

С учетом соотношения (1.2) закон преломления можно записать в виде:

$$n_1 \sin i = n_2 \sin r \quad (16.3)$$

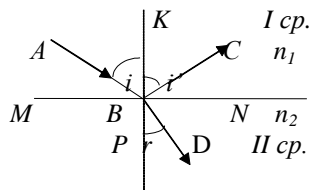


Рис.16.3

Для воздуха, как и для вакуума, показатель преломления берется равным 1. Среда с большим показателем преломления называется **оптически более плотной**. В оптически более плотной среде скорость света меньше, в оптически менее плотной. Из (16.3) видно, что а) если  $n_2 > n_1$ , то  $r < i$ , б) если при  $n_2 < n_1$ , то  $r > i$ .

Частный случай: при  $n_2 < n_1$ , и  $i \geq i_{np}$ , свет не выходит из среды оптически более плотной. Преломленный луч или скользит вдоль границы раздела, или отражается от поверхности (рис. 16.4). Это явление называется полным внутренним отражением. Угол падения  $i = i_{np}$ , удовлетворяющий соотношению:

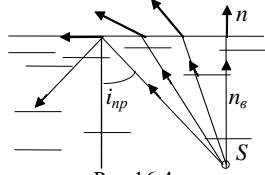


Рис.16.4.

$$\sin i_{np} = \frac{n_2}{n_1}, \quad (16.4)$$

называется *предельным углом полного отражения*.

Преломлением света и полным отражением объясняется прохождение света через плоскопараллельную прозрачную пластинку, через призмы (рис.16.5, 16.6.).

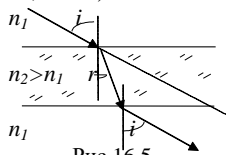


Рис.16.5.

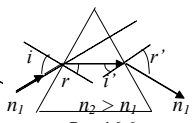


Рис.16.6

## §17. Тонкие линзы. Формула тонкой линзы. Построение изображений в линзах.

Прозрачные тела, ограниченные с обеих сторон частями сферических поверхностей, называются *линзами*. Частный случай – одна из поверхностей плоская. Прямая, проходящая через центры кривизны поверхностей линзы, называется *главной оптической осью*.

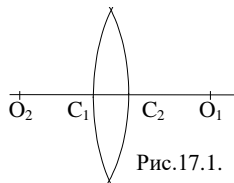


Рис.17.1.

Если  $C_1 C_2 \ll R_1, R_2$ , то линза называется *тонкой*. В этом случае точки  $C_1$  и  $C_2$  (рис.17.1) стремятся к одной точке, называемой *оптическим центром линзы* (O).

Любой луч, проходящий через эту точку, не изменяет своего направления и называется *побочной оптической осью*. Линза, превращающая световой пучок в сходящийся, называется *собирающей*. Линза, превращающая световой пучок в расходящийся, называется *рассеивающей*. Виды линз при-

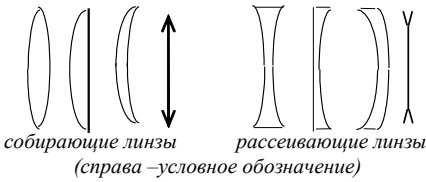


Рис.17.2.

введены на рис.17.2.. Такие линзы будут собирающими или рассеивающими при условии: показатель преломления ( $n_{cp} < n_l$ ) окружающей среды меньше показателя преломления линзы.

Световые пучки, падающие на линзу, преломляются на обеих поверхностях линзы. *Формула тонкой*

*линзы:*

$$\frac{1}{a_2} - \frac{1}{a_1} = (n_{21} - 1) \left( \frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) \quad (17.1)$$

В данном соотношении  $a_1$  – расстояние от предмета до оптического центра линзы,  $a_2$  – расстояние от линзы до изображения,  $R_1, R_2$  – радиусы кривизны поверхностей линзы;  $n_{21} = n_2 / n_1$  – относительный показатель преломления линзы относительно окружающей среды. Правая часть формулы (4.1) обозначается буквой  $D$  и называется *оптической силой линзы*:

$$D = (n - 1) \left( \frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right), \quad (17.2)$$

$D > 0$  для собирающей линзы,  $D < 0$  для рассеивающей линзы.

Лучи, падающие на тонкую линзу параллельно главной оптической оси, после преломления в собирающей линзе проходят через одну точку, называемую *фокусом* линзы. Для рассеивающей линзы преломленные лучи идут так, что их продолжения проходят через фокус.

У линз два фокуса (согласно принципа взаимно обратимости световых лучей). Плоскость, проходящая через фокус перпендикулярно главной оптической оси, называется *фокальной плоскостью*.

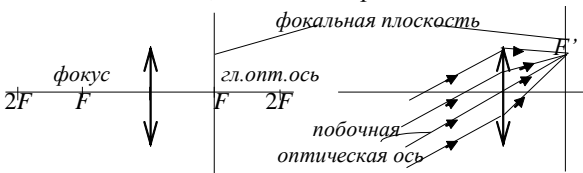


Рис.17.3

Пучок параллельных лучей, падающих на собирающую линзу, после преломления проходит через точку  $F'$  в фокальной плоскости, через которую

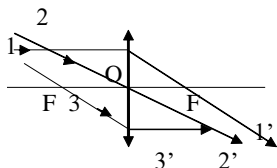
проходит побочная оптическая ось, параллельная данному пучку (рис.17.3) Если на линзу падает параллельный пучок, то  $a_1 \rightarrow \infty, a_2 = F$ , тогда из соотношений (17.1) и (17.2) следует:

$$\frac{1}{F} = D \quad (17.3)$$

Оптическая сила линзы – это величина, обратная фокусному расстоянию. Измеряется оптическая сила в диоптриях. Оптической силой в 1 дптр обладает линза с фокусным расстоянием равным 1 м.

Для построения изображений в линзах также пользуются «удобными» лучами, ход которых после преломления известен (рис.18.4).

а) собирающая линза



б) рассеивающая линза

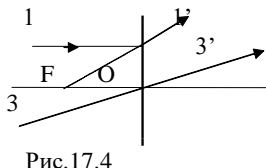


Рис.17.4

1-1' – луч, параллельный главной оптической оси, после преломления идет через фокус (для рассеивающей линзы продолжение преломленного луча идет через фокус); 2-2' – луч, идущий через оптический центр, не меняет своего направления; 3-3' – луч, идущий через фокус линзы, после преломления идет параллельно главной оптической оси.

Примеры построения изображений приведены на рис. 17.5 и 17.6.

Так как изображение, даваемое линзой, может быть увеличенным или уменьшенным, то отношение размеров изображения к размерам предмета называется *линейным* или *поперечным увеличением*:

$$\Gamma = A'B'/AB \quad (17.5)$$

Из рис.17.5 видно, что  $\triangle OAB \sim \triangle OA'B'$ . Поэтому  $\Gamma = \frac{A'B'}{AB} = \frac{a_2}{a_1}$ .

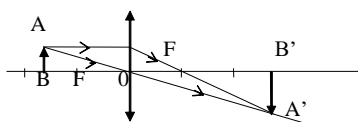


Рис.17.5

линза собирающая

$$2F > a_1 > F, \quad a_2 > 2F$$

изображение A'B' предмета AB действительное, увеличенное, перевернутое.

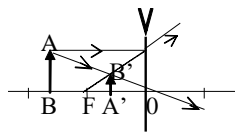


Рис.17.6

Линза рассеивающая, изображение мнимое, уменьшенное, прямое перевернутое.

## §18. Волновая природа света. Интерференция света.

Свет обладает волновой природой. Длина световой волны:

$$\lambda = \frac{c}{\nu},$$

где  $c=3 \cdot 10^8$  м/с;  $\nu$  – частота излучения. Абсолютный показатель преломления среды  $n = \frac{c}{v}$ , где  $v$  – скорость света в среде. Зависимость показателя

преломления света от длины волны называют дисперсией света. Спектр белого света содержит семь основных цветов, непрерывно переходящих друг в друга. Волновая природа света наиболее ярко подтверждается явлениями интерференции и дифракции.

**Интерференция света** – это особый случай сложения волн, при котором в одних точках пространства волны усиливают друг друга, а в других точках пространства гасят друг друга. Следовательно, при интерференции световая энергия перераспределяется в пространстве.

**Интерференционная картина** – чередование максимумов и минимумов интенсивности (светлых и темных полос).

**Волны усиливают или ослабляют друг друга при условии:**  $\omega_1 = \omega_2$  (частоты колебаний одинаковы) и  $\Delta\varphi = \text{const}$  (разность фаз постоянна).

**Волны, удовлетворяющие этому условию, называются когерентными.** Таким образом, интерferируют только **когерентные волны**.

Получить такие волны в оптике можно, разделив световую волну от

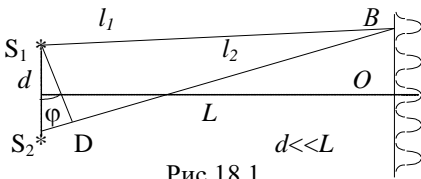


Рис.18.1

одного источника на части. От двух независимых источников света получить интерференционную картину невозможно ни при каких условиях.

Пусть из точек  $S_1$  и  $S_2$  распространяются волны одного направления (рис.19.1), которые встречаются в

точке Р. Положение темных и светлых полос на экране определяются из следующих соотношений:

$$\Delta l = \pm k\lambda = \pm \frac{2k\lambda}{2} \text{ – условие максимума,}$$

$$\Delta l = \pm (2k + 1) \frac{\lambda}{2} \text{ – условие минимума,}$$

где  $\Delta l = l_2 - l_1 = r_2 n_2 - r_1 n_1$  – оптическая разность хода,  $k=0,1,2,\dots$  – порядок max, min,  $\lambda$  – длина волны. Если  $\Delta\varphi \neq \text{const}$ , то *интерференция отсут-*

ствует.

Можно показать, что при двухлучевой интерференции расстояние между соседними полосами (ширина интерференционных полос)

$\Delta y = \frac{\lambda L}{d}$ , где  $d$  – расстояние между источниками когерентных волн,  $L$  – расстояние от источника до экрана.

Наиболее часто мы встречаемся с интерференцией на тонких пленках и пластинах. При падении света на тонкие прозрачные пленки и пластинки

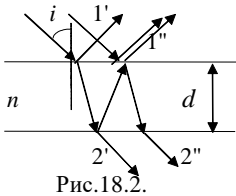


Рис.18.2.

образуются когерентные лучи  $1', 1''$  (в отраженном свете) и  $2', 2''$  (в проходящем свете) за счет отражения и преломления лучей на обеих поверхностях пленки (рис.18.2). Наложение этих лучей приводит к интерференции света в отраженных и проходящих лучах. Разность хода в этом случае зависит от толщины пленки  $d$ , угла падения света  $i$ , длины световой волны  $\lambda$  и показателя преломления пленки  $n$ :

$\Delta l = 2d\sqrt{n^2 - \sin^2 i} + \frac{\lambda}{2}$  – в отра-

женном свете;  $\Delta l' = 2d\sqrt{n^2 - \sin^2 i}$  – в проходящем свете/

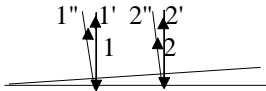


Рис.18.3.

Если  $i = const$  – угол падения, а  $d \neq const$  – толщина пленки меняется, то получаем интерфе-

ренционную картину, называемую полосами равной толщины. Каждая из полос получается за счет наложения когерентных лучей ( $1', 1'', \dots$ ), образующихся на определенной толщине пленки. Поэтому такие полосы называются полосами равной толщины.

Явление интерференции используют в интерферометрах для точного измерения длин отрезков, показателей преломления длин волн.

Интерференция в тонких слоях применяется для уменьшения потерь на отражение в различных оптических приборах. Поверхности линз покрывают тонкой пленкой, показатель преломления которой отличается от показателя преломления линзы (рис.18.4). Падающие на линзу лучи, отражаясь от обеих поверхностей пленки, образуют когерентные лучи, с разностью хода  $2dn_{пл}$ , где  $d$  – толщина пленки. Если

$\Delta l = \lambda/2$ , то волны гасят друг друга:

$$\Delta l = 2dn_{пл} = \frac{\lambda}{2}, \text{ т.е. } d = \frac{\lambda}{4n_{..}}$$

При такой толщине пленки даваемое прибором изображение становится ярче, «просветляется». От-

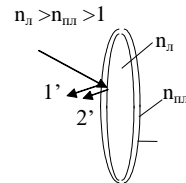


Рис.18.4.

сюда и название «просветление оптики». На линзы при обычных условиях падает белый свет. Соотношение  $d = \lambda / 4n_{пл}$  выполняется не для всех длин волн. Наиболее полное гашение выполняется для волн средней части спектра (зеленый цвет). Для красных и фиолетовых лучей ослабление незначительно. Поэтому объективы с просветленной оптикой в отраженном свете имеют лилово-сиреневый оттенок.

### § 19. Принцип Гюйгенса – Френеля. Дифракция в параллельных лучах.

**Дифракция света** – это огибание световыми волнами препятствий. Препятствиями служат узкие щели, малые отверстия, непрозрачные экраны. При этом размер препятствия  $d$  сравним с  $\lambda$  длиной волны.  $d \approx \lambda$ . Дифракция света объясняется на основе **принципа Гюйгенса-Френеля**: *Любая точка пространства, до которой дошло колебание, становится источником вторичных когерентных волн.*

Интерференция этих волн определяет освещенность в данной точке экрана (пространства). **Дифракционная картина** – чередование светлых и темных полос.

Дифракция в параллельных лучах наблюдается на щели и на дифракционной решетке. Пусть ширина щели  $b$ , на щель падает плоская волна. Согласно принципу Гюйгенса, каждая точка щели порождает вторичную сферическую волну. За щелью помещают собирающую линзу, а в фокальной плоскости этой линзы – экран (рис.19.1). Тогда волны одного направления собираются в определенной точке экрана. Эти волны когерентны и при наложении интерферируют. Результат их интерференции и определяет распределение интенсивности на экране. Дифракционная картина от щели представляет собой чередование светлых и темных полос (максимума и минимума освещенности). Условие минимума при дифракции от щели:

$$b \sin \varphi = \pm k \lambda \quad (19.1)$$

Условие максимума при дифракции от щели:

$$b \sin \varphi = \pm (2k + 1) \frac{\lambda}{2} \quad (19.2)$$

Система узких параллельных щелей, разде-

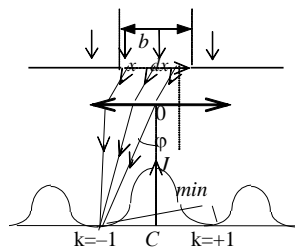


Рис.19.1.

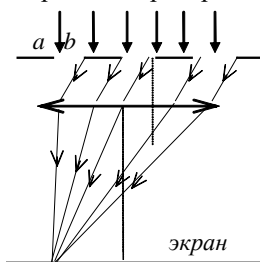


Рис. 19.2.



ленных непрозрачными промежутками, называется *дифракционной решеткой*. Обычно решетки изготавливаются с помощью специальной делительной машинки, наносящей на стеклянной пластине параллельные штрихи. Число штрихов доходит до нескольких тысяч на 1 мм. Бывают также *отражательные решетки*. Они представляют собой чередующиеся участки, отражающие свет и рассеивающие его. Рассеивающие свет штрихи наносятся резцом на отшлифованной металлической пластине. Если ширина прозрачных щелей (или отражающих полос)  $b$ , а ширина непрозрачных промежутков  $a$ , то величина  $b + a = d$  называется *периодом* (или постоянной) решетки (рис.19.2). Каждая точка каждой щели дифракционной решетки посылает вторичные сферические волны. Когерентные лучи одного направления фокусируются с помощью линзы в определенной точке экрана. Распределение интенсивности на экране определяется двумя явлениями: 1) дифракцией на каждой щели и 2) наложением когерентных пучков от всех щелей (многолучевая интерференция). Картина представляет собой систему узких и ярких полос, называемых главными максимумами, на темном фоне. Вторичные максимумы слабы по сравнению с главными и практически не видны. Положение *главных максимумов* определяется условием:  $d \sin \varphi = \pm m \lambda$  (20.3)

где  $m = 0, 1, 2, 3$  - порядок главных максимумов

Из соотношения (20.3) видно, что угол дифракции зависит от длины волны:  
 $\sin \varphi = m \lambda / d$  (20.4)

Так как  $\lambda_{\text{тм}} < \lambda_{\text{rh}}$ , то  $\sin \varphi_{\text{тм}} < \sin \varphi_{\text{hp}}$  при  $m = \text{const}$ . Из этого следует, что при освещении решетки белым светом, все максимумы, кроме максимума нулевого порядка, представляют собой спектры, фиолетовым концом обращенные к максимуму нулевого порядка (рис.20.3). Следовательно, решетка разлагает сложный свет по длинам волн. Поэтому дифракционную решетку используют как спектральный прибор и для точного измерения длин волн.

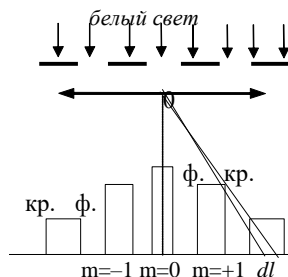


Рис.19.3

## § 20. Поляризация света.

Свет, как электромагнитная волна, характеризуется колебаниями вектора  $\vec{E}$  (вектор напряженности переменного электрического поля) и

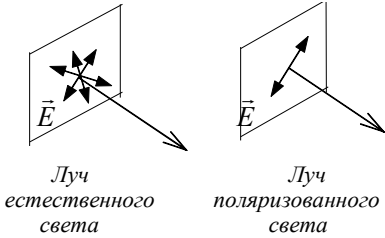


Рис.20.1

вектора  $\vec{B}$ , (вектора индукции переменного магнитного поля). При этом  $\vec{E} \perp \vec{B}$  и  $\vec{E} \perp \vec{v}$ ,  $\vec{B} \perp \vec{v}$ , где  $\vec{v}$  – вектор скорости распространения волны. Следовательно, свет – это поперечная электромагнитная волна.

Световая волна, в которой колебания вектора  $\vec{E}$  в плоскости, перпендикулярной направлению распространения, непрерывно изменяется, называется *естественной*. Волна, в которой колебания вектора  $\vec{E}$  в указанной плоскости фиксировано, называется *поляризованной* (рис.20.1).

Так как любое линейное колебание вектора  $\vec{E}$

можно разложить на два взаимно перпендикулярных, то условные обозначения естественного и поляризованного света (рис.20.2).

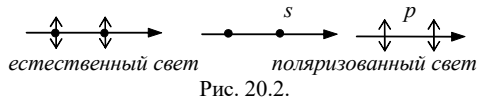


Рис. 20.2.

Устройства, превращающее естественный свет в поляризованный, называется **поляризатором**, а устройство, с помощью которого определяют каким является свет, называются **анализатором** (рис.20.3).

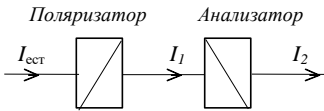


Рис. 20.3.

Плоскость, в которой колеблется  $\vec{E}$  после прохождения поляризатора, анализатора, называется **главной плоскостью поляризатора (анализатора)**. При прохождении света через систему поляризатор-анализатор интенсивность света меняется по **закону Малюса**  $I_2 = I_1 \cos^2 \varphi$ ,

$I_1 = \frac{1}{2} I_{ест}$ , где  $\varphi$  – угол между главными плоскостями поляризатора и анализатора.

Поляризованный свет можно получить при отражении от диэлектрика, при преломлении, с помощью различных кристаллов. При падении света на поверхность диэлектрика происходит частичное отражение и преломление (рис.20.4). Если на поверхность диэлектрика падает свет под

углом Брюстера  $i_B$ , удовлетворяющего условию:

$$i_B + r = \frac{\pi}{2} \text{ или } tqi_B = n_{21}, \text{ отраженный свет бу-}$$

дет полностью поляризованным. Закон  $tqi_B = n_{21}$

носит название **закона Брюстера**

Если взять стопу стеклянных пластин, сло-

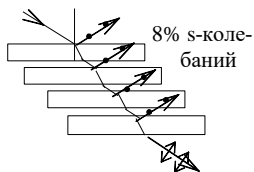


Рис.20.5.

женных вместе, на которые падает свет под углом  $i_B$ , тогда 8% падающего света отражается, причем отраженный свет содержит только s-колебания. В падающем свете 50% составляет s-колебания, а 50% – p-колебания. На поверхности каждой пластины отражается 8% s-колебаний, поэтому прошедший через стопу свет содержит преимущественно p-колебания.

Такое устройство, позволяющее получить поляризованный свет, называется *стопой Столетова*.

При прохождении света через кристалл (кроме кристаллов кубической симметрии) луч света раздваивается. Для одного луча выполняется закон преломления. Такой луч – **обыкновенный**

$$\sin i_o / \sin r_o = n_o = const .$$

**необыкновенного** луча

$$\sin i_e / \sin r_e = n_e \neq const .$$

Необыкновенный луч не лежит в одной плоскости с падающим лучом

и перпендикулярен к границе раздела. В кристаллах имеется направление, вдоль которого не происходит двойного лучепреломления. Оно называется *оптической осью* кристалла. Плоскость, проходящая через оптическую ось и падающий луч, называется *главным сечением кристалла*. Оба луча, обыкновенный и необыкновенный, являются поляризованными, причем плоскости их поляризации взаимно перпендикулярны. Считается, что для обыкновенного луча вектор  $\vec{E}$  колеблется перпендикулярно плоскости главного сечения, а для необыкновенного луча – колебания вектора  $\vec{E}$  параллельны плоскости главного сечения (рис. 20.6).

Поляризация при двойном лучепреломлении объясняется анизотропией кристаллов (т.е. неодинаковостью их свойств по разным направлениям).

По электромагнитной теории:  $v = \frac{c}{n}$ ;  $v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \epsilon \mu_0 \mu}} = \frac{c}{\sqrt{\epsilon \mu}}$ . Для

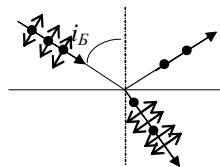


Рис.20.4.

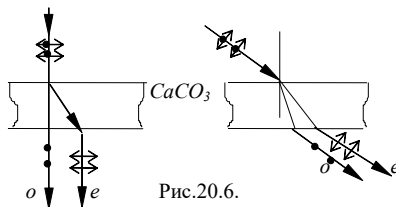


Рис.20.6.

диэлектриков (какими являются кристаллы)  $\mu = 1$ , а значит  $v = c/\sqrt{\epsilon}$ . Отсюда получим  $n = \sqrt{\epsilon}$ . При падении на кристалл естественного света колебаниям вектора  $\vec{E}$ , перпендикулярным плоскости главного сечения, соответствует одно значение диэлектрической проницаемости -  $\epsilon_{\perp}$ , а для колебаний вектора  $\vec{E}$  параллельных плоскости главного сечения, - другое значение -  $\epsilon_{\parallel}$ . Поэтому различным направлениям колебания вектора  $\vec{E}$  соответствуют различные значения  $\epsilon$  и показателя преломления  $n$ :  $n_o = \sqrt{\epsilon_{\perp}} = c/v_o = const$ ;  $n_e = \sqrt{\epsilon_{\parallel}} = c/v_{\parallel} \neq const$ ;  $\epsilon_{\perp} \neq \epsilon_{\parallel}$ ;  $v_o = const$ ;  $v_{\parallel} \neq const$ ;  $n_o \neq n_e$ .

## § 21. Взаимодействие света с веществом.

**Дисперсией** света называется зависимость показателя преломления вещества от длины волны (или частоты) падающего света, т.е.  $n = f(\lambda)$  или  $n = f(\omega)$ . Эту зависимость можно изобразить графически (рис. 21.1). Следствие дисперсии света – разложение

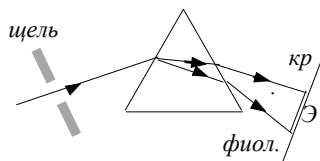


Рис.21.2

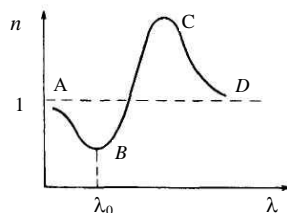


Рис.21.1.

в спектр пучка белого света при прохождении сквозь трехгранную призму (рис. 21.2). Изучение этого спектра привело И.Ньютона (1672) к открытию дисперсии света. Для веществ, прозрачных в данной области спектра,  $n$  увеличивается с увеличением  $\omega$  (уменьшением  $\lambda$ ), чему и соответствует распределение цветов в спектре; такая зависимость  $n$  от  $\lambda$  называется нормальной (участки АВ, CD). Мерой дисперсии является изменение показателя преломления при изменении длины волны  $dn/d\lambda$ . При нормальной дисперсии  $\frac{dn}{d\lambda} < 0$ . На участке ВС  $\frac{dn}{d\lambda} > 0$  – аномальная дисперсия. Участки наблюдаются вблизи тех длин волн, которые сильно поглощаются веществом. Дисперсия объясняется взаимодействием световой электромагнитной волны с электронами вещества. Падающая волна вызывает вынужденные колебания электронов, которые порождают вто-

ричные электромагнитные волны. Эти волны, складываясь с падающей волной, дают результирующую волну, скорость которой отлична от скорости падающей волны.

**Поглощение света** – уменьшение интенсивности световой волны при ее прохождении через вещество.

Основной закон, описывающий поглощение света, закон **Бугера**, который связывает интенсивности  $I$  света, прошедшего слой среды толщиной  $d$ , и исходного светового потока  $I_0$ :

$$I = I_0 e^{-\alpha d}.$$

$\alpha$  – коэффициент поглощения, который не зависит от  $I, I_0, d$ . Если  $\alpha = 1/d$ , то  $I_0 / I = e$ .

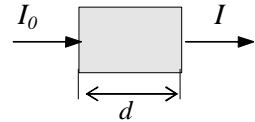


Рис.21.3

Поглощение объясняется тем, что часть энергии падающей волны затрачивается на возбуждение колебаний электронов и превращается в энергию вторичных волн, частично превращается во внутреннюю энергию вещества. Коэффициент поглощения  $\alpha$  зависит от рода вещества и от  $\omega$  или  $\lambda$ . Зависимость  $\alpha$  от  $\lambda$   $\alpha = f(\lambda)$  называют спектром поглощения. Различают сплошной, линейчатый, полосатый **спектры поглощения** (рис.21.4). **Сплошной** – имеют твердые тела, газы при высоких давлениях, **линейчатый** – пары металла, разряженные газы, **полосатый** – сложные молекулярные соединения, жидкости.

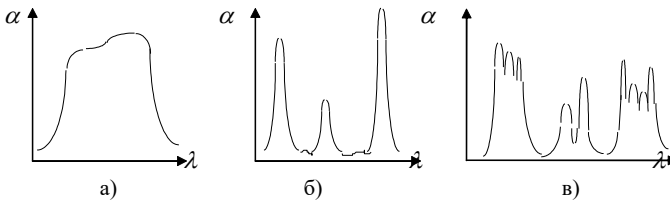


Рис.21.4

**Рассеяние света** – изменение направления световой волны при прохождении через оптически неоднородную («мутную») среду. Такими средами являются – дым, туман, эмульсии, суспензии, молочное стекло, перламутр, опал. Рассеяние объясняется взаимодействием падающей световой волны с электронами вещества. Падающие волны вызывают колебания электронов в атомах. Эти колебания порождают вторичные волны, распространяясь по всем направлениям. Когерентные волны при наложении интерferируют. Если среда однородная, то вторичные волны гасят друг друга по всем направлениям, кроме

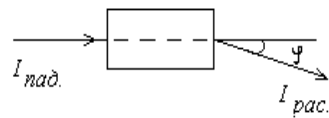


Рис. 21.5

первоначальных – рассеяние отсутствует. Если среда неоднородная, световые волны дифрагируют на неоднородностях среды и за счет этого не погашают друг друга по разным направлениям. Интенсивность рассеянного света зависит от размеров неоднородности ( $d$ ). Если  $d \ll \lambda$ , то интенсивность рассеянного света  $I$  пропорциональна четвертой степени частоты или обратно пропорциональна четвертой степени длины волны,  $I \sim \omega^4 \sim \frac{1}{\lambda^4}$ . Зависимость эта носит название закона Рэлея. Если

$d \approx \lambda$ , тогда  $I \sim \omega^2 \sim \frac{1}{\lambda^2}$ . И, наконец, если  $d \gg \lambda$ , тогда интенсив-

ность рассеянного света не зависит от длины волны. Рассеянием света объясняется белый цвет облаков, голубой цвет неба и другие оптические явления в атмосфере.

## ВОПРОСЫ

*для самопроверки и подготовки к тестированию по теме 4.*

1. По какой траектории распространяется свет в прозрачной однородной среде?
2. Как зависит распространение любого светового пучка от наличия других световых пучков в среде?
3. Если  $\alpha$  – угол падения,  $\beta$  – угол отражения, то как записывается закон отражения?
4. Проиллюстрировать, в какой точке находится изображение источника света  $S$  в плоском зеркале  $MN$ .
5. Угол падения луча света на зеркальную поверхность равен  $20^\circ$ . Чему равен угол между отраженным лучом и зеркальной поверхностью?
6. Записать закон преломления, если при переходе света из воздуха в среду с показателем преломления  $n$  угол падения равен  $i$ , а угол преломления  $r$ .
7. Как меняется угол преломления по отношению к углу падения при переходе света от оптически менее плотной среды в более плотную?
8. Как меняется угол преломления по отношению к углу падения при переходе света от оптически более плотной среды в менее плотную?
9. По какой формуле определяют предельный угол внутреннего отражения для луча света, идущего из среды с абсолютным показателем преломления  $n_1$  в среду с абсолютным показателем преломления  $n_2$ ?
10. Изобразить ход луча при переходе из воды в воздух.
11. Луч света переходит из воздуха в воду. Какое соотношение всегда справедливо между углами падения  $i$  и преломления  $r$ ?

12. Как называется явление, при котором преломленный луч или скользит вдоль границы раздела, или отражается от поверхности?

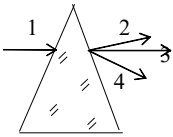


Рис. 13

13. По какому направлению выходит луч света из стеклянную призму, если на призму в воздухе падает световой луч 1 (рис. 13)?

14. Нарисуйте схематические собирающие и рассеивающие линзы.

15. Какая величина называется оптической силой линзы?

16. Построить изображение объекта  $S$ , находящегося а) за двойным фокусом, б) между фокусом и двойным фокусом собирающей линзы.

17. Каким является изображение  $A'B'$  предмета  $AB$  на рисунке 17?

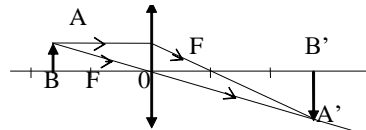


Рис. 17

18. Какое явление понимают под интерференцией света?

19. Может ли наблюдаться интерференция двух пучков света с разными длинами волн, и если да, то при каких условиях?

20. Почему нельзя наблюдать интерференцию света от двух ламп накаливания?

21. Каковы условия, необходимые и достаточные для наблюдения минимума интерференции электромагнитных волн от двух источников?

22. Каковы условия, необходимые и достаточные для наблюдения максимума интерференции электромагнитных волн от двух источников?

23. Разность хода двух волн, испущенных когерентными источниками с одинаковой начальной фазой до данной точки равна длине волны. Максимум или минимум вследствие интерференции волн в этой точке будет наблюдаться?

24. Что будет наблюдаться в точке на экране, если разность хода двух волн, испущенных когерентными источниками с одинаковой начальной фазой до данной точки равна половине длины волны?

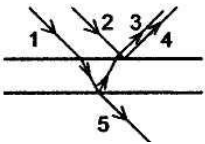


Рис. 25

25. Какие лучи интерферируют при отражении от тонкой пленки (см. рис. 25)?

26. Сформулировать условие «просветления» для толщины прозрачной пленки из вещества с показателем преломления  $n$ , находящейся в воздухе, освещаемой светом с длиной волны  $\lambda$ .

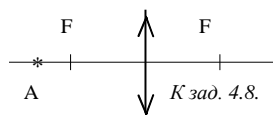
27. По какой формуле вычисляется оптическая длина пути?

28. Центром каких волн, согласно принципу Гюйгенса-Френеля, становится каждая точка, до которой дошла волна от источника света?
29. Что понимают под дифракцией света?
30. Какими должны быть размеры препятствия, чтобы наблюдать дифракционную картину?
31. Каково условие минимума дифракции на узкой щели в непрозрачном экране, если на щель шириной  $b$  падает нормально пучок параллельных лучей?
32. Каково условие максимума дифракции на узкой щели в непрозрачном экране, если на щель шириной  $b$  падает нормально пучок параллельных лучей?
33. Дифракционная решетка имеет ряд параллельных щелей шириной  $a$  каждая, щели разделены непрозрачными промежутками шириной  $b$ . Положение главных максимумов определяется условием
34. Какая световая волна называется естественной?
35. Как меняется колебание вектора напряженности электрического поля?
36. Возможна ли поляризация при продольных колебаниях?
37. Как можно схематично изобразить луч естественного света?
38. Интенсивность света за анализатором определяется законом
39. Как называется зависимость показателя преломления света от длины волны?
40. Чем обусловлено разложение белого света в спектр при прохождении через призму?
41. Кто автор закона, определяющего интенсивность света, прошедшего через поглощающее вещество?
42. Каким является спектр поглощения многоатомных молекул?
43. Каким является спектр поглощения твердых тел, жидкостей, газов при высоких давлениях?
44. Каким является спектр поглощения газов и паров металлов при низких давлениях?



## ЗАДАЧИ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО РЕШЕНИЯ ПО ТЕМЕ 4

- 4.1. Предмет находится от плоского зеркала на расстоянии 20 см. На каком расстоянии от предмета окажется его изображение, если предмет отодвинуть на 10 см от зеркала?
- 4.2. На стеклянную пластинку, показатель преломления которой 1,5, падает луч света. Найти угол падения луча, если угол между отраженным и преломленным лучами  $90^\circ$ .
- 4.3. Абсолютные показатели преломления алмаза и стекла соответственно равны 2,42 и 1,5. Каково отношение толщин этих веществ, если время распространения света в них одинаково?
- 4.4. Определить предельный угол падения луча на границу раздела стекла ( $n_1=1,5$ ) и воды ( $n_2=1,33$ ).
- 4.5. Луч света выходит из скипидара в воздух. Предельный угол полного внутреннего отражения для этого луча  $42^\circ 23'$ . Чему равна скорость распространения света в скипидаре.
- 4.6. Начертите ход лучей, которые падают на границу вода-воздух под углом  $30^\circ$  и  $60^\circ$ .
- 4.7. Глубина воды в водоеме равна 2,5 м. Наблюдатель смотрит на предмет, лежащий на дне, причем луч зрения нормален к поверхности воды. Определить кажущееся расстояние предмета от поверхности воды. Показатель преломления воды 1,33.
- 4.8. Постройте изображение точки А, находящейся на оптической оси а) собирающей, б) рассеивающей линзы.
- 4.9. При каком условии собирающая линза может дать изображение предмета, равное по размеру самому предмету?
- 4.10. Фокусные расстояния трех линз соответственно равны 0,8 м; 250 см; 200 мм. какова оптическая сила каждой линзы?
- 4.11. Радиусы кривизны поверхностей двояковыпуклой линзы  $R_1=R_2=50$  см. Показатель преломления материала линзы  $n=1,5$ . Найти оптическую силу  $D$  линзы.
- 4.12. Предмет помещен на расстоянии 25 см от переднего фокуса собирающей линзы. Изображение предмета получается на расстоянии 36 см за задним фокусом. Определить фокусное расстояние линзы.
- 4.13. Главное фокусное расстояние двояковыпуклой линзы 50 см. Предмет высотой 1,2 см помещен на расстоянии 60 см от линзы. Где и какой высоты изображение получится ?
- 4.14. Расстояние от предмета до экрана равно 3 м. Какой оптической силы надо взять линзу и где следует ее поместить, чтобы получить изображение предмета, увеличенное в 5 раз.



- 4.15. Длина волны световых лучей света в воздухе 400 нм. Какова длина волны этих лучей в воде ( $n=1,33$ )?
- 4.16. Определить скорость света в воде красных лучей ( $n_{кр}=1,329$ ).
- 4.17. Какой наибольший порядок спектра можно видеть в дифракционной решетке, имеющей 500 штрихов на миллиметре, при освещении ее светом с длиной волны 720 нм?
- 4.18. Найти наибольший порядок спектра линии лития с длиной волны 671 нм, если период дифракционной решетки 0,01 мм.
- 4.19. Предельный угол полного внутреннего отражения для некоторого вещества равен  $45^\circ$ . Чему равен для этого вещества угол полной поляризации?
- 4.20. Под каким углом к горизонту должно находиться Солнце, чтобы его лучи, отраженные от поверхности озера, были бы наиболее полно поляризованы?
- 4.21. Чему равен угол между главными плоскостями поляризатора и анализатора, если интенсивности естественного света, прошедшего через поляризатор и анализатор, уменьшается в четыре раза? Поглощением света пренебречь.

#### **ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО ИЗУЧЕНИЯ ПО ТЕМЕ 4**

1. *Оптическая система глаза как приемника излучения.*
2. *Волоконная оптика.*
3. *Энергетические и световые величины и их единицы.*
4. *Методы и приборы для измерения световых величин.*
5. *Фотометрия.*
6. *Методы определения скорости света.*
7. *Расчет интерференционной картины от двух источников.*
8. *Интерференция света в тонких пленках. Кольца Ньютона.*
9. *Голография и ее медико-биологические приложения.*
10. *Поляриметрия.*
11. *Поляризационная микроскопия для исследования биологических тканей.*

## Тема 5. КВАНТОВАЯ И АТОМНАЯ ФИЗИКА

### §22. Недостатки волновой теории света.

Дискуссия о природе света возникла еще во времена Ньютона, который выдвинул корпускулярную теорию света. Его современник Гюйгенс был сторонником волновой теории. Электродинамика, созданная Максвеллом и опыты по интерференции, дифракции и поляризации, казалось, бесповоротно утвердили волновую теорию света. Однако к концу XIX в. оставалось несколько явлений, которые не удавалось объяснить с этой точки зрения. Прежде всего это касалось законов теплового излучения.

*Тепловым излучением* называют электромагнитные волны, испускаемые нагретыми телами. Характерным свойством, отличающим тепловое излучение от других видов излучения, является его способность находиться в равновесии с излучающими телами. Поместим излучающее тело  $T$  в вакуум и окружим его непроницаемой абсолютно отражающей оболочкой. Излучение, испускаемое телом, отразится от оболочки и, упав на тело, частично или полностью поглотится им. Иными словами будет происходить непрерывный обмен энергией между телом и излучением. Со временем установится равновесие, заключающееся в том, что распределение энергии между телом и излучением будет неизменным. В силу этого тепловое излучение называют также *равновесным*.

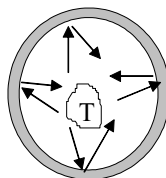


Рис.22.1

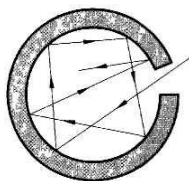


Рис.22.2

Тепловое излучение характеризуется *лучеиспускательной способностью*  $r$  – энергией, излучаемой телом с единицы поверхности в единицу времени. В системе СИ лучеиспускательная способность измеряется в Дж/м<sup>2</sup> с. Отношение лучистой энергии, поглощенной телом, ко всей падающей на него энергии, называется *поглощательной способностью*  $a$ . Величины  $r$  и  $a$  зависят как от природы и температуры тела, так и от длины волны электромагнитного излучения. Тело, у которого поглощательная способность равна единице для любой длины волны, называют *абсолютно черным телом*. Моделью абсолютно черного тела может служить сосуд с поглощающими внутренними стенками, имеющий малое отверстие (рис. 22.2). Легко убедиться, что любой попадающий в отверстие луч при многократном отражении внутри сосуда будет полностью поглощаться.

Установлено несколько экспериментальных законов, которым

подчиняется тепловое излучение.

1. *Закон Кирхгофа*: при данной температуре отношение лучеиспускательной способности к лучепоглощательной способности для любых тел есть величина постоянная и равная лучеиспускательной способности абсолютно черного тела  $R$ , имеющего эту же температуру:

$$\frac{r_{\lambda}}{a_{\lambda}} = R_{\lambda}$$

(индекс  $\lambda$  показывает, что параметры  $r$ ,  $a$  и  $R$  берутся для определенной длины волны). Закон Кирхгофа часто используют в агрономии. Температуру почвы можно сравнительно просто регулировать в значительных пределах, если изменять ее лучепоглощательную способность. Это достигается путем *мульчирования* – покрытия почвы тонким слоем вещества с тем или иным значением  $a$ . В качестве мульчи обычно используют молотый мел, торф, угольный порошок и др.

2. *Закон Стефана–Больцмана*: полная лучеиспускательная способность абсолютно черного тела пропорциональна температуре в четвертой степени:

$$R = \sigma T^4$$

где  $\sigma = 5,7 \cdot 10^{-8} \text{ Вт/м}^2 \text{ К}^4$  – постоянная Стефана-Больцмана.

3. *Закон смещения Вина*: спектральное распределение лучеиспускательной способности характеризуется максимумом при некоторой длине волны (рис.22.3), определяемой соотношением

$$\lambda_{\text{max}} = \frac{b}{T},$$

где  $b = 2,9 \cdot 10^{-3} \text{ м} \cdot \text{К}^4$  – постоянная Вина.

Непредвиденные и непреодолимые трудности возникли перед физиками при попытке определить аналитический вид функции распределения  $R_{\lambda}$ . Рэлей и Джинс вывели безупречную с точки зрения классической физики формулу, которая, однако, совершенно расходилась с опытом в области коротких волн:

$$(r_{\omega, T})_{\text{АЧТ}} = f(\omega, T) = \frac{\omega^2}{4\pi^2 C^2} kT$$

На рис. 22.3 значения  $r_{\lambda}$ , полученные по формуле Рэля-Джинса, показаны штриховой линией. Этот факт получил впервые в физике название «*ультрафиолетовая катастрофа*» и привел к выводу, что классическая физика не может объяснить законы излучения АЧТ.

Для объяснения спектрального распределения теплового излучения

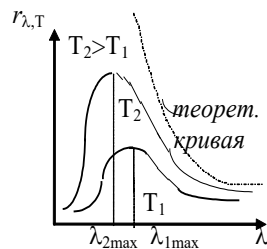


Рис.22.3.

абсолютно черного тела физикам пришлось отказаться от обычных представлений о свете. М.Планк предположил, что свет испускается только порциями (квантами, фотонами). Величина энергии такого кванта определяется соотношениями:

$$\varepsilon = h\nu, \quad \varepsilon = \hbar\omega,$$

где  $\nu$  – частота излучения,  $\omega$  – круговая частота,  $h=6,63 \cdot 10^{-34}$  Дж.с – постоянная Планка ( $\hbar = h / 2\pi = 1,054 \cdot 10^{-34}$  Дж.с). Исходя из этого, он в 1900 г.

получил формулу: 
$$r_\lambda = \frac{\hbar c^2}{\lambda^5} \frac{1}{(e^{\frac{2\pi\hbar c}{\lambda T}} - 1)}$$
. Эта формула носит название

формулы Планка и точно согласуется с экспериментальными данными, из нее вытекают все законы излучения абсолютно черного тела.

Несмотря на успех гипотезы Планка, физики поверили в реальность световых квантов лишь после того, как А.Эйнштейн в 1905 г. объяснил с квантовой точки зрения законы внешнего фотоэффекта. Внешний фотоэффект был открыт Г.Герцем в 1887 г. и подробно исследован в 1888–1890 гг. А.Г. Столетовым.

### §23. Квантовые свойства света.

По квантовой теории – свет это поток особых частиц – фотонов, обладающих следующими характеристиками: энергия фотона  $\varepsilon = h\nu = \hbar\omega$  ( $\nu$  – частота,  $h$  – постоянная Планка,  $\omega=2\pi\nu$  – циклическая частота); масса

фотона  $m_\phi = \frac{\varepsilon}{c^2} = \frac{h\nu}{c^2}$ ; импульс фото-

на  $P_\phi = m_\phi c = \frac{h\nu}{c}$ .

Квантовая природа света проявляется в таких явлениях как фотоэффект, давление света, рассеяние рентгеновских лучей также можно объяснить квантовой природой.

**I. Фотоэффект** – явление изменения энергии электронов вещества под действием света. При внешнем фотоэффекте электроны вылетают с поверхности металлов. Можно исследовать на таком опыте (рис.23.1). Свет проникает через кварцевое окошко и освещает катод К. На основе опытов были установлены *законы внешнего фотоэффекта*.

1. Максимальная скорость электронов прямо пропорциональна частоте

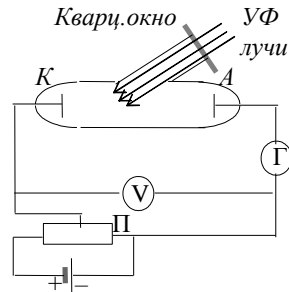


Рис.23.1.

падающего света (но не зависит от интенсивности света):  $v_{\max} \sim \nu$ .

2. Число вылетающих электронов пропорционально интенсивности падающего света (освещенности катода):  $n \sim I(E)$ .

3. Свет не любой частоты вызывает фотоэффект из данного вещества. Для каждого вещества существует минимальная частота света  $\nu_{\min}$  (максимальная длина волны  $\lambda_{\text{кр}}$ ), при которой еще наблюдается фотоэффект. Эти частоты (или длина волны) называются *красной границей фотоэффекта*.

Падающие фотоны поглощаются электронами вещества.. Энергия фотона  $h\nu$  частично тратится на освобождение электрона из вещества (работу выхода), а частично превращается в кинетическую энергию электрона:  $h\nu = A_{\text{вых}} + \frac{mv_{\max}^2}{2}$

Это соотношение называется *уравнением Эйнштейна для фотоэффекта*.

Из этого соотношения вытекают все законы фотоэффекта. Работа выхода для данного металла постоянна, поэтому скорость электронов зависит от энергии фотона, т.е. от частоты света. Интенсивность света:  $I = n\varepsilon = nh\nu$ , а каждый фотон может выбить один электрон. Поэтому число вылетающих электронов определяется интенсивностью падающего света. И, наконец,  $h\nu < A_{\text{вых}}$ , тогда электрон не может покинуть вещество, фотоэффект не наблюдается. Поэтому из условия:  $h\nu_{\min} = A_{\text{вых}}$  можно

определить, красную границу фотоэффекта. Т.к.  $\nu_{\min} = \frac{c}{\lambda_{\text{кр}}}$ , то:

$$\lambda_{\text{кр}} = hc / A_{\text{вых}}.$$

**II.** При падении света, согласно волновой теории, на поверхность оказы-

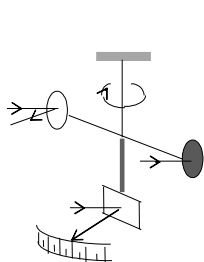


Рис.23.2.

вается **давление**:  $p = \frac{I}{c}(1 + R)$ , где  $I$  –

интенсивность света,  $R$  – коэффициент отражения. Для черной поверхности  $R=0 \Rightarrow p = \frac{I}{c}$ . Для белой по-

верхности  $R=1 \Rightarrow p = \frac{2I}{c}$ . Экспериментально свето-

вое давление было обнаружено и измерено в опытах П.Н.Лебедева (рис. 23.2). Прибор Лебедева состоял из легкого коромысла, подвешенного на тонкой стеклянной нити. На концах коромысла крепились тонкие крылышки (одно светлое, другое темное).

Весь прибор помещался в сосуд, из которого выкачивался воздух. При падении света на крылышки коромысло поворачивается, и о величине светового давления можно судить по углу закручивания нити. По квантовой теории давление света объясняется наличием импульса у фотонов.

**III.** При прохождении рентгеновских лучей через вещество происходит их **рассеяние**, т.е. отклонение от первоначального направления. В 1923 г. Комптон, исследуя рассеяние рентгеновских лучей различными веществами, обнаружил, что в рассеянных лучах содержится излучение с длиной волны  $\lambda$  (падающее излучение) и с длиной волны  $\lambda' > \lambda$ . При

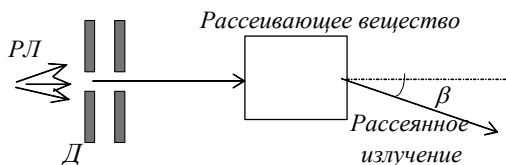


Рис.23.3.

этом разность  $\Delta\lambda = \lambda' - \lambda$  зависит от угла рассеяния  $\beta$ . Схема опыта представлена на рис.23.3. Особенности **эффекта Комптона** можно объяснить, рассматривая рассеяние как процесс

упругого столкновения рентгеновских фотонов со свободными электронами вещества.

Таким образом, свету присущ дуализм (двойственность) свойств. В явлениях интерференции, дифракции, поляризации, дисперсии ярче проявляются волновые свойства. Фотоэффект, давление света, эффект Комптона подтверждают квантовую природу излучения. Позже двойственность свойств была открыта у электронов и других элементарных частиц. Этот факт получил название *корпускулярно-волнового дуализма*.

## **§24. Корпускулярно-волновой дуализм и гипотеза де Бройля. Соотношение неопределенностей Гейзенберга.**

Многочисленные опыты показали, что свет обладает двойственной природой. В одинаковых явлениях свет ведет себя как волна (интерференция, дифракция, поляризация), а в других свет – это поток фотонов (особых частиц). Французский ученый Луи де Бройль, развивая представления о двойственной корпускулярно-волновой природе света, выдвинул в 1923 г. гипотезу об универсальности корпускулярно-волнового дуализма. Де Бройль утверждал, что материальные частицы обладают также двойственной природой, т.е. в определенных условиях проявляются их волновые свойства.

Как известно из оптики, квант света – фотон, кроме энергии  $E = h\nu$

характеризуется импульсом  $p_\phi$ :  $p_\phi = m_\phi c = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda_\phi}$ , так как

$\lambda_\phi = cT = \frac{c}{\nu}$ . Следовательно, длина волны фотона:  $\lambda_\phi = h/p_\phi$ . Де

Бройль постулировал, что частице с импульсом  $p = m\nu$  соответствует

длина волны:  $\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{m\nu}$ . Это соотношение (формула де Бройля) спра-

ведливо для любой частицы с импульсом  $p$ .

Вскоре гипотеза де Бройля была подтверждена в 1927-1928 гг. опытами К.Дэвиссона, Л.Джермер и Дж. Томсона по рассеянию электронов на кристаллах. Оказалось, что электроны, которые заведомо считались частицами, проходя через тонкие кристаллические пленки, создают такую же дифракционную картину, как и электромагнитные волны рентгеновского диапазона. Все это позволило датскому физiku Н. Бору выдвинуть *принцип дополнительности*, согласно которому в мире не существует «чистых» частиц и «чистых» волн. Все материальные объекты имеют двойственную природу – обладают *корпускулярно-волновым дуализмом*. В зависимости от характера проводимого эксперимента проявляются либо корпускулярный, либо волновой аспект наблюдаемого объекта. Например, при встрече с электроном свет взаимодействует с ним как частица и обладает при этом всеми признаками частицы (массой, импульсом, дискретной энергией), а проходя через малые отверстия, ведет себя как волна.

Позже П.С. Тартаковский и Г.Томсон исследовали прохождение быстрых электронов через тонкие металлические пленки. При этом на фотопластинках за этими пленками получалась такая же дифракционная картина, как при дифракции рентгеновских лучей на поликристаллах.

Микрочастицы, сочетая в себе свойства частицы и волны, ведут себя ни как волны, ни как частицы. Корпускулярно-волновому дуализму нет механической аналогии, и он не может быть представлен наглядно. Они не обладают одновременно определенными значениями координат и импульсом. Для частиц не имеет смысла понятия «траектория». Мы можем говорить, только о **вероятности** появления электрона в данной точке пространства. В классической механике состояние точки определены значением координат, импульса, энергии. Для характеристики микрочастиц мы пользуемся теми же переменными, но не может определить точные значения этих переменных. В.Гейзенберг, учитывая волновые свойства микрочастиц и связанные с волновыми свойствами ограничения в их поведении, пришел в 1927 г. к выводу, что объект микромира невозможно одновременно с любой наперед заданной точностью характеризовать и координатой и импульсом. Согласно *соотношению неопределенностей Гейзенбер-*



га, микрочастица не может иметь одновременно и определенную координату ( $x, y, z$ ), и определенную соответствующую проекцию импульса ( $p_x, p_y, p_z$ ), причем неопределенности этих величин удовлетворяют условиям:

$$\Delta x \Delta p_x \geq h, \Delta y \Delta p_y \geq h, \Delta z \Delta p_z \geq h,$$

где  $\Delta x, \Delta y, \Delta z$  – неопределенности координат частицы, а  $\Delta p_x, \Delta p_y, \Delta p_z$  – неопределенности компонент импульса. В квантовой теории рассматривается также соотношение неопределенностей для энергии  $E$  и времени  $t$ , т.е. неопределенности этих величин удовлетворяют условию

$$\Delta E \cdot \Delta t \geq h$$

где  $\Delta E$  – неопределенность энергии некоторого состояния системы,  $\Delta t$  – промежуток времени, в течение которого оно существует. Следовательно, система, имеющая среднее время жизни  $\Delta t$ , не может быть охарактеризована определенным значением энергии; разброс энергии  $\Delta E = h/\Delta t$  возрастает с уменьшением среднего времени жизни.

Соотношение неопределенности характеризует границы применимости классических представлений микрочастицам. Это соотношение позволяет объяснить целый ряд фактов, например, почему электрон не падает на ядро атома, позволяет оценить размеры простейшего атома и минимальную возможную энергию электрона в таком атоме.

## §25. Строение атома.

Первые попытки создания модели атома принадлежат У.Томсону. В 1902 г. У.Томсон (лорд Кельвин) предложил *кексовую модель*, согласно которой атом представляет собой сгусток положительно заряженной материи, внутри которого равномерно распределены электроны. Суммарный отрицательный заряд электронов равен положительному заряду шара, поэтому атом в целом нейтрален. Позднее было доказано, что представление о непрерывно распределенном внутри атома положительном заряде ошибочно.

Опыты, проведенные Э. Резерфордом с сотрудниками в 1910-1913 гг., показали, что атом имеет «ядерное» строение. Согласно Резерфорду атом представляет собой систему зарядов, в центре которой расположено тяжелое положительное ядро с зарядом  $Ze$ , имеющей размеры, не превышающие  $10^{-14}$  м, а вокруг ядра расположены  $Z$  электронов, распределенных по всему объему, занимаемому атомом. Почти вся масса атома сосредоточена в ядре.

Однако ядерная модель оказалась в противоречии с законами классической механики и электродинамики. Поскольку система неподвижных зарядов не может находиться в устойчивом состоянии, Э.Резерфорду

пришлось отказаться от статической модели атома и предположить, что электроны движутся вокруг ядра, описывая искривленные траектории. Но в этом случае электрон будет двигаться с ускорением, в связи с чем, согласно классической электродинамике, он должен непрерывно излучать электромагнитные (световые) волны и иметь сплошной спектр излучения. Процесс излучения сопровождается потерей энергии, так что электрон должен, в конечном счете, упасть на ядро. Из опыта известно, что атомы – это устойчивые образования, а спектр их излучения линейчатый, а не сплошной.

Для объяснения противоречий модели строения атома опытным фактам датский физик Нильс Бор в 1913 г. предложил теорию строения атома водорода, в основе которой лежат постулаты:

I. Атомы и атомные системы могут длительное время находиться в определенных состояниях, называемых *стационарными*, при этом атом не излучает и не поглощает энергию. Энергии стационарных состояний образуют дискретный ряд  $E_1, E_2, E_3, \dots$

II. Атомы излучают или поглощают энергию при переходе из одного стационарного состояния в другое, при этом квант излучаемой или поглощаемой энергии определяется соотношением:  $h\nu = E_n - E_m$ , где  $E_n, E_m$  – энергии стационарных состояний, между которыми произошел переход.

III. В атоме осуществляются такие орбиты электрона, для которых момент импульса кратен постоянной Планка:  $mvr = n\hbar$ , где  $n = 1, 2, 3$  – главное квантовое число, а  $\hbar$  – постоянная Планка.

Идея Бора о существовании в атомах стационарных состояний была подтверждена опытами Дж.Франка и Г.Герца. Но попытка построить аналогичную теорию для атома гелия потерпела неудачу. Теория Бора не была ни последовательно классической, ни последовательно квантовой теорией. Недостатки теории Бора были устранены путем создания новой квантовой теории, в которой поведение и движение микрочастиц подчиняется своим законам. Это было осуществлено при создании квантовой механики, поэтому теория Бора положило начало развитию квантовой теории строения атома.

В соответствии с этой теорией состояние электрона в атоме характеризуется четырьмя квантовыми числами. 1) *Главное квантовое число*:  $n = 1; 2; 3, \dots$  Оно определяет уровни энергии электрона в атоме. 2) *Орбитальное квантовое число*  $l$ , которое при данном  $n$  может принимать значения  $0, 1, 2, \dots, n-1$ . Это число определяет орбитальный момент импульса  $L_l = mvr$  электрона относительно ядра. 3) *Магнитное квантовое число*  $m_l$ , которое при данном  $l$  принимает значения  $0; \pm 1; \pm 2, \dots, \pm l$ ; всего  $2l + 1$  значений. Это число определяет проекции орбитального момента импульса электрона на некоторое произвольно выбранное направление  $Z$ .

4) *Спиновое* квантовое число  $m_s$ . Оно может принимать только два значения  $m_s = \pm 1/2$  и характеризует возможные значения проекции на ось Z спина (собственного механического момента импульса)  $L_s$  электрона. В 1924 г. швейцарский физик Паули сформулировал принцип, согласно которому: *в любом атоме не может быть двух электронов, находящихся в двух одинаковых стационарных состояниях, определяемых набором четырех квантовых чисел – главного  $n$ ; орбитального  $\ell$ ; магнитного  $m$  и спинового  $m_s$* . Этим принципом объясняется периодичность таблицы элементов Менделеева, так как электроны в атомах располагаются по определенным слоям и оболочкам. Электроны, входящие в состав одного слоя, имеют одно и то же главное квантовое число. Оказалось, что каждый период таблицы Менделеева начинается с заполнения электронами нового слоя. Физико-химические свойства элементов (валентность) и оптические свойства определяются числом и расположением самых внешних валентных электронов.

## § 26. Строение и свойства атомного ядра

Ядерная физика, занимающаяся изучением свойств и строения атомных ядер, является в настоящее время передним краем физической науки. Несмотря на то что данный раздел физики нельзя считать законченным и в нем остается много нерешенных проблем, достижения в этой области огромны и используются в медицине, биологии, энергетике и т.д.

В предыдущем параграфе ядро рассматривается в целом – как массивная положительно заряженная центральная часть атома, обладающая исключительно малыми размерами ( $\sim 10^{-13}$  см). Однако установлено, что ядро является сложным образованием. Оно состоит из частиц двух сортов: протонов (p) и нейтронов (n), называемых вместе **нуклонами**. **Протон** обладает положительным электрическим зарядом, численно равным заряду электрона. Масса  $m_p$  покоящегося протона в 1836 раз превышает массу  $m_e$  покоя электрона. Масса **нейтрона** лишь на  $3m_e$  превышает  $m_p$  ( $m_n \sim 1839 m_e$ ), при этом нейтроны не имеют электрического заряда. Обычно массу ядра измеряют в *атомных единицах массы* (а. е. м.). За 1 а. е. м. принята 1/12 массы изотопа углерода с массовым числом 12: 1 а.е.м. =  $(1,66043 \pm 0,00031) 10^{-27}$  кг. **Заряд** ядра, а следовательно и порядковый номер элемента в периодической таблице определяется числом протонов (Z), входящих в состав ядра, потому Z называется **зарядовым числом**. Ядра всех атомов заряжены положительно. Z может быть найден по порядковому номеру соответствующего элемента в таблице Менделеева. Полное число нуклонов в ядре  $A = N + Z$  (где N – число нейтронов)

называется **массовым числом**.  $A$  – это целое число, ближайшее к атомной массе атома.

Для обозначения ядер используется символическая запись:  ${}_Z X^A; {}_Z^A X$ .  $X$  – химический символ данного элемента. Нижний индекс у элемента означает порядковый номер  $Z$ , верхний – массовое число  $A$ . Некоторые элементы имеют несколько разновидностей, которые отличаются массовым числом, а  $Z$  для них постоянно, они называются *изотопы*. Например, известны четыре изотопа водорода:  ${}_1H^1$  – протий,  ${}_1H^2$  – дейтерий,  ${}_1H^3$  – тритий,  ${}_1H^4$  – четырехнуклонный водород. Самый тяжелый из естественных элементов – уран – имеет три изотопа:  ${}_{92}U^{233}$ ,  ${}_{92}U^{235}$ ,  ${}_{92}U^{238}$ .

Ядро представляет собой прочно связанную систему нуклонов, между которыми действуют *ядерные силы*. Они имеют весьма короткий радиус действия – порядка  $10^{-15}$  м и не зависят от заряда нуклона. Масса ядра меньше суммарной массы всех нуклонов, из которых это ядро состоит. Анализируя известное из теории относительности соотношение, связывающее энергию  $E$  и массу  $m$ :  $E = mc^2$ , можно заключить, что и энергия ядра меньше суммарной энергии нуклонов, из которых оно состоит.

Энергию, которую необходимо затратить для того, чтобы расчленить ядро на отдельные составляющие его нуклоны, не сообщая им кинетической энергии, называют *энергией связи*. В общем случае энергию связи можно выразить так:  $\Delta E_{св} = [(Zm_p + Nm_n) - m_я]c^2$ . Если учесть, что  $N = A - Z$ , то это выражение примет вид

$$\Delta E_{св} = [Zm_p + (A - Z)m_n - m_я]c^2.$$

В таблицах обычно приводятся не массы  $m_я$  ядер, а массы атомов  $m$ . Поэтому для энергии связи ядра пользуются формулой

$$\Delta E_{св} = [Zm_H + (A - Z)m_n - m]c^2,$$

где  $m_H$  – масса атома водорода.

Величина  $\Delta m = \frac{\Delta E_{св}}{c^2}$ :  $\Delta m = [Zm_p + (A - Z)m_n] - m_я$  называется

**дефектом масс** ядра. Она представляет собой разницу между суммарной массой нуклонов и массой ядра. На эту величину уменьшается масса всех нуклонов при образовании из них атомного ядра.

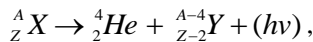
## §27. Радиоактивность ядер.

Каждый химический элемент имеет несколько изотопов, но не все они устойчивы. Некоторые изотопы нестабильны и самопроизвольно превращаются в изотопы других элементов с испусканием элементарных частиц и легких ядер. Это явление называется радиоактивностью. Радиоактивный распад был открыт в 1896 г. А.Беккерелем. Большой вклад в решение проблемы радиоактивности внесли Э.Резерфорд, супруги П. Кюри и М.Склодовская-Кюри.

Радиоактивность обусловлена тем, что ядерные силы обладают очень коротким радиусом действия. Они связывают друг с другом только ближайшие нуклоны, поэтому с ростом числа нуклонов их связь ослабевает и ядра становятся радиоактивными. Анализируя таблицу элементов, можно видеть, что в легких устойчивых ядрах число протонов и нейтронов практически одинаково, тогда как стабильные изотопы тяжелых элементов содержат большее число нейтронов. Самым тяжелым из стабильных элементов является свинец.

При своем распаде ядра могут испускать радиоактивное излучение трех типов. В соответствии с этим рассматривают  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  – распад.

При  **$\alpha$ -распаде** ядро испускает  $\alpha$ -частицу, которая представляет собой ядро изотопа гелия  ${}_2\text{He}^4$ .  $\alpha$ -излучение отклоняется электрическим и магнитным полями, обладает высокой ионизирующей способностью и малой проникающей способностью (например, поглощаются слоем алюминия толщиной примерно 0,05 мм). Скорость  $\alpha$ -частиц  $v_\alpha \approx 10^7$  м/с. Если символом  ${}_Z^AX$  обозначить материнское ядро, то превращение ядра при  $\alpha$ -распаде происходит по схеме:



где  ${}_{Z-2}^{A-4}Y$  – символ дочернего ядра.  $\alpha$ -распад уменьшает массовое число на 4, а заряд ядра – на 2 элементарных положительных заряда, то есть происходит *перемещение* химического элемента на две клетки *влево* в периодической системе элементов Менделеева. Например,  ${}_{88}^{226}\text{Ra} \rightarrow {}_2^4\text{He} + {}_{86}^{222}\text{Rn}$ .

**$\beta$ -Распад** сопровождается испусканием электронов ( $\beta$ -лучи), которые при этом имеют огромные скорости, близкие к скорости света.  $\beta$ -Излучение отклоняется электрическим и магнитным полями; его ионизирующая способность значительно меньше (примерно на два порядка), а проникающая способность гораздо больше (поглощается слоем алюминия толщиной примерно 2 мм), чем у  $\alpha$ -частиц.  $\beta$ -Излучение сильно рассеива-

ется в веществе. Массовое число при  $\beta$ -распаде не изменяется, а зарядовое число увеличивается на единицу:  ${}^A_Z X \rightarrow {}^A_{-1} e + {}^A_{Z+1} Y$ .

Следовательно, новый химический элемент *перемещается* на одну клеточку *вправо* в периодической системе Менделеева.

**$\gamma$ -Распад** сопровождается коротковолновым электромагнитным излучением с чрезвычайно малой длиной волны  $\lambda < 10^{-10}$  м и вследствие этого – ярко выраженными корпускулярными свойствами, т.е.  $\gamma$ -излучение является потоком частиц –  $\gamma$ -квантов (фотонов).  **$\gamma$ -Излучение** не отклоняется электрическим и магнитным полями, обладает относительно слабой ионизирующей способностью и очень большой проникающей способностью (например, проходит через слой свинца толщиной 5 см), при прохождении через кристаллы обнаруживает дифракцию.

Установлено, что все существующие в природе радиоактивные элементы являются продуктами распада четырех исходных элементов:  ${}^{235}_{92}U$ ;  ${}^{238}_{92}U$ ;  ${}^{237}_{92}Np$ ;  ${}^{234}_{90}Th$ . Процессы их радиоактивного распада заканчиваются соответственно образованием  ${}^{206}_{82}Pb$ ;  ${}^{207}_{82}Pb$ ;  ${}^{208}_{82}Pb$ ;  ${}^{209}_{83}Bi$ . Помимо естественных радиоактивных элементов, принадлежащих тому или иному радиоактивному ряду, можно искусственным путем получить радиоактивные изотопы стабильных элементов. Например, при облучении  ${}^{27}_{13}Al$   $\alpha$ -частицами получается радиоактивный фосфор ( ${}^{30}_{13}Al$ ), аналогично из  ${}^{22}_{12}Al$  можно получить радиоактивный кремний.

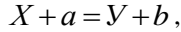
Распад естественных и искусственных радиоактивных элементов осуществляется по одному закону. Опыт показывает, что количество радиоактивных атомов  $N(t)$  убывает со временем по экспоненциальному закону:

$$N = N_0 e^{-\lambda t}$$

где  $\lambda$  – постоянная радиоактивного распада, характерная для каждого вещества. Она численно равна обратной величине времени, за которое число радиоактивных атомов уменьшается в  $e$  раз. На практике чаще пользуются не постоянной распада, а **период полураспада**  $T$ , т.е. временем, в течение которого число радиоактивных ядер в среднем уменьшается вдвое. Значения  $T$  для различных изотопов лежат в очень широких пределах: от  $10^{-16}$  с до миллиардов лет. На законе радиоактивного распада основан способ определения возраста земных пород, остатков растений, организмов и т.п.

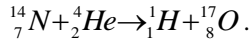
## § 28. Ядерные реакции.

*Ядерными реакциями* называется искусственное превращение атомных ядер при их взаимодействии как друг с другом, так и с ядерными частицами, в результате чего образуются новые ядра и новые частицы. Символически ядерную реакцию можно записать:

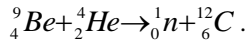


где  $X$  и  $Y$  – исходное и конечное ядра,  $a$  и  $b$  – исходная и конечная частицы в реакции.

Первая в истории ядерная реакция осуществлена Э.Резерфордом (1919) при бомбардировке ядра азота  $\alpha$ -частицами:

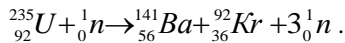


Другой пример ядерных реакций – реакция получения нейтронов:



Наиболее распространенными ядерными реакциями являются реакции деления тяжелых ядер и синтеза легких.

Реакция деления ядер урана при бомбардировке их нейтронами была открыта в 1939 г. О.Ганом и Ф.Штрассманом и сразу же объяснена О.Фришем и Л.Мейтнер. Было установлено, что при облучении ядер урана  ${}^{235}_{92}\text{U}$  нейтронами образуются элементы из середины периодической таблицы (чаще всего Ва и Кг), а также два или три нейтрона на каждое распавшееся ядро. Реакцию деления ядра  ${}^{235}_{92}\text{U}$  можно записать, например, так:



При делении одного ядра урана освобождается около 200 МэВ энергии: на кинетическую энергию движения ядер-осколков приходится примерно 165 МэВ, остальную энергию уносят  $\gamma$ -кванты. Выход энергии при делении всех ядер 1 кг урана составляет 80 тысяч миллиардов джоулей. Деление ядер сопровождается испусканием двух-трех вторичных нейтронов, называемых *нейтронами деления*. В среднем на один акт деления приходится 2,5 нейтронов.

Практический интерес представляет случай самоподдерживающейся реакции деления. Такая реакция возможна, поскольку каждый нейтрон, выделившийся при делении одного ядра урана в принципе может вызвать деление другого ядра. Число актов деления возрастает лавинообразно – возникает **цепная реакция**. Схематически этот процесс представлен на рис. 28.1. Цепная реакция мо-

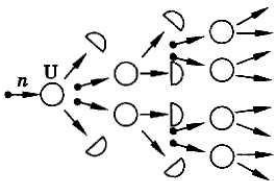
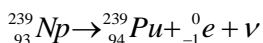
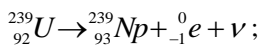
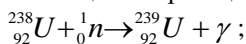


Рис.28.1.

жет быть управляемой и неуправляемой. Неуправляемая реакция осуществляется при взрыве атомной бомбы. Поскольку многие нейтроны покидают делящееся вещество прежде, чем встретятся с ядрами урана, для получения атомного взрыва нужно иметь достаточно большое количество делящегося вещества (достичь *критической массы*) с тем, чтобы максимально возможное число нейтронов провзаимодействовало с ядрами. Цепную реакцию можно сделать управляемой, если на пути нейтронов поместить поглотитель (кадмий или бор). Погружая или вынимая из делящегося вещества поглотитель, можно регулировать размножение нейтронов и тем самым управлять скоростью цепной реакции. Управляемые цепные реакции осуществляются в ядерных реакторах, являющихся основной частью энергетических атомных установок (атомных электростанций, двигателей атомных подводных лодок и др.).

Наиболее благоприятно деление ядер  ${}_{92}^{235}\text{U}$  происходит под действием медленных нейтронов. Природный уран состоит в основном из  ${}_{92}^{238}\text{U}$  и содержит лишь 0,7% изотопа  ${}_{92}^{235}\text{U}$ . В уране-238 медленные нейтроны не вызывают цепной реакции, а приводят к следующим превращениям:



Конечный продукт этих превращений — изотоп плутония  ${}_{94}^{239}\text{Pu}$  имеет период полураспада 24100 лет, т. е. достаточно стабилен. Облучение  ${}_{94}^{239}\text{Pu}$ , как и  ${}_{92}^{238}\text{U}$ , медленными нейтронами вызывает цепную реакцию, т. е. плутоний также является хорошим ядерным топливом. В большинстве ядерных реакторов используется природный  $\text{U}^{238}$ , обогащенный до 5%  $\text{U}^{235}$ , поэтому каждый такой реактор является попутно накопителем  $\text{Pu}^{239}$ .

Впервые ядерные реакции для получения промышленной электроэнергии были использованы в СССР. Огромная роль в развитии ядерной энергетики принадлежит нашему замечательному физика И.В. Курчатову.

Ядерная энергия освобождается не только в ядерных реакциях деления тяжелых ядер, но и в реакциях соединения легких атомных ядер. Для соединения одноименно заряженных протонов необходимо преодолеть кулоновские силы отталкивания, что возможно при достаточно больших скоростях сталкивающихся частиц. Синтез гелия из легкого изотопа водорода происходит при температурах  $T \approx 10^8$  К, а для синтеза гелия из тяжелых изотопов водорода дейтерия и трития — по схеме  ${}^3_1\text{H} + {}^2_1\text{H} \rightarrow {}^4_2\text{He} + {}^1_0n$  требуется нагревание примерно до  $5 \cdot 10^7$  К.



Реакция синтеза легких атомных ядер в более тяжелые, происходящие при сверхвысоких температурах, называются *термоядерными реакциями*. Термоядерные реакции дают наибольший выход энергии на единицу массы «топлива». Например, при синтезе 1 г гелия из дейтерия и трития выделяется энергия  $4,2 \cdot 10^{11}$  Дж. Такая энергия выделяется при сжигании 10 тонн дизельного топлива.

## § 29. Некоторые сведения об элементарных частицах.

Иерархическая пирамида строения вещества выглядит так. Все вещества состоят из молекул; молекулы – из атомов; атомы построены из электронов и ядер; ядра – из протонов и нейтронов. Но электроны, протоны и нейтроны уже нельзя представить «состоящими из» каких-либо других отдельно существующих частиц, поэтому их называют *элементарными частицами*. Однако термин «элементарная частица» указывает только на то, что по современным представлениям эти частицы не обладают какой-либо внутренней структурой, но совсем не означает, что свойства таких частиц просты (элементарны). Наоборот элементарные частицы обладают весьма сложными и многообразными свойствами, претерпевают различные превращения. В настоящее время открыто свыше 300 элементарных частиц. Некоторые из них (электрон, протон, нейтрон, фотон, нейтрино) устойчивы и составляют большую часть материального мира. Другие же встречаются лишь в космическом излучении или получены искусственным путем в мощных ускорителях и имеют очень малое время жизни. В настоящем пособии не представляется возможным изложить сколь-нибудь полно современные представления об элементарных частицах, тем более что многие из этих представлений только складываются и свойства элементарных частиц до конца еще не изучены.

На сегодняшний день физики классифицируют элементарные частицы по тем или иным признакам, отыскивают общие свойства, позволяющие объединить их в более или менее крупные группы. Одна из возможных классификаций в ее самом общем виде приведена в таблице.

При классификации учитывают такие свойства частиц, как электрический заряд, масса покоя, спин и др. Элементарные частицы могут иметь положительный или отрицательный электрический заряд, равный по величине заряду электрона (элементарный заряд), либо вовсе не иметь заряда. Например, заряд протона (+1), заряд нейтрона (0), заряд л-мезонов ( $\pm 1$ ) и (0) и т. д. Элементарных частиц с зарядом, превышающим единицу, не найдено.

АДРОНЫ (частицы, вступающие в сильное взаимодействие с участием $\pi$ -мезонов)	Барионы	Гипероны ( $\Lambda, \Sigma, \Xi, \Omega$ )
		Нуклоны ( $n, p$ )
	Мезоны	К-мезоны
		$\pi$ -мезоны
ЛЕПТОНЫ (частицы, вступающие в слабое взаимодействие)	Мюонное семейство	$\mu$ -мезоны
		мезонное нейтрино ( $\nu_\mu$ )
	Электронное семейство	электроны ( $e$ )
		электронное нейтрино ( $\nu_e$ )
ФОТОН	Квант электромагнитного излучения	

По величине массы покоя элементарные частицы можно классифицировать так: 1) фотон (масса покоя равна нулю), 2) лептоны (масса покоя составляет от одной до сотен электронных масс), 3) мезоны (масса покоя имеет промежуточное значение между массами лептонов и нуклонов), 4) барионы (масса покоя равна или превышает массу покоя нуклонов).

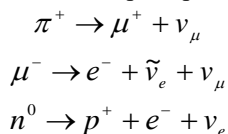
Спин – собственный механический момент импульса элементарной частицы – в ядерной физике измеряется в единицах  $\hbar$ . Он может быть равен 0 (мезоны),  $\hbar/2$  (электрон, нуклоны, гипероны),  $1\hbar$  (фотон). Кроме того, предполагают, что спин  $\Omega$ -гиперона равен  $3\hbar/2$ .

**Античастицы.** П.Дирак в 1928–1931 гг. теоретически предсказал существование *античастиц*. Они должны иметь массу, тождественную массе соответствующих частиц и противоположные другие параметры (заряд, спин и т. д.). В 1933 г. К.Андерсон открыл первую античастицу – антиэлектрон, которую назвали *позитроном*. В настоящее время почти у каждой частицы обнаружена античастица. Более того, получены даже ядра атомов антиводорода и антигелия. Это наводит на мысль, что во Вселенной возможно существование антивещества, скажем в виде антигалактик. Установить принадлежность далеких галактик к веществу или антивеществу очень сложно, так как квант электромагнитного излучения (фотон) – основной источник информации о них – тождественен антифотону. Встреча вещества с антивеществом явилась бы катастрофой. Дело в том, что при столкновении частицы и античастицы происходит *аннигиляция* – обе частицы перестают существовать как таковые и превращаются в другие частицы, главным образом в фотоны:  $e^- + e^+ \rightarrow 2\gamma$ ,

По закону сохранения энергии энергия двух образующихся фотонов равна энергии покоя исходных частиц:  $2\hbar\omega = 2m_0c^2$ , откуда ясно, что аннигиляция сопровождается выделением колоссальной энергии. Эффективность такой реакции примерно в  $10^3$  раз выше, чем термоядерного

синтеза. Имеет место и обратный процесс: при взаимодействии фотона с веществом может образоваться пара частица – античастица. Естественно, энергия фотона при этом должна быть не меньше энергии покоя двух обрзающихся частиц:  $\hbar\omega \geq 2m_0c^2$ .

Помимо рассмотренных выше реакций возможны и многие другие превращения элементарных частиц. Например:



В заключение следует сказать, что физика элементарных частиц еще далека от завершения и в настоящее время многие ее разделы интенсивно развиваются.

## ВОПРОСЫ

### *для самопроверки и подготовки к тестированию по теме 5.*

1. Что называется тепловым излучением и каковы его характеристики?
2. Сформулировать закон Кирхгофа для теплового излучения.
3. Сформулировать закон Стефана-Больцмана.
4. Сформулировать закон смещения Вина.
5. Что такое «ультрафиолетовая катастрофа»?
6. В чем заключается гипотеза Планка?
7. По какой формуле можно определить энергию фотона?
8. Как соотносятся энергии фотонов, соответствующих красному и фиолетовому свету?
9. Какой скоростью и какой массой покоя обладает фотон?
10. Что такое внешний фотоэффект?
11. Какой должна быть энергия кванта света, чтобы был возможен фотоэффект?
12. Как отличается давление света на черную поверхность по сравнению от давления на белую поверхность?
13. Что подтвердили опыты по рассеянию рентгеновских лучей Комптона?
14. В чем суть гипотезы де-Бройля?
15. Электрону присуща двойственная природа. Что это означает?
16. Как записывается соотношения неопределенностей Гейзенберга?
17. Что означает соотношение неопределенностей Гейзенберга?

18. Согласно чьей модели атом представляет собой равномерно заполненный положительный электрический шар, внутри которого находятся электроны?

19. Кем была предложена планетарная (ядерная) модель строения атома?

20. Какую модель атома предложил Резерфорд?

21. Как ведет себя атом, находясь в стационарном состоянии?

22. Согласно первому постулату Бора, атомы и атомные системы могут длительное время находиться в определенных состояниях, при этом атом ...

23. Что означает  $Z$  в обозначении ядра  ${}_Z X^A$ ?

24. Что означает  $A$  в обозначении ядра  ${}_Z X^A$ ?

25. Количеством каких частиц определяется заряд ядра атома?

26. Количеством каких частиц определяется массовое число ядра атома?

27. Как называют элементы, которые отличаются массовым числом и имеют одинаковый порядковый номер?

28. Какие частицы называются изотопами?

29. Как называют энергию, которую необходимо затратить для того, чтобы расчленить ядро на отдельные составляющие его нуклоны?

30. Что представляет собой дефект масс?

31. Что представляет собой  $\alpha$ -излучение?

32. Что представляют собой  $\beta$ -излучение?

33. Что представляет собой  $\gamma$ -излучение?

34. Как смещается при  $\alpha$ -распаде дочернее ядро в периодической таблице элементов?

35. Как смещается при  $\beta$ -распаде дочернее ядро в периодической таблице элементов?

36. Сформулировать закон радиоактивного распада.

37. Что такое ядерные реакции?

38. Что происходит при облучении нейтронами ядра урана  ${}^{235}\text{U}$ ?

39. Как называется лавинообразное нарастание числа актов деления тяжелых ядер?

40. Как называется реакция синтеза легких атомных ядер в более тяжелые, происходящие при сверхвысоких температурах?

41. По каким признакам классифицируют элементарные частицы.

42. Какие частицы называют адронами, лептонами?

43. Что такое спин?

44. Что такое античастица?

45. Записать пример аннигиляции электрон-позитронной пары.

## ЗАДАЧИ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО РЕШЕНИЯ ПО ТЕМЕ 5

5.1. Определите энергию одного фотона: а) для красного света ( $\lambda=600$  нм); б) для жестких рентгеновских лучей ( $\lambda=0,01$  нм).

5.2. Найти энергию, массу и импульс фотона, если соответствующая ему длина волны 1,6 пм.

5.3. Каков импульс фотона, энергия которого равна  $6 \cdot 10^{-19}$  Дж?

5.4. Работа выхода электрона из калия равна  $3,2 \cdot 10^{-19}$  Дж. Будет ли наблюдаться фотоэффект при освещении калия светом с длиной волны 0,7 мкм?

5.5. Определить красную границу фотоэффекта для калия, если работа выхода равна 2,2 эВ.

5.6. С какой скоростью должен двигаться электрон, чтобы его кинетическая энергия была равна энергии фотона с длиной волны  $\lambda=520$  нм?

5.7. Максимальная энергия фотоэлектронов, вылетающих из рубидия при его освещении ультрафиолетовыми лучами с длиной волны 317 нм, равна  $2,84 \cdot 10^{-19}$  Дж. Определите работу выхода и красную границу фотоэффекта для рубидия.

5.8. Найти длину волны электрона, летящего со скоростью  $10^8$  см/с.

5.9. Протон летит со скоростью  $4,6 \cdot 10^4$  м/с. Какая длина волны соответствует этому протону?

5.10. Неопределенность скорости электронов, движущихся вдоль оси абсцисс, составляет  $\Delta v=10^2$  м/с. Какова при этом неопределенность координаты  $x$ , определяющей местоположение электрона?

5.11. Неточность при измерении координаты электрона, движущегося по прямолинейной траектории, равна  $10 \text{ \AA}$ . Рассчитайте неточность в определении: а) импульса; б) скорости; в) кинетической энергии этого электрона.

5.12. Время существования возбужденного состояния ядер имеет порядок  $10^{12}$  с. Какова неопределенность энергии  $\Delta E$  квантов, испускаемых ядрами?

5.13. На сколько изменилась энергия электронов в атоме водорода при излучении фотона с длиной волны  $4,8 \cdot 10^{-7}$  м?

5.14. Определить длину волны излучения при переходе атома водорода из одного энергетического состояния в другое. Разница в энергиях этих состояний 1,89 эВ.

5.15. Найти число протонов и нейтронов, входящих в состав ядер трех изотопов магния: 1)  $\text{Mg}_{12}^{24}$ , 2)  $\text{Mg}_{12}^{25}$ , 3)  $\text{Mg}_{12}^{26}$ .

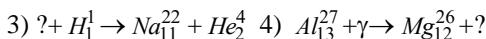
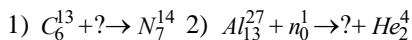
5.16. Определить дефект массы и энергию связи ядра атома тяжелого водорода  $H_1^2$ . Его атомная масса 2,01410 а.е.м., масса протона  $m_{\text{прот}} = 1,00728$  а.е.м.

5.17. Протактиний  $Pa_{91}^{231}$   $\alpha$ -радиоактивен. Определить, какой элемент получится с помощью этого распада.

5.18. В какой элемент превращается  $U_{92}^{239}$  после двух  $\beta$ -распадов и одного  $\alpha$ -распада?

5.19. В результате захвата  $\alpha$ -частицы ядром изотопа  $N_7^{14}$  образуется неизвестный элемент и протон. Написать реакцию и определить неизвестный элемент.

5.20. Написать недостающие обозначения в ядерных реакциях:



### **ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО ИЗУЧЕНИЯ ПО ТЕМЕ 5**

1. *Источники теплового излучения, применяемые для лечебных целей.*
2. *Теплоотдача организма. Термография*
3. *Уравнение Шредингера.*
4. *Спектр атома водорода. Электронные переходы в атомах.*
5. *Механизмы образования межатомных связей*
6. *Характеристическое рентгеновское излучение. Дозиметрия.*
7. *Лазеры.*
8. *Природа ядерных сил.*
9. *Элементарные частицы и их классификация.*
10. *Радиационная безопасность и защита от ионизирующих излучений.*
11. *Влияние радиоактивных излучения на биологические системы.*
12. *Использование радиоактивных излучений в биологии.*

**ОТВЕТЫ**  
**К ЗАДАЧАМ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО РЕШЕНИЯ**

**1.4.** 10 Н. **1.5.** 4 см. **1.6.** 1,44 мН. **1.7.** 2 нКл, 4 нКл. **1.8.** 0,58 мН.  
**1.9.** 500 кВ/м. **1.10.** 1,8 мН. **1.11.** 600 В/м **1.12.** 200 В/м. **1.13.** 170 В/м.  
**1.14.**  $\epsilon=81$  (вода). **1.15.** 1,8 кВ. **1.16.** -324 нДж **1.17.** 60 Мм/с. **1.18.** 0,2 м.  
**1.19.** 0,5 мкФ. **1.20.** 58,85 нФ. **1.21.** 53 мкм. **1.22.** а) 0,33 мкФ, б) 0,5 мкФ,  
в) 2 мкФ. **1.23.**  $q_1 = q_2 = 8$  мкКл,  $U_1 = 4$  В,  $U_2 = 2$  В. **1.24.** 0,05 Дж.  
**1.25.** 50 нДж.

**2.1.**  $q = 0,5I\tau = 50$  Кл. **2.2.**  $l = 500$  м,  $d = 1$  мм. **2.3.** 5,4 В. **2.4.**  $6,9 \cdot 10^6$  А/м<sup>2</sup>.  
**2.5.** 6 Ом, 0,67 Ом, 3 Ом. **2.6.**  $R_1 = 3$  Ом,  $I_2 = 0,75$  А,  $I_3 = 0,25$  А. **2.7.** 4 А, 10А,  
6,25 А, 2,5 А, 1,25 А. **2.8.** 3,7 В, 0,2 Ом. **2.9.** Сопротивление первой лампы  
в 1,67 раз больше сопротивления второй. **2.11.** 8 Дж.

**3.1.**  $5 \cdot 10^{-7}$  Тл. **3.2.**  $B_1 = 1,5 \cdot 10^{-4}$  Тл,  $B_2 = 2 \cdot 10^{-4}$  Тл,  $B_3 = 1,7 \cdot 10^{-4}$  Тл.  
**3.3.**  $B_1 = 2,5 \cdot 10^{-4}$  Тл,  $B_2 = 0$  Тл,  $B_3 = 2,3 \cdot 10^{-4}$  Тл. **3.4.** 26 Н, 13 Н. **3.5.** 1кН.  
**3.6.**  $\pi/6$  рад. **3.7.**  $\pi/2$  рад. **3.8.** 5 мВб. **3.9.**  $3,2 \cdot 10^{-14}$  Н. **3.10.** 37 Мм/с, 3900 эВ.  
**3.11.**  $R_1/R_2 = m_1/m_2 = 1840$ . **3.12.** 0,5 В. **3.13.** 2,5 мс. **3.14.** 30 В. **3.15.** 2,15 В.  
**3.16.** 0,2 Гн. **3.17.** 2 А. **3.18.** 3 А. **3.19.** 0,44 с. **3.20.**  $5 \cdot 10^{-11}$  Ф. **3.21.** 50 м.

**4.1.** 60 см. **4.2.**  $56^\circ 22'$  **4.3.**  $d_a/d_c = n_c/n_a = 0.62$ . **4.4.**  $63^\circ$   
**4.5.**  $0,67c = 2,02 \cdot 10^8$  м/с. **4.7.** 1,88 м. **4.10.** 1,25 Дптр, 0,4 Дптр, 5 Дптр.  
**4.11.** 0. **4.12.** 30 см. **4.13.** 30 см, 0,6 см. **4.14.** 2,4 Дптр, на расстоянии 0,5 м  
от линзы. **4.15.** 300,8 нм. **4.16.**  $2,26 \cdot 10^8$  м/с. **4.17.** 3. **4.18.** 15. **4.19.**  $54^\circ 44'$ .  
**4.20.**  $37^\circ$ . **4.21.**  $45^\circ$

**5.1.** а)  $\epsilon \approx 2$ эВ; б)  $\epsilon \approx 12,4$  эВ. **5.2.**  $\epsilon = 1,15 \cdot 10^{-13}$  Дж,  $m = 1,38 \cdot 10^{-30}$  кг,  
 $\rho = 4,1 \cdot 10^{-22}$  кг.м/с. **5.3.**  $2 \cdot 10^{-11}$  кг.м/с. **5.4.**  $\lambda_{\text{маг}} = 0,6222 \cdot 10^{-6}$  м  $< 0,7 \cdot 10^{-6}$  м, нет.  
**5.5.** 564 нм. **5.6.** 1,4 км/с. **5.7.**  $A_{\text{вых}} = 3,43 \cdot 10^{-19}$  Дж = 2,14 эВ;  $\lambda_{\text{кр}} = 579$  нм.  
**5.8.** 0,73 нм. **5.9.**  $8,62 \cdot 10^{-13}$  м. **5.10.**  $\Delta x \geq h/m\Delta v$ ;  $\Delta x \geq 7,3 \cdot 10^{-6}$  м.  
**5.11.** а)  $6,63 \cdot 10^{-25}$  кг.м/с; б)  $7,22 \cdot 10^5$  м/с, в)  $3,78 \cdot 10^{-20}$  Дж. **5.12.**  $4,14 \cdot 10^{-3}$  эВ.  
**5.13.**  $4,14 \cdot 10^{-19}$  Дж = 2,59 эВ. **5.14.**  $6,57 \cdot 10^{-7}$  м. **5.16.** 0,00240 а.е.м. 2,23 МэВ.  
**5.18.**  $U_{\alpha}^{235}$  **5.19.** изотоп  $O_8^{17}$ . **5.20.** 1)  $H_1^1$ , 2)  $Na_{11}^{24}$ , 3)  $Mg_{12}^{25}$ , 4)  $H_1^1$ .

## СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

### *а) основная литература:*

1. Бордовский Г.А. Физические основы естествознания. – М.: Дрофа, 2004.
2. Зисман Г.А., Годес О.М. Курс общей физики. Т.1–Т.3–М.: Наука, 1974.
3. Ремизов А.Н., Потапенко А.Я. Курс физики. – М.: Дрофа, 2002.
4. Трофимова Т.И. Курс физики. – М.: Высшая школа, 2000.
5. Волькенштейн В.С. Сборник задач по физике. - М.: Наука, 1985.
6. Чертов А.Г., Воробьев А.А. Задачник по физике. - М.: Изд-во Физико-математической литературы, 2006.

### *б) дополнительная литература:*

1. Дмитриева В.Ф., Прокофьев В.Л. Основы физики. – М.: Высшая школа, 2001.
2. Кибец И.Н., Кибец В.И. Физика: Справочник. – Харьков: Фолио; Ростов-на-Дону:Феникс, 1997.
3. Макаренко Г.М. Физика. Т.1.–Мн.: ДизайнПРО, 1997.
4. Трофимова Т.И., Павлова З.Г. Сборник задач по курсу физики. –М.: Высшая школа, 1999.
5. Яворский Б.М., Детлаф А.А. Физика. – М.: Дрофа, 1999.
6. Гельфгат И.М., Генденштейн Л. Э., Кирик Л. А. 1001 задача по физике. – М.: «Илекса», 2001.



## СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие. . . . .	3
<b>ТЕМА 1. ЭЛЕКТРОСТАТИКА</b>	
1. Закон сохранения электрического заряда. Закон Кулона. Диполь. . . . .	3
2. Электростатическое поле. Напряженность электростатического поля. . . . .	5
3. Работа перемещения заряда в электростатическом поле. Потенциал поля. Разность потенциалов. . . . .	7
4. Связь между напряженностью и потенциалом. . . . .	8
5. Проводники и диэлектрики в электрическом поле . . . . .	9
6. Емкость. Конденсаторы. Энергия электростатического поля. . . . .	12
<i>Вопросы для самопроверки и подготовки к тестированию по теме 1</i> . . . . .	14
<i>Задачи для самостоятельного решения по теме 1.</i> . . . . .	15
<i>Вопросы для самостоятельного изучения по теме 1.</i> . . . . .	17
<b>Тема 2. ПОСТОЯННЫЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК</b>	
7. Электрический ток и его характеристики. Закон Ома для участка цепи. . . . .	18
8. Соединения проводников. Закон Ома для неоднородного участка цепи. . . . .	20
. . . . .	
9. Работа и мощность электрического тока. Закон Джоуля–Ленца. . . . .	21
<i>Вопросы для самопроверки и подготовки к тестированию по теме 2</i> . . . . .	22
<i>Задачи для самостоятельного решения по теме 2.</i> . . . . .	24
<i>Вопросы для самостоятельного изучения по теме 2.</i> . . . . .	24
<b>Тема 3. МАГНИТНОЕ ПОЛЕ. ЭЛЕКТРОМАГНЕТИЗМ.</b>	
10. Магнитное поле в вакууме. Магнитный момент контура с током. Магнитная индукция. . . . .	25
11. Закон Ампера. Работа в магнитном поле. . . . .	26
12. Действие магнитного поля на движущиеся заряды. Сила Лоренца. . . . .	28
13. Магнитное поле в веществе. Диа-, пара- и ферромагнетики. . . . .	30
14. Явление электромагнитной индукции. Энергия магнитного поля . . . . .	32
15. Электромагнитные колебания и волны. . . . .	34
<i>Вопросы для самопроверки и подготовки к тестированию по</i>	

<i>теме 3</i> .....	37
<i>Задачи для самостоятельного решения по теме 3</i> .....	39
<i>Вопросы для самостоятельного изучения по теме 3</i> .....	40
<b>Тема 4. ЭЛЕМЕНТЫ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ И ВОЛНОВОЙ ОПТИКИ</b> .....	
16. Основные законы оптики. ....	41
17. Тонкие линзы. Формула тонкой линзы. Построение изображений в линзах. ....	43
18. Волновая природа света. Интерференция света .....	46
19. Принцип Гюйгенса – Френеля. Дифракция в параллельных лучах. ....	48
20. Поляризация света. ....	50
21. Взаимодействие света с веществом. ....	52
<i>Вопросы для самопроверки и подготовки к тестированию по теме 4</i> .....	54
<i>Задачи для самостоятельного решения по теме 4</i> .....	57
<i>Вопросы для самостоятельного изучения по теме 4</i> .....	58
<b>Тема 5. КВАНТОВАЯ И АТОМНАЯ ФИЗИКА</b>	
22. Недостатки волновой теории света. ....	59
23. Квантовые свойства света .....	61
24. Корпускулярно-волновой дуализм и гипотеза де Бройля. Соотношение неопределенностей Гейзенберга.....	63
25. Строения атома.. ....	65
26. Строение и свойства атомного ядра .....	67
27. Радиоактивность ядер. ....	69
28. Ядерные реакции. ....	71
29. Некоторые сведения об элементарных частицах. ....	73
<i>Вопросы для самопроверки и подготовки к тестированию по теме 5</i> .....	75
<i>Задачи для самостоятельного решения по теме 5</i> .....	77
<i>Вопросы для самостоятельного изучения по теме 5</i> .....	78
<i>Ответы к задачам для самостоятельного решения</i> .....	79
<i>Список рекомендуемой литературы</i> .....	80

Сабирова Файруза Мусовна

**Физика. Часть 2.**

**Электричество и магнетизм. Оптика. Квантовая физика**  
Учебно-методическое пособие по физике для студентов  
биологического факультета.

-----

Сдано в печать 18.12.2008 г. Формат 84x108/82. Объем 5 п.л. Тираж 300 экз.  
Отпечатано 14.01.2009 г. Типография ЕГПУ.  
Издательство ЕГПУ. 423600, г.Елабуга, ул.Казанская, 89.