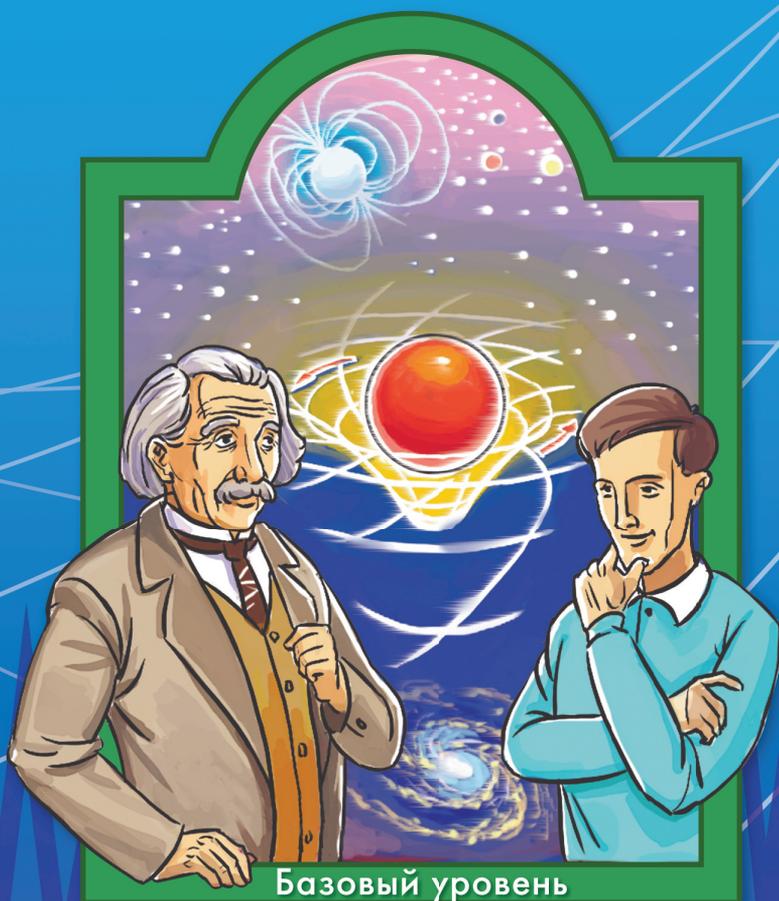


Федеральный государственный образовательный стандарт

С.М. Андрюшечкин

ФИЗИКА

11 класс



Базовый уровень

Издатель
С. М. Андрюшечкин

Федеральный государственный образовательный стандарт

С. М. Андрюшечкин

ФИЗИКА

11 класс

Базовый уровень

ИЗДАТЕЛЬ

С. М. АНДРЮШЕЧКИН

2021

УДК 373.167.1:53
ББК 22.3я721
А65

Андрюшечкин, С. М.

А65 Физика. 11 кл. : учебник для организаций, осуществляющих образовательную деятельность. Базовый уровень. – Издание 2-е, исправленное / С. М. Андрюшечкин. – Издатель С. М. Андрюшечкин, 2021. – 272 с.

ISBN 978-5-6046327-1-0

Учебник предназначен для учащихся 11-го класса общеобразовательных учреждений. Соответствует Федеральному государственному стандарту основного общего образования.

Учебник позволяет организовать изучение курса физики на основе деятельностного подхода, используя в качестве одного из основных методов проблемное обучение.

УДК 373.167.1:53
ББК 22.3я721

Данный учебник в целом и никакая его часть не могут быть скопированы без разрешения владельца авторских прав.

ISBN 978-5-6046327-1-0

© Андрюшечкин С. М., 2021

Как работать с учебником

Зачем мы будем учиться? В одиннадцатом классе вы завершаете изучение школьного курса физики. «Физика-11» – это систематизация ваших знаний по вопросам, связанным с колебательными и волновыми явлениями, изучение физической оптики, расширение ваших знаний по квантовой, атомной и ядерной физике.

Тем самым физика как учебный предмет позволяет вам

- формировать современное научное мировоззрение и целостную картину мира,
- выработать системный взгляд на мир, взаимосвязь природных явлений,
- овладеть научными методами познания от возникновения проблемы до создания физической модели явления и её проверки,
- развить способности к познавательной деятельности и предоставляет поле деятельности для их применения.

В процессе изучения физики вы приобретаете умения, необходимые всем и всегда, пригодные для достижения многих жизненных целей, – универсальные умения. Такие умения формируются при выполнении различных заданий, обозначенных в учебнике кружками и фоном условных знаков различного цвета.

Каждый цвет соответствует определённой группе умений:

-   – задания учат организовывать свою деятельность: ставить цели, планировать шаги по её достижению, оценивать результат (*регулятивные* универсальные учебные действия);
-   – задания учат работать с информацией: находить, осмысливать и критически оценивать её, преобразовывать и использовать, фиксировать различными способами (*познавательные* универсальные учебные действия);
-   – задания учат взаимодействовать: общаться и понимать друг друга, договариваться и брать на себя ответственность за построение доброжелательных взаимоотношений (*коммуникативные* универсальные учебные действия);

- – задания помогают развивать качества своей личности: иметь собственную позицию, отстаивать свои взгляды и принципы, уметь услышать противоположную точку зрения и иметь мужество признавать свои ошибки, если они были допущены (личностные результаты);
- – задания на развитие предметных умений.

Как мы будем учиться? Вы изучаете курс физики старшей школы на **базовом уровне**. Главная цель изучения этого курса – помочь вам стать личностью, которая

- сформировала в себе способность к саморазвитию, умение самостоятельно учиться;
- владеет целостным представлением о мире;
- умеет как уважать и учитывать мнение и интересы других людей, так и отстаивать собственное мнение.

Такие качества личности, как вам известно, не возникают сами по себе – они формируются, когда человек сталкивается с *проблемой* – с противоречивыми фактами и суждениями, неожиданными для него результатами жизненных наблюдений и научных опытов. *Активно работая над разрешением учебных проблем*, вы не только достигнете успехов в вашей деятельности, но как раз и выработаете у себя указанные выше качества.

Что надо обязательно запомнить? Ни один человек не может знать и запомнить всё. В учебнике приведено много интересных сведений, предложено много заданий, решено много задач. Это **максимум**, который вы можете изучить и освоить при желании.

Но есть и **обязательный минимум**, который должен освоить каждый.

Как работать с учебником? Учебник предназначен для работы под руководством учителя в течение всего учебного года. В тексте учебника то, на что вам нужно *обратить внимание*, выделено *курсивом*. То, что необходимо обязательно **запомнить** (желательно дословно), выделено **жирным шрифтом**.

Вашей успешной работе помогут:

Оглавление. Позволяет ориентироваться во всём учебнике.

Содержание раздела учебника. В нём дополнительно указаны названия отдельных частей параграфов. В тексте учебника названия отдельных частей параграфов выделены **цветом**.

Заключение к разделу учебника. В нём кратко перечисляются основные физические понятия, изучавшиеся в данном разделе учебника.

P. S. В постскриптурах упоминаются наиболее интересные проблемы, оставшиеся «за горизонтом» при изучении раздела.

Предметно-именной указатель. Позволяет быстро найти в учебнике значение того или иного понятия или сведения об учёном.

На *переднем форзаце* учебника приведены планы ответов о физических понятиях. Используйте эти планы при работе над учебным материалом (и не только по физике).

На *заднем форзаце* размещены справочные таблицы.

Обязательно обратите внимание на условные обозначения, использованные в учебнике:



– вопрос, на который следует ответить, прежде чем дальше читать текст учебника;



– формулировка проблемы;



– задания с использованием компьютера (информационных технологий);



– самостоятельная исследовательская работа;



– работа в группе.



– важнейшие понятия, которые необходимо обязательно знать;



– основные понятия, изученные в параграфе. Понятия, набранные жирным шрифтом, необходимо **знать и уметь применять** – обязательный минимум. Понятия, набранные обычным шрифтом, относятся к максимуму;



– материал для дополнительного чтения (максимум).

Каждый параграф учебника завершается заданиями, выполнение которых поможет вам лучше освоить изучаемый материал.

Приступая к выполнению задания, обратите внимание на условные обозначения, указывающие на характер задания.

Успехов!

Раздел 1.

Электромагнитные колебания и волны

В этом разделе учебника вы примените имеющиеся у вас математические знания для рассмотрения процессов, происходящих при колебаниях и распространении волн. Особое внимание уделено электромагнитным колебаниям и волнам. Одновременно будут рассмотрены и механические колебания и волны. Как вы знаете, такой единый подход к анализу колебательных и волновых процессов не является случайностью. Он отражает те общие закономерности, которым подчиняются колебательные и волновые процессы вне зависимости от их природы.

Вспомните то, что изучали ранее, и ответьте на вопросы:



- Каковы основные свойства электрических и магнитных полей?
- В чём заключается явление электромагнитной индукции?
- В чём заключается явление самоиндукции?
- Что такое колебание? Какие виды колебаний вам известны? Какие физические величины характеризуют колебательный процесс?
- Что такое волна? Какие волновые явления вы могли бы назвать?
- Что такое звук? От чего зависит громкость и высота звука?
- Что такое электромагнитные волны?
- Какие виды излучения принято выделять по шкале электромагнитных излучений?
- Какие примеры практического применения радиоволн вам известны?

§ 1. Закон электромагнитной индукции

Явление электромагнитной индукции

Магнитный поток

Закон электромагнитной индукции

Примеры решения задач

Лабораторная работа «Проверка закона электромагнитной индукции и правила Ленца»

§ 2. Индуктивность. Энергия магнитного поля

Индуктивность

Явление самоиндукции

Энергия магнитного поля

Примеры решения задач

§ 3. Свободные колебания

Основные характеристики колебаний

Свободные электромагнитные колебания

Свободные механические колебания

Доказательство гармоничности свободных колебаний

§ 4. Решение расчётных и экспериментальных задач по теме «Свободные колебания»

Классификация задач

Примеры решения задач

Лабораторная работа «Изучение колебаний тела, плавающего в жидкости»

§ 5. Вынужденные колебания

Вынужденные электромагнитные колебания

Производство, трансформация и передача электроэнергии

Трёхфазный ток

Вынужденные механические колебания

§ 6. Резистор, конденсатор, катушка индуктивности в цепи переменного тока

Резистор в цепи переменного тока

Конденсатор в цепи переменного тока

Катушка в цепи переменного тока

Резонанс в цепи переменного тока

§ 7. Волны

Типы волн

Скорость волн

Волновые явления

Поляризация волн

§ 8. Практическое применение электромагнитных волн

Зависимость энергии электромагнитной волны от частоты колебаний

Принцип радиосвязи

Распространение радиоволн

Самое важное в разделе «Электромагнитные колебания и волны»

P. S.

§ 1. ЗАКОН ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ



В науке мы неизменно наблюдаем: чем фундаментальнее открытая закономерность, тем короче её можно сформулировать.

*Пётр Леонидович Капица (1894–1984),
выдающийся российский физик,
лауреат Нобелевской премии по физике*

Вам уже известно явление электромагнитной индукции.

Явление электромагнитной индукции.

Явление электромагнитной индукции было открыто в 1831 году выдающимся английским физиком Майклом Фарадеем (1791–1867). Это явление относится к числу фундаментальных физических явлений и устанавливает взаимосвязь магнитного и электрического полей:

переменное магнитное поле порождает вихревое электрическое поле.

Возникновение вихревого электрического поля мы можем подтвердить экспериментально фактом действия этого поля на неподвижные электрические заряды. В результате такого действия в замкнутом проводящем контуре возникает ток (рис. 1).

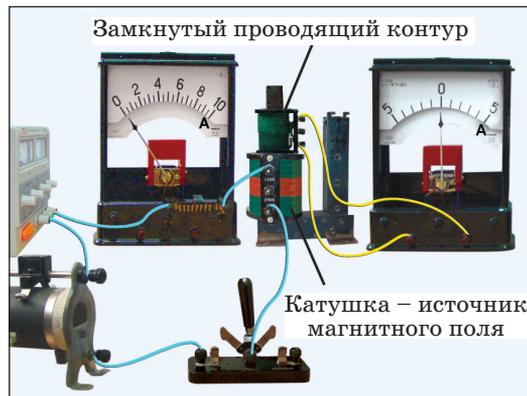


Рис. 1. Гальванометр в замкнутом проводящем контуре регистрирует ток, который создаётся вихревым электрическим полем. Вихревое электрическое поле порождается переменным магнитным полем, создаваемым катушкой



1.1. Почему в замкнутом проводящем контуре (рис. 1) электрический ток возникает только в моменты замыкания или размыкания цепи катушки либо при изменении тока в катушке с помощью реостата?

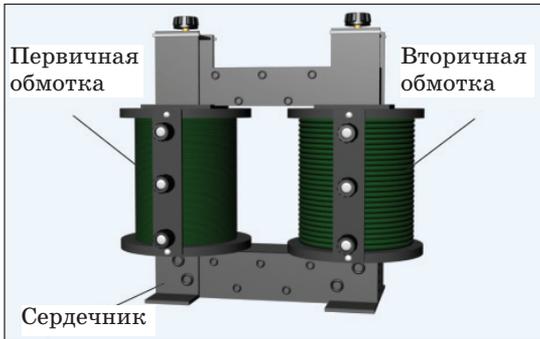


Рис. 2



1.2. На рисунке 2 изображён трансформатор. Каков принцип действия прибора? для чего он предназначен?

Направление тока, возникающего в замкнутом проводящем контуре за счёт явления электромагнитной индукции, подчиняется так называемому *правилу Ленца*.

Ток, возникающий благодаря явлению электромагнитной индукции, всегда имеет такое направление, что стремится скомпенсировать причину, приводящую к его возникновению.

Правило Ленца обусловлено законом сохранения энергии. Действительно, «индукционный» ток не может «наращивать» причину своего появления – изменяющееся магнитное поле. Ведь в противном случае индукционный ток становится всё больше и больше – и это явно противоречит закону сохранения энергии.



1.3. Что можно сказать о направлении индукционного тока в замкнутом проводящем контуре и направлении тока в катушке-источнике магнитного поля в моменты замыкания и размыкания цепи (рис. 1)?

Магнитный поток. Магнитное поле, как вам известно, характеризуется физической величиной, называемой *вектором магнитной индукции* \vec{B} . Единица измерения вектора магнитной индукции – тесла (сокращённо обозначается Тл). Наглядно магнитное поле принято изображать с помощью силовых линий магнитного поля (рис. 3, а, б).

Выделим в магнитном поле некоторую область, ограниченную плоским контуром (рис. 4). В области I контур пронизывает большее число магнитных линий, чем в области II. В области I, очевидно, магнитное поле «сильнее», так как эта область находится ближе к магнитному полюсу, чем область II.

Этот пример показывает, что магнитное поле в некоторой области можно характеризовать, образно говоря, числом силовых линий, пронизывающих некоторый контур. Такую величину называют *магнитным потоком* Φ . От чего же зависит магнитный поток Φ ?

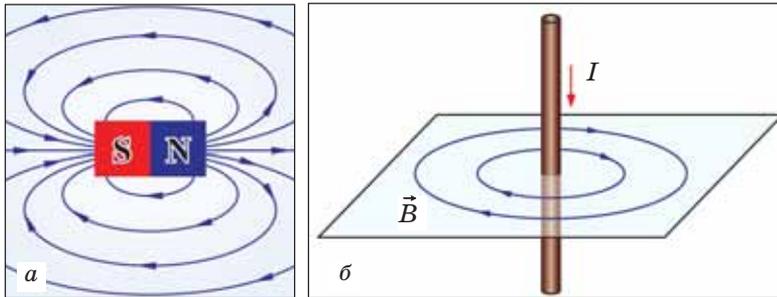


Рис. 3. Силовые линии магнитного поля:
 а – постоянный магнит; б – прямой проводник (с током)

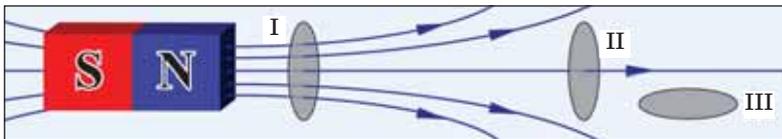


Рис. 4

Очевидно, что магнитный поток *зависит от модуля вектора магнитной индукции B* (чем «сильнее» магнитное поле, тем большим числом силовых линий мы его изображаем). Очевидно, что магнитный поток *зависит от площади контура* (чем больше площадь контура, тем большее число силовых линий пронизывает контур). Также магнитный поток *зависит от ориентации контура по отношению к силовым линиям* (на рисунке 4 в области III изображён контур, поток через который равен нулю).

Магнитный поток Φ , пронизывающий плоский контур, равен произведению модуля вектора магнитной индукции B , площади контура s и косинуса угла α между вектором магнитной индукции и перпендикуляром (нормалью) к плоскости контура.

На рисунке 5 изображены силовые линии магнитного поля, плоский контур площадью s , нормаль к поверхности контура \vec{n} и указан угол между вектором магнитной индукции \vec{B} и нормалью \vec{n} к плоскости контура.

$$\Phi = Bs \cos \alpha.$$

(1.1)

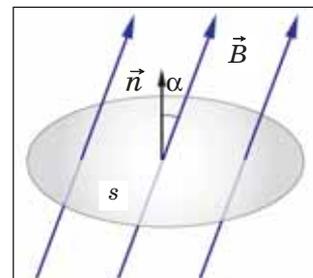


Рис. 5

Единица измерения магнитного потока получила название вебер¹ (сокращённо обозначается Вб).

$$1 \text{ Вб} = 1 \text{ Тл} \cdot 1 \text{ м}^2.$$

Закон электромагнитной индукции. Используя введённое выше понятие магнитного потока, можно описать явление электромагнитной индукции следующим образом: **в замкнутом проводящем контуре возникает ток при изменении магнитного потока, пронизывающего контур.**



1.4. Как формулируется закон Ома для полной цепи?

Рассмотрим замкнутый проводящий контур (рис. 1). Сила тока I в этом контуре определяется величиной электродвижущей силы (ЭДС) \mathcal{E} и полным сопротивлением контура $R_{\text{конт}}$.

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R_{\text{конт}}}. \quad (1.2)$$

Сопротивление контура $R_{\text{конт}}$, очевидно, складывается из сопротивления катушки, включённой в контур, сопротивления соединительных проводов и гальванометра. ЭДС \mathcal{E} равно отношению работы вихревого электрического поля (работы сторонней силы) $A_{\text{вихр. эл. пол}}$, совершаемой полем при перемещении по контуру электрического заряда q :

$$\mathcal{E} = \frac{A_{\text{вихр. эл. пол}}}{q}.$$

Для возникновения вихревого электрического поля необходимо изменять ток в катушке-источнике магнитного поля (рис. 1). Благодаря этому замкнутый проводящий контур будет пронизывать переменное магнитное поле, переменный магнитный поток. Изменения магнитного потока, пронизывающего контур, можно также добиться удалением или приближением контура к источнику магнитного поля либо изменением ориентации (поворотом) контура.

Проводя опыты по наблюдению явления электромагнитной индукции (рис. 1), можно установить, что сила тока в замкнутом проводящем контуре тем больше, чем быстрее изменяется магнитный поток, пронизывающий контур.

$$I \sim \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}.$$

¹ Единица СИ магнитного потока названа в честь немецкого физика Вильгельма Эдуарда Вебера (1804–1891), одного из создателей системы электрических и магнитных единиц.

Этот экспериментальный факт и закон Ома для полной цепи

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R_{\text{конт}}}$$

позволяют сформулировать **закон электромагнитной индукции**.

ЭДС, возникающая в замкнутом контуре благодаря явлению электромагнитной индукции, определяется быстротой изменения магнитного потока, пронизывающего контур.

Математическое выражение закона электромагнитной индукции имеет вид

$$\mathcal{E} = - \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}. \quad (1.3)$$

Знак минус в формуле (1.3), как нетрудно сообразить, обусловлен законом сохранения энергии применительно к явлению электромагнитной индукции (правилом Ленца). Пусть, например, ток в катушке – источнике магнитного поля – возрастает (рис. 1). Это приводит к увеличению магнитного поля катушки, увеличению магнитного потока, пронизывающего замкнутый проводящий контур ($\Delta\Phi > 0$). Как следует из формулы (1.3), ЭДС, возникающая при этом в замкнутом проводящем контуре, отрицательна ($\mathcal{E} < 0$). Это означает, что в контуре возникает ток, направление которого (а значит, и направление созданного им магнитного поля) противоположно направлению тока в катушке – источнике магнитного поля, как того и требует правило Ленца.

Когда магнитный поток нарастает (или убывает) равномерно, то есть быстрота изменения магнитного потока постоянна:

$$\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = \text{const},$$

то значение ЭДС также постоянно:

$$\mathcal{E} = \text{const}.$$

Если же быстрота изменения магнитного потока $\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$ неодинакова в различные моменты времени, то электродвижущая сила переменна.

Для того, чтобы рассчитать мгновенное значение ЭДС (то есть значение ЭДС в определённый момент времени), необходимо воспользоваться формулой закона электромагнитной индукции

$$\mathcal{E} = - \frac{\Delta\Phi}{\Delta t},$$

взяв малый интервал времени Δt . Или, как говорят математики, этот интервал времени Δt «должен стремиться к нулю»:

$$\Delta t \rightarrow 0.$$

Иными словами, мгновенное значение ЭДС следует рассчитывать по формуле

$$\mathcal{E} = -\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}.$$

Такого вида предел называют производной функции.

ЭДС, возникающая в замкнутом контуре при изменении магнитного потока, пронизывающего контур, равна производной магнитного потока по времени с противоположным знаком.

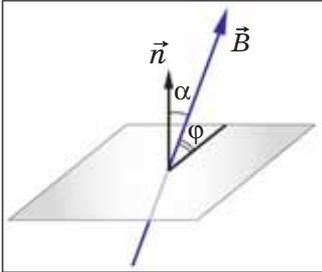
$$\mathcal{E} = -\Phi'(t). \quad (1.4)$$

Примеры решения задач.

Задача 1. Квадратная рамка со стороной $a = 4$ см помещена в однородное магнитное поле с индукцией $B = 0,2$ Тл так, что вектор магнитной индукции составляет угол $\varphi = 30^\circ$ с плоскостью рамки. Определите магнитный поток, пронизывающий рамку.

Решение:

Магнитный поток Φ , пронизывающий рамку, определяется модулем вектора магнитной индукции поля B , площадью рамки s и значением косинуса угла α между вектором магнитной индукции \vec{B} и нормалью \vec{n} к плоскости рамки (рис. 6).



$\Phi = Bs \cos \alpha.$

Площадь контура s определить легко:

$$s = a^2.$$

Из рисунка 6 видно, что $\alpha = 90^\circ - \varphi.$

(Дальнейшие действия по решению задачи выполните самостоятельно.)

Ответ: $\Phi = 160$ мкВб.

Рис. 6

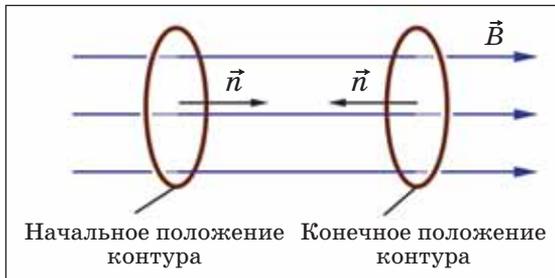


Рис. 7

Задача 2. Проводящий контур площадью s находится в однородном магнитном поле с индукцией B . Первоначально плоскость контура перпендикулярна силовым линиям магнитного поля. Какой заряд пройдёт по контуру, если его повернуть на 180° (рис. 7)? Электрическое сопротивление контура равно R .

Решение:

При повороте контура магнитный поток, пронизывающий контур, изменяется. Следовательно, возникает ЭДС и в контуре появляется ток. Чем больше ток, тем больше заряд, ежесекундно проходящий через поперечное сечение проводника, образующего контур.

По определению, сила тока равна

$$I = \frac{\Delta q}{\Delta t}, \quad (1.5)$$

где Δq – заряд, прошедший по контуру за время Δt .

С другой стороны, силу тока можно определить из закона Ома для полной цепи:

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R}, \quad (1.6)$$

где \mathcal{E} – электродвижущая сила, возникающая в замкнутом контуре при изменении магнитного потока, пронизывающего контур.

$$\mathcal{E} = - \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}. \quad (1.7)$$

Выясним, чему равно изменение магнитного потока $\Delta \Phi$ при повороте контура на 180° .

$$\Delta \Phi = \Phi - \Phi_0, \quad (1.8)$$

где Φ_0 – начальное значение магнитного потока, пронизывающего контур;

Φ – конечное значение магнитного потока, пронизывающего контур.

$$\Phi_0 = Bs. \quad (1.9)$$

(Учтено, что первоначально угол α между вектором магнитной индукции \vec{B} к плоскости контура \vec{n} составляет 0° , $\cos 0 = 1$.)

$$\Phi = -Bs. \quad (1.10)$$

(Учтено, что после поворота контура угол α между вектором магнитной индукции \vec{B} и нормалью \vec{n} к плоскости контура составляет 180° , $\cos 180^\circ = -1$.)

Подставив соотношения (1.9) и (1.10) в выражение (1.8), имеем

$$\Delta \Phi = -2Bs. \quad (1.11)$$

Используя соотношения (1.5) – (1.7) и соотношение (1.11), получим ответ задачи:

$$\Delta q = \frac{2Bs}{R}.$$



1.5. Почему величина заряда Δq , прошедшего по контуру, не зависит от времени поворота контура?

Ответ: $\Delta q = \frac{2Bs}{R}$.

Задача 3. Замкнутый контур пронизывает магнитный поток, убывающий с течением времени по закону $\Phi(t) = \Phi_0 - kt^2$, где $\Phi_0 = 0,002$ Вб; $k = 1,5$ Вб/с. Определите, чему равно значение ЭДС в контуре в момент времени $t = 2$ с.

Решение:

Для расчёта мгновенного значения ЭДС необходимо определить производную магнитного потока по времени:

$$\mathcal{E} = -\Phi'(t).$$

$$\mathcal{E} = -(\Phi_0 - kt^2)'$$

$$\mathcal{E} = 2kt.$$

При $t = 2$ с

$$\mathcal{E} = 6 \text{ В.}$$

Ответ: $\mathcal{E} = 6$ В при $t = 2$ с.

Задача 4. При вращении рамки в магнитном поле магнитный поток, пронизывающий рамку, изменяется с течением времени по закону

$$\Phi = 0,001 \cos 500 t \text{ (Вб)}.$$

Определите максимальное значение ЭДС, возникающей в рамке.

Решение:

В соответствии с законом электромагнитной индукции

$$\mathcal{E} = -\Phi'(t).$$

$$\mathcal{E} = -(0,001 \cos 500 t)' \text{ (В)}.$$

$$\mathcal{E} = 0,5 \sin 500 t \text{ (В)}.$$

Так как максимальное значение функции синус равно 1, то максимальное значение ЭДС равно $\mathcal{E}_{\text{макс}} = 0,5$ В.

Ответ: $\mathcal{E}_{\text{макс}} = 0,5$ В.

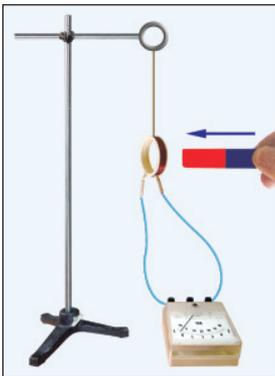


Рис. 8

Лабораторная работа «Проверка закона электромагнитной индукции и правила Ленца».

Оборудование: миллиамперметр, катушка-моток, постоянный магнит, лабораторный штатив с лапкой.

Указания к работе:

Задание 1. Закрепите катушку-моток в лапке штатива (рис. 8). Подключите катушку к клеммам миллиамперметра. Приближая и удаляя с разной скоростью магнит к катушке, сделайте вывод, как зависит сила тока в катушке, а значит, и ЭДС индукции от скорости изменения магнитного потока, пронизывающего катушку.

Закрепите магнит в лапке штатива и проведите аналогичный опыт, перемещая катушку по направлению к полюсу магнита.

Удерживая катушку в одной руке, а магнит в другой руке, повторите опыт при одновременном движении магнита и катушки.

Сделайте вывод, подтверждают ли проведенные опыты закон электромагнитной индукции.

Задание 2. Рассмотрите катушку-моток и определите направление намотки провода в катушке. Определите, каково направление тока в катушке в те моменты времени, когда стрелка миллиамперметра отклоняется вправо. Изобразите силовые линии магнитного поля, создаваемого при этом током в катушке.

Изобразите силовые линии магнитного поля, создаваемого током в катушке в те моменты времени, когда стрелка миллиамперметра отклоняется влево.

Ток возникает при изменении магнитного потока, пронизывающего катушку-моток при движении магнита. Проверьте справедливость правила Ленца.

Физическая суть явления электромагнитной индукции, магнитный поток, $\Phi = Bs \cos \alpha$, единица измерения магнитного потока – вебер (Вб), закон электромагнитной индукции, ЭДС индукции: $\mathcal{E} = - \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$, $\mathcal{E} = - \Phi'(t)$.

1.1 ● Максимальный магнитный поток, пронизывающий плоскую рамку, находящуюся в однородном магнитном поле с индукцией 0,3 Тл, составляет 0,15 мВб. Какова площадь рамки?



1.2. Подготовьте сообщение по теме «Практическое применение явления электромагнитной индукции».

1.3 ● За 10 мс магнитный поток, пронизывающий контур, равномерно убывает с 0,7 до 0,2 мВб. Определите ЭДС и силу тока в контуре. Электрическое сопротивление контура 0,2 Ом.

1.4 ● Вторичная обмотка трансформатора состоит из 38 витков, каждый из которых пронизывает магнитный поток, изменяющийся с течением времени по закону

$$\Phi = 0,0007 \sin 100 \pi t \text{ (Вб)}.$$

Чему равна амплитуда ЭДС на концах вторичной обмотки трансформатора?

1.5 ● Плоский кольцевой контур диаметром 2 см пронизывает магнитное поле, вектор магнитной индукции которого перпендикулярен плоскости контура, а модуль магнитной индукции B возрастает с течением времени t по закону

$$B = kt,$$

где $k = 2 \text{ мТл/с}$.

Определите напряжённость вихревого электрического поля в контуре.

§ 2. ИНДУКТИВНОСТЬ. ЭНЕРГИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ



Под физической аналогией я разумею то частное сходство между законами двух каких-нибудь областей науки, благодаря которому одна является иллюстрацией для другой.

*Джеймс Клерк Максвелл (1831–1879),
великий английский физик*

Вам уже известно явление самоиндукции.

Индуктивность. Пусть катушка подключена к источнику тока (рис. 9). Тогда внутри катушки и вокруг неё существует магнитное поле. Выделим внутри катушки плоский контур, совпадающий с витком катушки. Данный контур будет пронизывать магнитный поток Φ , который тем больше, чем больше магнитная индукция B поля, создаваемого катушкой с током.

$$\Phi \sim B.$$

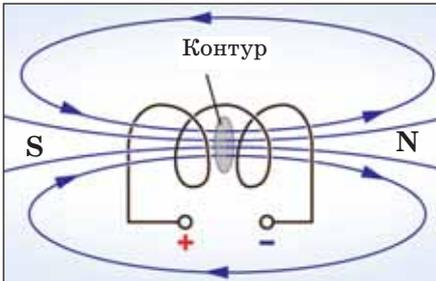


Рис. 9

Из опытов нам известно, что магнитная индукция B поля катушки тем больше, чем больше сила тока I в катушке.

$$B \sim I.$$

Таким образом, магнитный поток, пронизывающий контур (виток катушки), прямо пропорционален силе тока в контуре (витке катушки).

$$\Phi \sim I.$$

*Коэффициент пропорциональности между магнитным потоком, пронизывающим контур (виток катушки), и силой тока в контуре (витке катушки) называется **индуктивностью катушки**.*

Как следует из определения, индуктивность – это величина, характеризующая магнитные свойства катушки (электрической цепи).

Индуктивность обозначается буквой L .

$$\Phi = LI.$$

(2.1)

Единица измерения индуктивности получила название *генри* (сокращённо обозначается Гн). Так единица измерения названа в честь известного американского физика Джозефа Генри (1797–1878), построившего мощные электромагниты и обнаружившего (независимо от Майкла Фарадея) явление электромагнитной индукции и самоиндукции.



2.1. Как выразить единицу СИ индуктивности через единицы измерения магнитного потока и силы тока?

Индуктивность катушки зависит от числа витков катушки, её геометрических размеров. Действительно, чем больше, например, число витков в катушке, тем больше (при той же силе тока) и магнитный поток, пронизывающий контур-виток катушки. Значит, больше и индуктивность катушки.



2.2. Влияет ли, по вашему мнению, наличие железного сердечника на величину индуктивности катушки?

Индуктивность около 1 Гн имеет катушка, часто используемая при проведении демонстрационных опытов (рис. 10, а). Индуктивность этой же катушки, но с замкнутым сердечником — около 2,5 Гн (рис. 10, б).

Явление самоиндукции.

Обсудим, что будет происходить, если через катушку (рис. 9) идёт не постоянный, а изменяющийся ток. В этом случае в соответствии с явлением электромагнитной индукции возникает вихревое электрическое поле. Вихревое электрическое поле, как известно, действует силой на заряженные частицы. В том числе поле будет действовать и на электроны, движущиеся в металлическом проводнике, образующем катушку, и создающие ток.

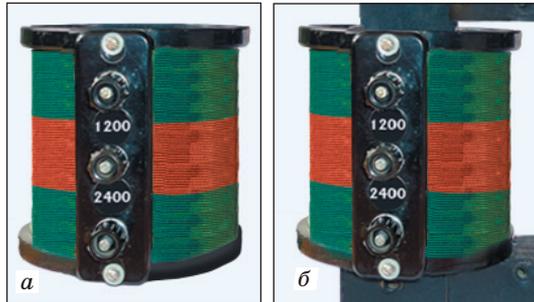


Рис. 10



2.3. Что такое электродвижущая сила?

Вихревое поле, действуя на электроны, совершает работу, то есть в контуре-витке катушки возникает ЭДС. Возникновение ЭДС в проводящем контуре при изменении силы тока в нём называют явлением самоиндукции.

Направление ЭДС самоиндукции подчиняется правилу Ленца: ЭДС имеет такое направление, что стремится скомпенсировать изменения магнитного потока (электрического тока в катушке), приводящие к возникновению ЭДС¹. Иными словами, при увеличении силы тока в катушке ЭДС препятствует его возрастанию, а при уменьшении силы тока в электрической цепи препятствует его убыванию.

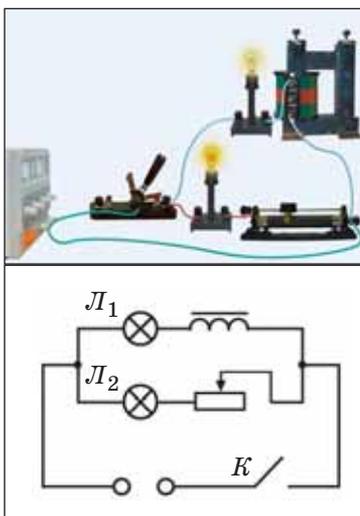


Рис. 11

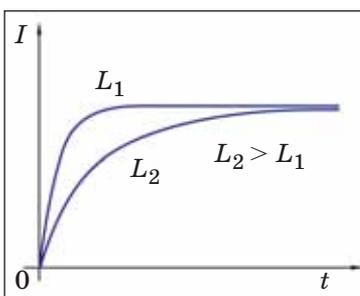


Рис. 12. График зависимости силы тока I от времени t при замыкании цепи постоянного тока, содержащей катушку индуктивности

Напомним известный опыт по наблюдению явления самоиндукции (рис. 11).

Электрическая цепь содержит две лампы. Лампа L_1 включена последовательно с катушкой, лампа L_2 – последовательно с реостатом. Замкнём ключ K . Видно, что лампа L_1 загорается заметно позже, чем лампа L_2 . Почему же ток в цепи, содержащей катушку (и лампу L_1), нарастает постепенно и лишь через некоторое время достигает наибольшего значения? Это объясняется тем, что при замыкании цепи нарастающее (переменное) магнитное поле порождает вихревое электрическое поле, которое и создаёт «противоЭДС», препятствующее мгновенному увеличению силы тока в цепи. Вследствие самоиндукции ток в цепи нарастает постепенно (рис. 12).



2.4. Увеличится или уменьшится время запаздывания загорания лампы L_1 (рис. 11), если удалить сердечник из катушки?



2.5. Почему при частом замыкании и размыкании цепи (рис. 11) лампа L_1 светит тускло или не светит вовсе?

Для наблюдения явления самоиндукции при размыкании цепи изменим схему опыта. Отключим цепь лампы L_1 и параллельно катушке включим лампу L и диод (рис. 13, а, б). Когда цепь замкнута (рис. 13, а), лампа L не светится, так как диод D включён в «обратном» направле-

¹ Магнитный поток, ЭДС индукции, ЭДС самоиндукции – скалярные величины и о их направлении мы говорим в том же смысле, как, например, о направлении тока.

нии, его сопротивление велико. При замкнутом ключе K ток идёт через лампу L_1 и катушку. Разомкнём цепь (рис. 13, б). Лампа L_1 , естественно, потухнет, а вот лампа L в момент размыкания цепи ярко вспыхивает! При размыкании цепи убывающее (переменное) магнитное поле вновь порождает вихревое электрическое поле, которое создаёт ЭДС, «поддерживающую» убывающий ток. Именно эта ЭДС индукции и создаёт ток в цепи «катушка – лампа L – диод», оставшейся замкнутой после размыкания ключа K .

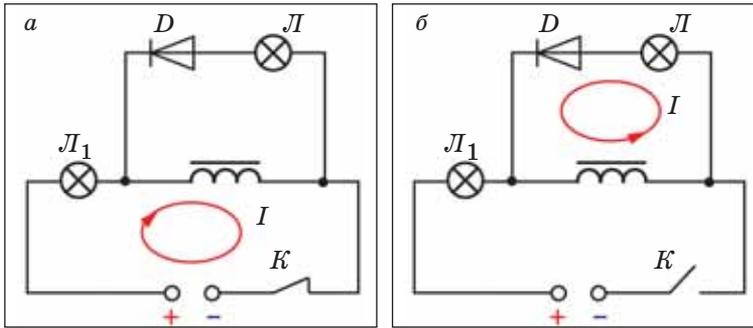


Рис. 13

Подключим параллельно катушке неоновую лампу (рис. 14). При замыкании ключа неоновая лампа не светится, так как напряжение источника тока (10–20 В) недостаточно для создания газового разряда в лампе.



2.6. Почему при размыкании цепи (рис. 14) неоновая лампа ярко вспыхивает?

Явление самоиндукции является частным случаем явления электромагнитной индукции, следовательно, ЭДС самоиндукции должна рассчитываться в соответствии с законом электромагнитной индукции.

$$\mathcal{E} = - \frac{\Delta\Phi}{\Delta t},$$

или

$$\mathcal{E} = -\Phi'(t).$$

В рассматриваемом случае магнитный поток определяется индуктивностью катушки и силой тока в ней [соотношение (2.1)]:

$$\Phi = LI.$$

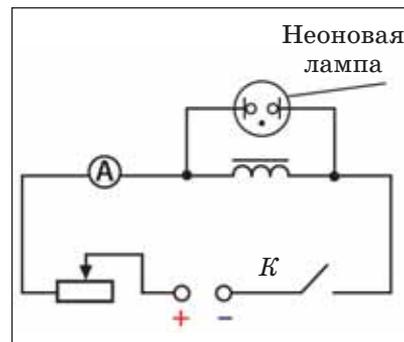


Рис. 14

Тогда

$$\mathcal{E} = -L \frac{\Delta I}{\Delta t}, \quad (2.2)$$

или

$$\mathcal{E} = -LI'(t). \quad (2.3)$$

Иными словами, ЭДС самоиндукции \mathcal{E} , возникающая в катушке, имеющей индуктивность L , определяется *быстрой изменением силы тока* $\Delta I/\Delta t$, $I'(t)$ в катушке. Вот почему при быстром размыкании цепи возникает такая большая ЭДС самоиндукции, что в неоновой лампе возникает газовый разряд (рис. 14).

Явление самоиндукции находит практическое применение в электротехнике и радиотехнике (цепи переменного тока, колебательный контур).

Энергия магнитного поля. Магнитное поле обладает энергией. В этом легко убедиться на опыте (рис. 14). При размыкании ключа K происходит превращение энергии магнитного поля, «накопленной» в катушке, в энергию вихревого электрического поля, которое, совершая работу, вызывает газовый разряд в неоновой лампе.

От чего зависит энергия магнитного поля катушки с током? На опыте легко заметить, что неоновая лампа вспыхивает тем ярче, чем больше сила тока в катушке. Следовательно, *энергия магнитного поля зависит от силы тока в катушке*. Если уменьшить число витков катушки или разомкнуть сердечник катушки, то яркость вспышки неоновой лампы также уменьшится. Но, уменьшая число витков катушки или размыкая её сердечник, мы тем самым уменьшаем индуктивность катушки. Следовательно, *энергия магнитного поля зависит от индуктивности катушки*.

Какова же формула для расчёта энергии магнитного поля катушки с током? При поиске ответов на этот вопрос воспользуемся одним из методов познания, который применяется в науке, в том числе в физике. Это *метод аналогии*. При использовании метода аналогии знания, полученные из рассмотрения какого-либо явления, переносятся на другое, менее изученное явление. Полученные при этом умозаключения должны в дальнейшем быть подвергнуты теоретической и экспериментальной проверке.

Ещё Майкл Фарадей, проводя изучение явления самоиндукции, отметил, что «первая мысль, которая приходит в голову, это та, что электричество обладает чем-то похожим на количество движения или инерцию в проводе». Проведём аналогию между *явлением самоиндукции и явлением механического движения*.

Пусть на тело, первоначально находившееся в состоянии покоя, начинает действовать некоторая сила, совершающая механическую работу. Под действием этой силы скорость возрастает не мгновенно, а *постепенно*. Быстрота изменения скорости тела, как вам известно, определяется инертностью тела, которая характеризуется массой тела. При торможении тело также не может остановиться мгновенно, как бы ни была велика тормозящая сила. Тело будет останавливаться *постепенно*, уменьшая свою кинетическую энергию до нуля.

Если тело массой m приобрело скорость v , то оно обладает кинетической энергией E_k , равной

$$E_k = \frac{mv^2}{2}.$$

В случае электрического тока при замыкании цепи источника тока производится работа. Но электрический ток в цепи устанавливается не мгновенно, а *постепенно*. При этом быстрота нарастания тока определяется магнитными свойствами электрической цепи, которые характеризуются индуктивностью цепи. При размыкании цепи ток также не исчезает мгновенно, а благодаря явлению самоиндукции уменьшается *постепенно*. При этом вихревым электрическим полем совершается работа за счёт энергии магнитного поля, пока та не уменьшится до нуля.

Если в электрической цепи индуктивностью L устанавливается сила тока I , то магнитное поле тока обладает энергией W_m , которая по аналогии с кинетической энергией движущегося тела вычисляется по формуле

$$W_m = \frac{LI^2}{2}. \quad (2.4)$$

Именно такое выражение для энергии магнитного поля тока получено учёными в результате строгого теоретического расчёта.



Докажем, что величина, вычисленная по формуле (2.4), измеряется в джоулях – единицах измерения энергии в СИ.

$$\text{Гн} \cdot \text{А}^2 = \frac{\Phi}{\text{А}} \cdot \text{А}^2 = \Phi \cdot \text{А} = \text{Тл} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{А} = \text{Тл} \cdot \text{А} \cdot \text{м} \cdot \text{м}.$$

Вспомним выражение для расчёта силы Ампера:

$$F_A = BIl \sin \alpha.$$

Значит,

$$H = \text{Тл} \cdot \text{А} \cdot \text{м}.$$

Тогда

$$\text{Гн} \cdot \text{А}^2 = \text{Н} \cdot \text{м} = \text{Дж}.$$

Что требовалось доказать.

Примеры решения задач.

Задача 1. Конденсатор ёмкостью $C = 600$ мкФ зарядили до напряжения $U_{\text{макс}} = 200$ В и замкнули на катушку индуктивностью $L = 20$ Гн (рис. 15). Определите максимальное значение силы тока в цепи катушки. Сопротивление катушки и соединительных проводов не учитывать.

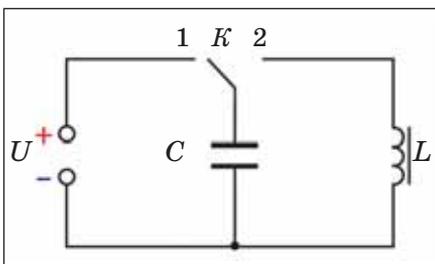


Рис. 15

После зарядки между обкладками (пластинами) конденсатора существует электрическое поле, поэтому конденсатор обладает энергией $W_{\text{эл}}$, равной

$$W_{\text{эл}} = \frac{CU^2_{\text{макс}}}{2}. \quad (2.5)$$

Если заряженный конденсатор подсоединить к катушке (переведя ключ K из положения 1 в положение 2), то в цепи катушки возникнет ток. В соответствии с явлением самоиндукции ток в катушке будет нарастать постепенно.

Пусть в некоторый момент времени напряжение на конденсаторе составляет U , а сила тока в цепи равна I . Тогда, применив закон сохранения энергии и используя формулы (2.4) и (2.5), можно записать следующее соотношение:

$$\frac{CU^2_{\text{макс}}}{2} = \frac{CU^2}{2} + \frac{LI^2}{2}. \quad (2.6)$$

(Записывая закон сохранения энергии – соотношение (2.6), мы учли, что по условию задачи можно не принимать во внимание сопротивление катушки и соединительных проводов, то есть можно пренебречь «потерями» энергии на нагревание проводников.)

Как следует из соотношения (2.6), сила тока в катушке максимальна ($I = I_{\text{макс}}$) тогда, когда конденсатор полностью разряжен ($U = 0$),

$$\frac{CU^2_{\text{макс}}}{2} = \frac{LI^2_{\text{макс}}}{2}.$$

(Дальнейшие действия по решению задачи выполните самостоятельно.)

Ответ: $I_{\text{макс}} = 0,35$ А.



Задача 2. Металлическое кольцо охладили до перехода металла в сверхпроводящее состояние и поместили в однородное магнитное поле, индукция которого нарастает от нуля до B_0 . Вектор магнитной индукции поля перпендикулярен плоскости кольца. Определите силу тока, установившегося в кольце. Площадь поперечного сечения кольца s , индуктивность L .

Решение:

При изменении магнитного поля, пронизывающего кольцо, изменится создаваемый им магнитный поток от нуля до значения

$$\Phi_0 = B_0 s. \quad (2.7)$$

(При написании формулы (2.7) учтено, что вектор магнитной индукции перпендикулярен плоскости кольца.)

В результате возникает ЭДС индукции $\mathcal{E}_{инд}$ и в кольце появляется электрический ток. Изменяющийся ток в соответствии с явлением самоиндукции дополнительно создаёт в кольце ЭДС самоиндукции $\mathcal{E}_{самоинд}$. В соответствии с правилом Ленца ЭДС самоиндукции противоположна (по знаку) ЭДС индукции.

По закону Ома для полной цепи сила тока I в кольце равна

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

где \mathcal{E} – суммарная ЭДС.

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}_{инд} - \mathcal{E}_{самоинд},$$

а R – сопротивление кольца.

Так как кольцо находится в сверхпроводящем состоянии, то его сопротивление равно нулю:

$$R = 0.$$

Это означает, что при любом значении ЭДС \mathcal{E} , отличном от нуля, в кольце возникает бесконечно большой ток, что, безусловно, противоречит закону сохранения энергии.

Следовательно,

$$\mathcal{E} = 0.$$

$$\mathcal{E}_{инд} - \mathcal{E}_{самоинд} = 0.$$

$$-\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = -L \frac{\Delta I}{\Delta t}, \quad (2.8)$$

где $\Delta\Phi = \Phi_0 - 0$ – изменение магнитного потока внешнего поля, пронизывающего плоскость кольца;

$\Delta I = I_0 - 0$ – изменение силы тока в кольце.

Из соотношения (2.8) с учётом формулы (2.7) имеем

$$B_0 s = LI.$$

Отсюда

$$I = \frac{B_0 s}{L}.$$

Ответ: $I = \frac{B_0 s}{L}.$

Индуктивность, $\Phi = LI$, единица измерения индуктивности – генри (Гн), явление самоиндукции, ЭДС самоиндукции: $\mathcal{E} = -L \frac{\Delta I}{\Delta t}$,
 $\mathcal{E} = -LI'(t)$, метод аналогии, энергия магнитного поля тока,
 $W_m = \frac{LI^2}{2}.$

2.1 ● Длинная цилиндрическая катушка индуктивностью 0,5 Гн подключена к источнику постоянного тока так, что сила тока в катушке 0,2 А. Определите магнитный поток через поперечное сечение катушки и энергию магнитного поля катушки.

2.2 ● Чему равна ЭДС самоиндукции, возникающей в катушке индуктивностью 20 Гн при равномерном уменьшении силы тока в катушке от 0,4 А до нуля за 10 мс?

2.3 ● В катушке, включённой в цепь переменного тока, сила тока изменяется по закону

$$i = 0,3 \sin 100 \pi t \text{ (A)}.$$

Какова зависимость ЭДС самоиндукции от времени? Чему равно максимальное значение ЭДС самоиндукции? Индуктивность катушки 0,2 Гн.

2.4 ● Джеймс Клерк Максвелл в своём знаменитом труде «Трактат об электричестве и магнетизме» упоминает о наблюдении английского учёного Уильяма Дженкина, который заметил, что хотя и нельзя ощутить электрическое воздействие от одного гальванического элемента, но «если пропустить ток через катушку электромагнита и если затем прервать контакт между концами двух проводов, которые держат в руках, то всё же будет чувствоваться небольшой удар. Такой удар не ощущается при установлении контакта». Как объяснить наблюдаемое явление? (Такое же явление наблюдал Джозеф Генри в 1832 г.)

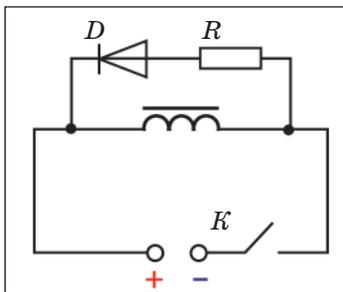


Рис. 16

2.5 ● Катушка индуктивностью 2,5 Гн, имеющая сопротивление 40 Ом, подключена к источнику постоянного напряжения 36 В. Параллельно катушке подключён резистор сопротивлением 100 Ом и диод D в обратном направлении (рис. 16). Чему равна сила тока в цепи катушки через продолжительный промежуток времени после замыкания ключа K? Какое количество теплоты выделится в резисторе после размыкания ключа K?

§ 3. СВОБОДНЫЕ КОЛЕБАНИЯ



Иметь меру требуемой математической строгости – самое трудное для физика. Правильнее сказать так: ему необходимо уметь определять эту меру.

Леонид Исаакович Мандельштам (1979–1944), физик, академик, автор основополагающих трудов по теории колебаний

Вам уже известны примеры свободных колебаний.

Основные характеристики колебаний. Напомним, что колебаниями называют физический процесс, повторяющийся через определённый промежуток времени (период колебаний). Одним из типов колебаний являются свободные колебания – колебания, происходящие в колебательной системе без внешнего воздействия на неё после выведения системы из положения равновесия. Примерами колебательных систем, в которых могут происходить свободные колебания, являются колебательный контур, груз, закреплённый на пружине, и маятник (рис. 17, а–в).

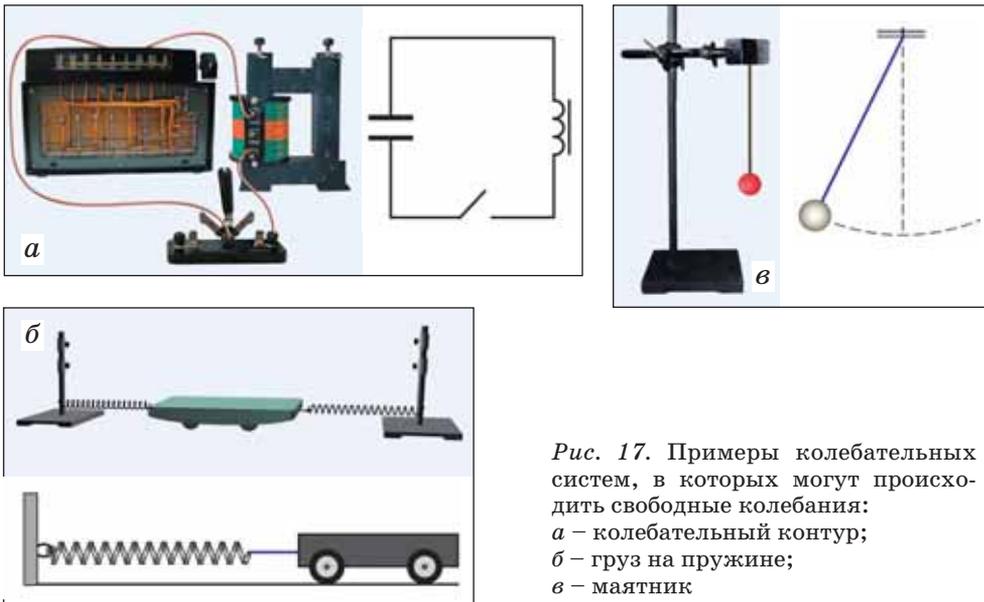


Рис. 17. Примеры колебательных систем, в которых могут происходить свободные колебания:
а – колебательный контур;
б – груз на пружине;
в – маятник

Для того чтобы в колебательной системе происходили колебания, необходимо, чтобы «потери» энергии на преодоление «трения» были малы. В колебательном контуре должно быть малым электрическое сопротивление катушки и соединительных проводов. При колебании груза на пружине движение груза должно происходить по гладкой поверхности. При колебании маятника силы сопротивления, действующие на маятник со стороны воздуха, должны быть малы. В таком случае затухание колебаний будет незначительно и они будут происходить в течение большого числа периодов колебаний.

Обосновано теоретически и экспериментально проверено, что в случае малого отклонения колебательной системы от положения равновесия и при отсутствии затухания колебаний свободные колебания являются гармоническими. *Гармоническими называют такие колебания, при которых величины, характеризующие отклонение системы от положения равновесия, изменяются с течением времени по закону синуса (или косинуса).*

Так, например, при свободных колебаниях, происходящих в колебательном контуре, изменяются гармонически – по закону синуса (или косинуса) – заряд и напряжение на конденсаторе, сила тока в катушке. При колебаниях груза на пружине изменяются гармонически его координата и скорость. При колебаниях маятника – угол отклонения нити маятника от вертикали (положения равновесия).

Математическая форма записи гармонического колебания имеет вид

$$x(t) = x_{\max} \sin(\omega t + \varphi_0) \quad (3.1)$$

или

$$x(t) = x_{\max} \cos(\omega t + \varphi_0). \quad (3.2)$$

Выясним, каков физический смысл величин, входящих в соотношения (3.1) и (3.2):

$x(t)$ – это значение величины, характеризующей отклонение колебательной системы от положения равновесия в некоторый момент времени t : заряд и напряжение на конденсаторе или сила тока в катушке, координата или скорость груза, угол отклонения маятника;

x_{\max} – наибольшее значение величины – *амплитуда колебаний*. Действительно, ведь наибольшее значение функций синус и косинус равно 1 (функции принимают значения от -1 до $+1$);

$\omega t + \varphi_0$ – аргумент функции (синуса или косинуса), описывающей колебания, называют *фазой колебаний*. Обозначают фазу колебаний как φ .

$$\varphi = \omega t + \varphi_0. \quad (3.3)$$

Единица измерения фазы – радиан. Значение фазы в начальный момент времени (при $t = 0$) – это *начальная фаза*, она равна φ_0 .

Напомним, что *период T* – это время одного колебания, а *частота ν* – число колебаний за одну секунду.

$$\nu = \frac{1}{T}. \quad (3.4)$$

Единица измерения частоты – герц (сокращённо обозначается Гц).

За время, равное одному периоду колебаний, колебательная система «возвращается» в первоначальное состояние и величины, характеризующие систему, принимают прежние значения.



3.1. Чему равен период тригонометрических функций синус и косинус?

За время, равное одному периоду колебаний T , фаза колебаний φ – аргумент тригонометрической функции синус (или косинус) – изменяется на 2π .

$$\omega \cdot T = 2\pi.$$

$$\omega = \frac{2\pi}{T}. \quad (3.5)$$

С учётом соотношения (3.4) имеем

$$\omega = 2\pi\nu. \quad (3.6)$$

Таким образом, *величина ω , называемая круговой (или циклической) частотой*, – это число колебаний за 2π секунд.

Круговая (циклическая) частота ω , как и частота ν , измеряется в герцах.

Графики гармонических колебаний изображены на рисунке 18, а, б.

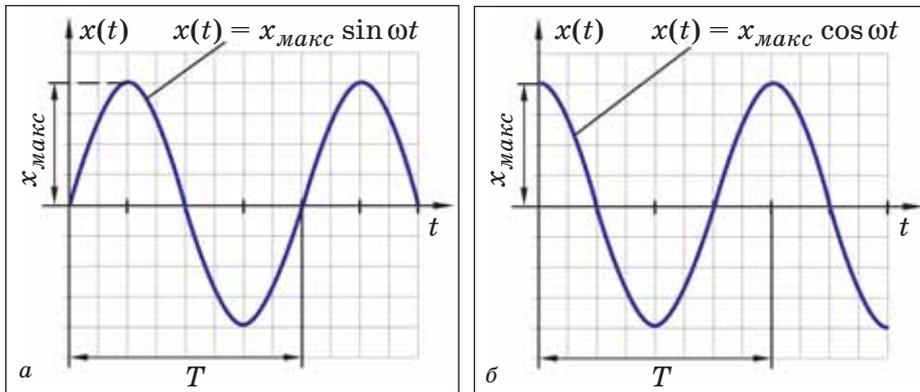


Рис. 18



3.2. Чему равны начальные фазы колебаний, графики которых изображены на рисунке 18, а, б?



3.3. Чему равна разность фаз (или, как говорят, сдвиг по фазе) колебаний, изображённых на рисунке 18, а и рисунке 18, б?

Свободные электромагнитные колебания. Системой, в которой возможны свободные электромагнитные колебания, является колебательный контур. Колебательный контур состоит из конденсатора и катушки.

Пусть конденсатор контура ёмкостью C зарядили до напряжения $U_{\text{макс}}$ (рис. 19, а). Тогда энергия электрического поля конденсатора $W_{\text{эл}}$ равна

$$W_{\text{эл}} = \frac{CU_{\text{макс}}^2}{2}. \quad (3.7)$$

Первоначально ток в контуре отсутствует, значит, энергия магнитного поля $W_{\text{м}}$ равна нулю:

$$W_{\text{м}} = 0.$$

Конденсатор начинает разряжаться, в цепи возникает ток. Но благодаря явлению самоиндукции, происходящему в катушке индуктивностью L , ток *нарастает постепенно*. В тот момент, когда конденсатор полностью разрядится (рис. 19, б), энергия электрического поля станет равной нулю:

$$W_{\text{эл}} = 0,$$

а энергия магнитного поля катушки, а значит, и сила тока $I_{\text{макс}}$ в цепи будут максимальны.

$$W_{\text{м}} = \frac{LI_{\text{макс}}^2}{2}. \quad (3.8)$$

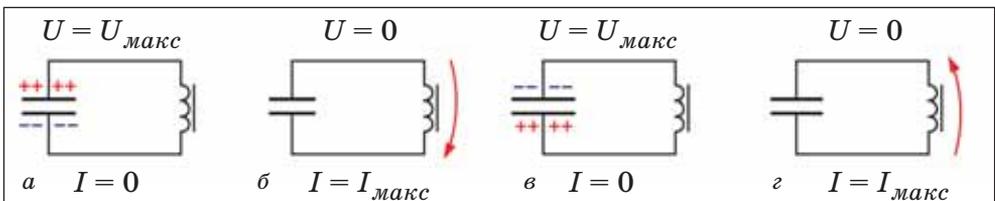


Рис. 19

Исчезнет ли после этого ток в цепи мгновенно, ведь конденсатор разряжен? Нет, благодаря опять-таки явлению самоиндукции, ток *убывает постепенно*. В результате конденсатор в контуре вновь приобретает заряд. В тот момент, когда сила тока в цепи становится равной нулю (рис. 19, в), магнитного поля нет:

$$W_{\text{м}} = 0,$$

а конденсатор, перезарядившись, вновь обладает максимальной энергией:

$$W_{эл} = \frac{CU_{\text{макс}}^2}{2}.$$

После этого конденсатор вновь разряжается, в колебательном контуре вновь существует ток (противоположного направления). Этот ток вновь достигает максимального значения (рис. 19, *г*), а затем ток опять убывает и заряжается конденсатор – колебательная система возвращается в исходное состояние (рис. 19, *а*).

Для того чтобы иметь возможность визуально наблюдать электромагнитные колебания, подключим колебательный контур к осциллографу (рис. 20, *а*). Тогда на экране осциллографа будет видна *осциллограмма* – график зависимости напряжения на конденсаторе колебательного контура от времени (рис. 20, *б*). Наблюдение осциллограммы подтверждает, что действительно свободные электромагнитные колебания, происходящие в колебательном контуре, являются гармоническими¹.

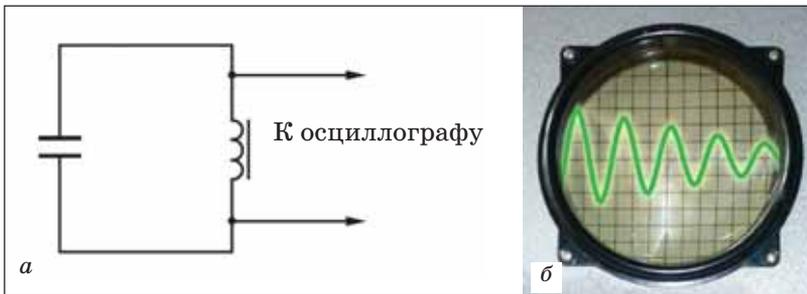


Рис. 20



3.4. Как определяется понятие электрической ёмкости?

Пусть в колебательном контуре конденсатор ёмкостью C первоначально заряжен до напряжения $U_{\text{макс}}$. Это означает, что максимальный заряд конденсатора равен

$$q_{\text{макс}} = CU_{\text{макс}}. \quad (3.9)$$

Если круговая (циклическая) частота колебаний в таком колебательном контуре равна ω , то заряд конденсатора с течением времени меняется по закону

$$q(t) = q_{\text{макс}} \cos \omega t.$$

¹ В реальном эксперименте за счёт электрического сопротивления катушки и соединительных проводов неизбежно будет наблюдаться затухание колебаний – их «отклонение» от идеальной формы гармонических.

При выборе тригонометрической функции, описывающей гармонические колебания заряда, учтено, что в начальный момент времени (при $t = 0$) заряд конденсатора максимален ($q = q_{\text{макс}}$).

С учётом соотношения (3.8) имеем

$$q = CU_{\text{макс}} \cos \omega t. \quad (3.10)$$



3.5. Как определяется понятие силы тока?

Сила тока I в цепи колебательного контура определяется быстротой изменения заряда конденсатора

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

следовательно, мгновенное значение силы тока $I(t)$ может быть рассчитано как производная функции заряда по времени:

$$I(t) = q'(t).$$

Или с учётом формулы (3.10)

$$I(t) = (CU_{\text{макс}} \cos \omega t)',$$

$$I(t) = -\omega CU_{\text{макс}} \sin \omega t.$$

Последнее выражение позволяет определить амплитуду тока $I_{\text{макс}}$:

$$I_{\text{макс}} = \omega CU_{\text{макс}}. \quad (3.11)$$

Будем считать, что при каждом колебании лишь малая доля энергии, запасённой в колебательном контуре, расходуется на нагревание проводников при прохождении тока в контуре.

Тогда соотношения (3.7) и (3.8) позволяют записать закон сохранения в виде

$$\frac{CU_{\text{макс}}^2}{2} = \frac{LI_{\text{макс}}^2}{2}.$$

Воспользовавшись соотношением (3.11), получим

$$CU_{\text{макс}}^2 = L(\omega CU_{\text{макс}})^2.$$

Отсюда

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}}. \quad (3.12)$$

Выразим период колебаний T через круговую частоту ω [формула (3.5)]:

$$T = \frac{2\pi}{\omega}.$$

Или с учётом выражения (3.12) окончательно имеем

$$T = 2\pi\sqrt{LC}. \quad (3.13)$$

Формулу (3.13) для расчёта периода электромагнитных колебаний в колебательном контуре называют формулой Томсона¹. Из формулы Томсона следует, что чем больше ёмкость конденсатора и индуктивность катушки контура, тем больше период колебаний в контуре. Этот вывод легко подтвердить на опыте, меняя индуктивность и ёмкость контура (рис. 20).

Свободные механические колебания. Получим формулу для расчёта периода колебаний груза на пружине и маятника. Пусть груз массой m прикреплен к пружине жёсткостью k (рис. 21). Сместим груз от положения равновесия на $x_{\text{макс}}$ (рис. 21, а). При этом на груз будет действовать сила упругости, и потенциальная энергия пружины E_n деформированной пружины составит

$$E_n = \frac{kx_{\text{макс}}^2}{2}.$$

Отпустим груз, он начнёт смещаться к положению равновесия, его скорость и кинетическая энергия возрастают. В положении равновесия (когда пружина не деформирована) скорость груза $v_{\text{макс}}$ и его кинетическая энергия E_k максимальны (рис. 21, б).

$$E_k = \frac{mv_{\text{макс}}^2}{2}.$$

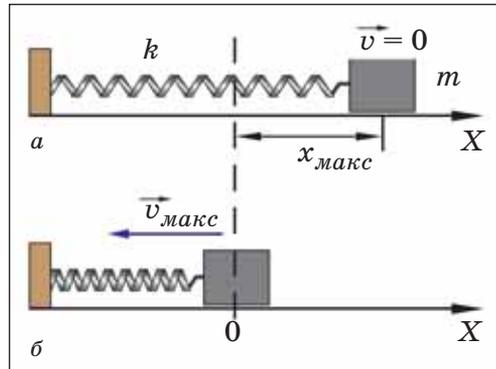


Рис. 21

Остановится ли груз в положении равновесия? Конечно же, нет, груз продолжит движение. Пружина будет сжата, скорость груза уменьшится до нуля, деформированная пружина вновь будет обладать потенциальной энергией, и процесс колебания груза, прикрепленного к пружине, продолжится.

Если груз совершает гармонические колебания, то зависимость координаты груза от времени имеет вид

¹ В честь английского физика Уильяма Томсона (лорда Кельвина), установившего зависимость периода колебаний контура от его ёмкости и индуктивности.

$$x(t) = x_{\text{макс}} \cos \omega t, \quad (3.14)$$

где $x_{\text{макс}}$ – амплитуда координаты колеблющегося тела;
 ω – круговая частота его колебаний.

Скорость тела характеризует быстроту механического движения, следовательно, мгновенная скорость¹ $v(t)$ тела равна производной координаты движущегося тела по времени:

$$v(t) = x'(t).$$

Или с учётом формулы (3.14)

$$v(t) = (x_{\text{макс}} \cos \omega t)',$$

$$v(t) = -\omega x_{\text{макс}} \sin \omega t.$$

Последнее выражение позволяет определить амплитуду скорости колеблющегося груза $v_{\text{макс}}$:

$$v_{\text{макс}} = \omega x_{\text{макс}}. \quad (3.15)$$

Пренебрегая потерями энергии на трение, запишем закон сохранения в виде

$$\frac{kx_{\text{макс}}^2}{2} = \frac{mv_{\text{макс}}^2}{2}.$$

Воспользовавшись соотношением (3.15), получим

$$kx_{\text{макс}}^2 = m(\omega x_{\text{макс}})^2.$$

Отсюда

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (3.16)$$

и

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}}. \quad (3.17)$$

Из формулы (3.17) следует, что чем больше масса груза и чем меньше жёсткость пружины, тем больше период колебаний груза на пружине. Этот вывод легко проверить на опыте.

Анализируя энергетические соотношения, также можно получить выражения для расчёта круговой частоты и периода колебаний маятника. Если маятник представляет собой тело малых размеров (материальную точку), закреплённое на невесомой нерастяжимой нити, то

¹ Точнее, проекция мгновенной скорости $v_x(t)$.

такую модель колебательной системы называют математическим маятником. В случае малых колебаний круговая частота и период колебаний определяются выражениями

$$\omega = \sqrt{\frac{g}{l}} \quad (3.18)$$

и

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}. \quad (3.19)$$

Период колебаний математического маятника не зависит от массы маятника и определяется длиной маятника l и значением ускорения свободного падения g .

Используя маятники равной длины, но разные по массе, на опыте можно убедиться, что периоды колебаний таких маятников действительно одинаковы. Для проверки зависимости периода колебаний от длины удобно использовать маятники, длины которых различаются в четыре раза.



3.6. Длины маятников различаются в четыре раза. Сколько колебаний «короткого» маятника успеет произойти за одно колебание «длинного» маятника?

Для того чтобы подтвердить зависимость периода колебаний маятника от величины ускорения свободного падения, следует «искусственно» увеличить «силу тяжести». Как это можно сделать? Например, использовать железный шарик на нити и расположенный под ним мощный электромагнит (рис. 22).



Доказательство гармоничности свободных колебаний.

Проведём более основательный теоретический анализ свободных колебаний. Пусть в некоторый момент времени при колебаниях в колебательном L -контуре заряд конденсатора равен $q(t)$, а сила тока в контуре $I(t)$. Тогда энергия электрического поля конденсатора $W_{эл}$ и магнитного поля катушки с током W_m равны

$$W_{эл} = \frac{q^2(t)}{2C} \quad \text{и} \quad W_m = \frac{LI^2(t)}{2}.$$

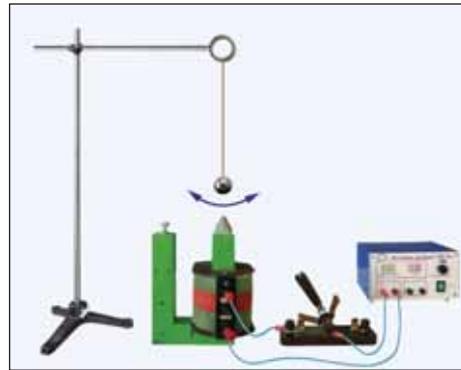


Рис. 22

(При записи выражения для расчёта энергии электрического поля конденсатора мы использовали известное соотношение

$$C = \frac{q(t)}{U(t)}.)$$

По-прежнему пренебрегая затуханием колебаний, будем считать, что полная электромагнитная энергия контура – сумма энергий электрического и магнитных полей – есть величина неизменная¹.

$$\frac{q^2(t)}{2C} + \frac{LI^2(t)}{2} = \text{const.}$$

Вычислим производную по времени от левой и правой частей данного равенства.

$$\frac{2q(t)q'(t)}{2C} + \frac{2LI(t)I'(t)}{2} = 0.$$

Учтём, что мгновенное значение силы тока $I(t)$ есть производная заряда по времени:

$$I(t) = q'(t). \quad (3.20)$$

Тогда

$$\frac{1}{C}q(t) + LI'(t) = 0. \quad (3.21)$$

В последнем выражении второе слагаемое содержит величину $I'(t)$ – производную силы тока по времени. Чтобы выяснить, чему равна эта величина, вычислим производную по времени от левой и правой частей равенства (3.20).

$$I'(t) = q''(t).$$

Производная силы тока по времени $I'(t)$ равна второй производной заряда по времени.

Тогда уравнение (3.21) примет вид

$$\frac{1}{C}q(t) + Lq''(t) = 0,$$

или

$$q''(t) = -\frac{1}{LC}q(t).$$

Введём обозначение $\frac{1}{\sqrt{LC}} = \omega$,
тогда

$$q''(t) = -\omega^2 q(t). \quad (3.22)$$

¹ Иными словами, предполагается, что сопротивление контура R равно нулю.

Проверим, является ли решением данного уравнения зависимость заряда от времени $q(t)$ вида

$$q(t) = q_{\text{макс}} \cos \omega t. \quad (3.23)$$

$$q'(t) = -\omega q_{\text{макс}} \sin \omega t.$$

$$q''(t) = -\omega^2 q_{\text{макс}} \cos \omega t. \quad (3.24)$$

Подставив выражения (3.23) и (3.24) соответственно в правую и левую части уравнения (3.22), мы видим, что зависимость

$$q(t) = q_{\text{макс}} \cos \omega t$$

действительно является решением уравнения (3.22).

Тем самым мы доказали, что свободные электромагнитные колебания в колебательном контуре являются гармоническими и убедилась, что круговая частота ω этих колебаний равна

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}}.$$

Проведя аналогичные вычисления для случая малых колебаний груза на пружине, также можно убедиться, что эти колебания являются гармоническими (при отсутствии силы трения).

Колебания, примеры колебательных систем, в которых возможны свободные колебания; гармонические колебания: $x(t) = x_{\text{макс}} \sin(\omega t + \varphi_0)$; характеристики колебаний: амплитуда, фаза, период, частота, круговая частота колебаний; превращение энергии при свободных колебаниях, $T = 2\pi\sqrt{LC}$, $T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$, $T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$; обоснование гармоничности малых свободных незатухающих колебаний.

3.1 ● Конденсатор какой ёмкости необходимо использовать в колебательном контуре, чтобы период свободных электромагнитных колебаний в контуре составлял 1 с? Индуктивность катушки контура 1 Гн. Сопротивление катушки и соединительных проводов не учитывать.

3.2 ● Конденсатор ёмкостью 8,0 мкФ зарядили до напряжения 10 В и подключили к катушке с малым электрическим сопротивлением индуктивностью 125 мГн. Напишите уравнение зависимости заряда конденсатора от времени при совершении свободных незатухающих колебаний в данном контуре.

3.3 ● При колебаниях груза, прикреплённого к пружине, амплитуда колебаний координаты колеблющегося груза составляет 10 см, а амплитуда колебаний скорости 0,5 м/с. Чему равна круговая частота колебаний?



3.4. Изготовьте маятник длиной 1,2–1,5 м. Измерьте число колебаний, которые совершит маятник за 3–4 мин и определите ускорение свободного падения.

3.5 ● Математический маятник – шарик массой 20 г, висающий на нити длиной 1,09 м, – отклонили от положения равновесия на 9,5 см и отпустили без толчка. Начертите график зависимости кинетической энергии маятника от времени.

§ 4. РЕШЕНИЕ РАСЧЁТНЫХ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ЗАДАЧ ПО ТЕМЕ «СВОБОДНЫЕ КОЛЕБАНИЯ»



Разумный человек интересуется достойными, серьёзными делами, упорно добивается своей цели, и даже воспоминания о перенесённых невзгодах на пути к ней ласкают слух и радуют сердце.

*Абай (1845–1904), казахский мыслитель,
поэт-просветитель*

Вам уже известны основные понятия, характеризующие колебания.

Классификация задач. Вы, вероятно, уже обратили внимание, что разные колебательные системы – колебательный контур, груз, прикреплённый к пружине, маятник – мы рассматривали совместно. Изучение различных колебательных процессов в рамках общего раздела – физики колебаний – объясняется тем, что разные по своей физической природе колебания описываются одинаковыми количественными соотношениями. Это позволяет, в частности, использовать метод аналогии.

Задачи по теме «Свободные колебания» можно разделить на следующие виды:

1. *Задачи на расчёт параметров колебательной системы.*

При решении этих задач используются формулы

– периода электромагнитных колебаний в колебательном контуре

$$T = 2\pi\sqrt{LC};$$

– периода колебаний груза, прикреплённого к пружине,

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}} ;$$

– периода колебаний математического маятника

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}} ;$$

– связи частоты и периода колебаний

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

– связи круговой частоты и частоты колебаний

$$\omega = 2\pi\nu.$$

2. Задачи на расчёт величин, характеризующих колебания.

– Используется график колебаний для определения амплитуды, периода колебаний.

– Используется аналитическая запись колебания для определения амплитуды, круговой частоты и фазы колебаний.

– Применяется математическая операция вычисления производной некоторой физической величины для определения, например, силы тока, ЭДС самоиндукции, скорости, ускорения и так далее.

3. Задачи на анализ энергетических процессов, происходящих в колебательной системе.

Применяется закон сохранения энергии и используются формулы

– для расчёта энергии электрического поля конденсатора

$$W_{эл} = \frac{CU^2}{2}$$

и энергии магнитного поля катушки с током

$$W_{м} = \frac{LI^2}{2} ;$$

– для расчёта потенциальной энергии упруго деформированной пружины

$$E_n = \frac{kx^2}{2}$$

и кинетической энергии колеблющегося тела

$$E_k = \frac{mv^2}{2}.$$

4. Комбинированные задачи.

Комбинированная задача включает в себя несколько простых задач (и не обязательно все эти задачи по теме «Свободные колебания»). Вначале решаются отдельно простые задачи, а затем объединение полученных результатов приводит к решению комбинированной задачи.

Примеры решения задач.

Задача 1. В колебательный контур с малым электрическим сопротивлением включен конденсатор ёмкостью $C = 0,5$ мкФ и катушка с индуктивностью $L = 20$ мГн. Запишите уравнение зависимости напряжения, заряда на конденсаторе, силы тока в контуре, магнитного потока в катушке, ЭДС самоиндукции в катушке от времени. Сравните фазы данных величин. Первоначально конденсатор заряжен до напряжения $U_{\text{макс}} = 5$ В. Затуханием колебаний пренебречь.

Решение:

Так как в колебательном контуре происходят гармонические колебания, то напряжение меняется по гармоническому закону

$$U(t) = U_{\text{макс}} \cos \omega t, \quad (4.1)$$

где ω – круговая частота колебаний,

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}}. \quad (4.2)$$



4.1. Почему в качестве тригонометрической функции, по которой происходит изменение напряжения, выбрана именно функция косинус, а не синус?

По определению, электроёмкость C равна

$$C = \frac{q(t)}{U(t)},$$

где $q(t)$ – заряд конденсатора.

С учётом (4.1) имеем

$$q(t) = CU_{\text{макс}} \cos \omega t. \quad (4.3)$$

Сила тока есть производная функции заряда по времени:

$$I(t) = q'(t).$$

$$I(t) = CU_{\text{макс}} \sin \omega t$$

или

$$I(t) = \omega CU_{\text{макс}} \cos\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right). \quad (4.4)$$

Магнитный поток $\Phi(t)$, пронизывающий катушку, определяется индуктивностью катушки и силой тока в ней:

$$\Phi(t) = LI(t).$$

С учётом (4.4) имеем

$$\Phi(t) = \omega LCU_{\max} \cos(\omega t + \frac{\pi}{2}).$$

Или, если использовать соотношение (4.2), то

$$\Phi(t) = \sqrt{LC} U_{\max} \cos(\omega t + \frac{\pi}{2}).$$

ЭДС самоиндукции, возникающая в катушке при изменении силы тока в катушке, рассчитывается по формуле

$$\mathcal{E} = -LI'(t).$$

Тогда

$$\mathcal{E} = -L [\omega CU_{\max} \cos(\omega t + \frac{\pi}{2})],$$

$$\mathcal{E} = \omega^2 LCU_{\max} \sin(\omega t + \frac{\pi}{2})$$

или

$$\mathcal{E} = \frac{1}{LC} LCU_{\max} \sin(\omega t + \frac{\pi}{2}),$$

$$\mathcal{E} = U_{\max} \cos \omega t.$$

Сравнивая фазу колебаний заряда, напряжения, силы тока, магнитного потока и ЭДС самоиндукции, мы можем сделать вывод, что фазы колебаний заряда, напряжения и ЭДС самоиндукции одинаковы и отличаются от фазы колебаний силы тока и магнитного потока на $\pi/2$.



4.2. Совершают ли в колебательном контуре гармонические колебания энергия электрического поля и энергия магнитного поля?

(Дальнейшие действия по решению задачи выполните самостоятельно.)

Ответ: $U(t) = 5 \cos(10^4 t)$ В,

$$q(t) = 2,5 \cdot 10^{-6} \cos(10^4 t) \text{ Кл},$$

$$I(t) = 2,5 \cdot 10^{-2} \cos(10^4 t + \frac{\pi}{2}) \text{ А},$$

$$\Phi(t) = 5 \cdot 10^{-4} \cos(10^4 t + \frac{\pi}{2}) \text{ Вб},$$

$$\mathcal{E}(t) = 5 \cos(10^4 t) \text{ В}.$$

Задача 2. Конденсатор ёмкостью $C = 2$ мкФ зарядили до напряжения $U_{\max} = 12$ В и замкнули на катушку индуктивностью $L = 10$ мГн. Чему равна сила тока I в цепи, когда напряжение на конденсаторе равно $U = 6$ В?

Решение:

Конденсатор и катушка образуют колебательный контур, в котором происходят периодические превращения энергии электрического поля в энергию магнитного поля.

В начальный момент времени тока в цепи нет, энергия магнитного поля равна нулю, и вся электромагнитная энергия контура W_1 равна энергии электрического поля конденсатора.

$$W_1 = \frac{CU^2_{\text{макс}}}{2}.$$

В тот момент времени, когда напряжение на конденсаторе равно U , а сила тока в контуре – I , электромагнитная энергия контура W_2 равна сумме энергий электрического поля конденсатора и магнитного поля катушки с током:

$$W_2 = \frac{CU^2}{2} + \frac{LI^2}{2}.$$

Если считать, что контур идеальный и «потерь» энергии на преодоление электрического сопротивления нет, то

$$W_1 = W_2.$$

(Дальнейшие действия по решению задач выполните самостоятельно.)

Ответ: $I = 15$ мА.



4.3. Можете ли вы предложить иной способ решения, например, основанный на использовании соотношений (4.1), (4.2), (4.4)?

Задача 3. Между двумя пружинами жёсткостью k_1 и k_2 соответственно, находящимися в недеформированном состоянии, закреплён груз массой m , который может скользить по гладкой горизонтальной поверхности (рис. 23). Определите период T малых колебаний, которые будет совершать груз, если его вывести из положения равновесия.

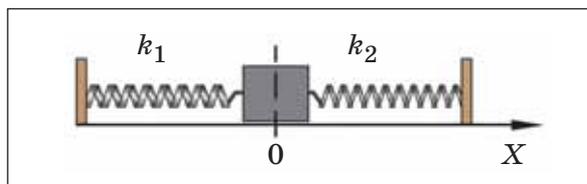


Рис. 23

Решение:

Пусть груз (рис. 23) сместили вправо от положения равновесия. Тогда левая пружина жёсткостью k_1 будет сжата, а правая пружина жёсткостью k_2 – растянута. Равнодействующая сила при этом направлена к положению равновесия. Под действием сил упругости груз будет возвращаться к положению равновесия, приобретёт некоторую скорость и по инерции «проскочит» положение равновесия. При этом он сместится вправо от положения равновесия, правая пружина жёсткостью k_2 будет сжата, а левая пружина жёсткостью k_1 – растянута. Равнодействующая сила в этом случае вновь направлена к положению

равновесия, и груз вновь будет возвращаться в положение равновесия. Так происходят колебания груза.

Пусть груз совершает гармонические колебания вдоль оси X с круговой частотой ω и амплитудой колебаний координаты $x_{\text{макс}}$. Запишем зависимость координаты $x(t)$ колеблющегося тела от времени в виде

$$x(t) = x_{\text{макс}} \cos \omega t.$$



4.4. Как определить зависимость мгновенной скорости от времени?

Амплитуда колебаний скорости $v_{\text{макс}}$, очевидно, равна

$$v_{\text{макс}} = \omega x_{\text{макс}}. \quad (4.5)$$

Пусть в начальный момент времени тело смещено вправо от положения равновесия на амплитудное расстояние $x_{\text{макс}}$. При этом левая пружина, имеющая жёсткость k_1 (рис. 23), будет растянута и её потенциальная энергия упругой деформации будет равна

$$E_1 = \frac{k_1 x_{\text{макс}}^2}{2}. \quad (4.6)$$

Правая пружина будет при этом сжата, и её потенциальная энергия составит

$$E_2 = \frac{k_2 x_{\text{макс}}^2}{2}. \quad (4.7)$$

Кинетическая энергия груза в этот момент равна нулю.

В тот момент времени, когда груз проходит положение равновесия, и левая, и правая пружины не деформированы, а скорость груза $v_{\text{макс}}$ и его кинетическая энергия E_k максимальны:

$$E_k = \frac{mv_{\text{макс}}^2}{2}. \quad (4.8)$$

В соответствии с законом сохранения энергии

$$E_1 + E_2 = E_k.$$

Или с учётом соотношений (4.6) – (4.8)

$$\frac{k_1 x_{\text{макс}}^2}{2} + \frac{k_2 x_{\text{макс}}^2}{2} = \frac{mv_{\text{макс}}^2}{2}. \quad (4.9)$$

Соотношения (4.5) и (4.9) позволяют определить круговую частоту и период колебаний.

(Дальнейшие действия по решению задачи выполните самостоятельно.)

Ответ: $T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k_1 + k_2}}.$

Задача 4. Математический маятник – шарик массой m , висающий на длинной нити, – имеет период T_0 . Шарик у сообщили положительный заряд q и поместили маятник в однородное электрическое поле, силовые линии которого направлены вертикально вниз (рис. 24). В присутствии поля период колебаний маятника стал равным T . Определите напряжённость электрического поля E .

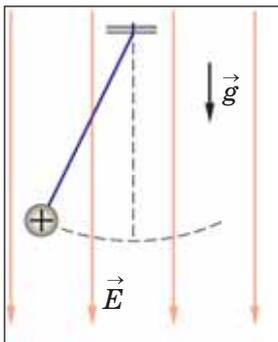


Рис. 24

Решение:

Рассмотрим силы, действующие на маятник (рис. 25, а, б). В положении равновесия сила натяжения уравнивает силу тяжести (рис. 25, а):

$$N_0 = mg. \quad (4.10)$$

При отклонении от положения равновесия равнодействующая сила направлена к положению равновесия, и маятник движется ускоренно:

$$\vec{N}'_0 + \vec{F}_T = m\vec{a}.$$

Период возникающих при этом колебаний, как известно, равен

$$T_0 = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}, \quad (4.11)$$

где l – длина нити маятника.

При движении маятника в электрическом поле на шарик дополнительно действует электрическая сила \vec{F} , равная

$$\vec{F} = \vec{E}q. \quad (4.12)$$

Так как шарик обладает положительным зарядом, то эта сила направлена так же, как направлены силовые линии – вертикально вниз (рис. 26, а, б). В положении равновесия сила натяжения равна (рис. 26, а)

$$N = mg + F.$$

Или с учётом соотношения (4.12)

$$N = mg + Eq,$$

$$N = m\left(g + \frac{Eq}{m}\right). \quad (4.13)$$

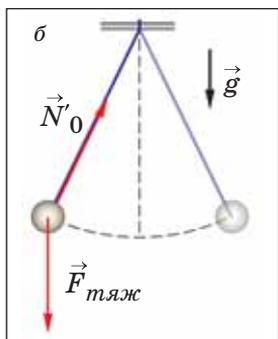
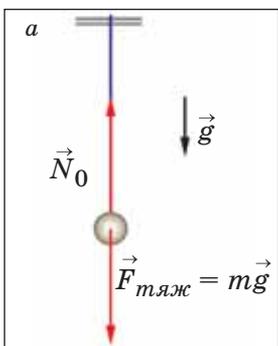


Рис. 25

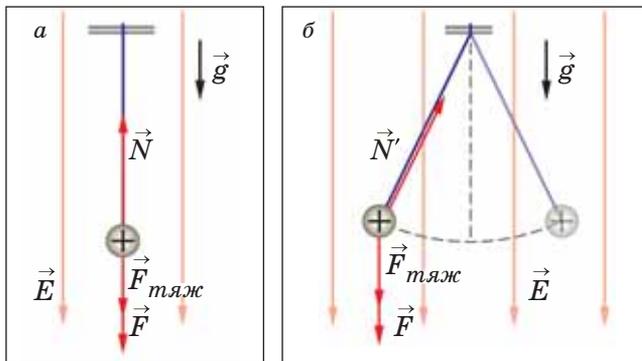


Рис. 26

При отклонении от положения равновесия (рис. 26, б) равнодействующая сила также направлена к положению равновесия, и маятник движется ускоренно:

$$\vec{N}' + \vec{F}_T + \vec{F} = m\vec{a}.$$

Введём обозначение

$$g^* = g + \frac{Eq}{m}. \quad (4.14)$$

Тогда соотношение (4.13) запишется в виде

$$N = mg^*.$$

Период колебаний маятника в усиленном «гравитационно-электрическом» поле будет рассчитываться по формуле, аналогичной формуле (4.11):

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g^*}},$$

или с учётом соотношения (4.14)

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g + \frac{Eq}{m}}}. \quad (4.15)$$

Из соотношений (4.11) и (4.15) имеем

$$\frac{T_0}{T} = \sqrt{\frac{g + \frac{Eq}{m}}{g}},$$

$$\left(\frac{T_0}{T}\right)^2 = \frac{g + \frac{Eq}{m}}{g},$$

$$\left(\frac{T_0}{T}\right)^2 = 1 + \frac{Eq}{mg}.$$

Отсюда

$$E = \frac{mg}{q} \left(\left(\frac{T_0}{T}\right)^2 - 1 \right).$$

Ответ: $E = \frac{mg}{q} \left(\left(\frac{T_0}{T}\right)^2 - 1 \right).$



Лабораторная работа «Изучение колебаний тела, плавающего в жидкости».

Оборудование: сосуд с водой, термометр лабораторный, кусок пластилина, спички, секундомер.

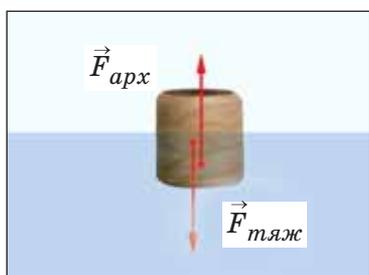


Рис. 27

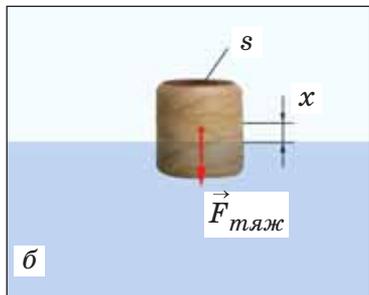
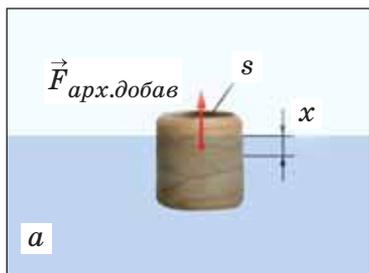


Рис. 28

На тело, плавающее на поверхности воды (рис. 27), действует сила тяжести и выталкивающая (архимедова) сила, которая зависит от плотности жидкости и от объёма погружённой в жидкость части тела:

$$F_{арх} = \rho g V_{погр},$$

где ρ – плотность жидкости;

$V_{погр}$ – объём погружённой в жидкость части тела.

Если толкнуть тело вниз, увеличив глубину его погружения (рис. 28, а), то архимедова сила увеличивается на величину $V_{арх.добав}$, которая равна

$$V_{арх.добав} = \rho g V_{погр.добав}, \quad (4.16)$$

где $V_{погр.добав}$ – дополнительный объём, на который погружено тело.

Под действием добавочной архимедовой силы тело будет двигаться, всплывая к положению равновесия, приобретёт скорость и, «проскочив» положение равновесия, всплывёт так, что объём погружённой части тела уменьшается (рис. 28, б). В этой ситуации сила тяжести будет больше архимедовой силы, и равнодействующая вновь будет возвращать тело к положению равновесия. Так происходят колебания тела, плавающего в жидкости.

По II закону Ньютона,

$$m\vec{a} = \vec{F}_{арх. донав},$$

где m – масса тела;

\vec{a} – ускорение, с которым движется тело;

$\vec{F}_{арх. донав}$ – равнодействующая сила, приложенная к телу.

В проекции на вертикальную ось (рис. 28, а) имеем

$$ma = -F_{арх. донав}.$$

Или с учётом соотношения (4.16)

$$ma = -\rho g V_{погр. донав}. \quad (4.17)$$

Если тело сместилось на x от положения равновесия, то дополнительный объём $V_{погр. донав}$, на который погрузилось тело, равен

$$V_{погр. донав} = sx,$$

где s – площадь поперечного сечения тела.

Тогда выражение (4.17) примет вид

$$ma = -\rho g s x. \quad (4.18)$$

Проверим, являются ли рассматриваемые колебания гармоническими. При гармонических колебаниях координата колеблющегося тела изменяется с течением времени по закону синуса (или косинуса):

$$x(t) = x_{макс} \sin \omega t, \quad (4.19)$$

где ω – круговая частота колебаний.

Скорость характеризует быстроту изменения координаты тела, а ускорение – быстроту изменения скорости. Поэтому

$$v(t) = x'(t)$$

и

$$a(t) = v'(t).$$

Проведём вычисления.

$$v(t) = (x_{макс} \sin \omega t)'$$

$$v(t) = \omega x_{макс} \cos \omega t.$$

$$a = (\omega x_{макс} \cos \omega t)'$$

$$a = -\omega^2 x_{макс} \sin \omega t. \quad (4.20)$$

Если колебания тела, плавающего в жидкости, действительно являются гармоническими, то выражение (4.19) должно являться решением уравнения (4.18). Подставим выражения (4.18) и (4.19) в уравнение (4.20) и проверим это.

$$-m\omega^2 x_{\text{макс}} \sin \omega t = -\rho g s x_{\text{макс}} \sin \omega t.$$

$$\omega^2 = \frac{\rho g s}{m}.$$

Итак, колебания действительно являются гармоническими и круговая частота этих колебаний равна

$$\omega = \sqrt{\frac{\rho g s}{m}}. \quad (4.21)$$

Определим также период колебаний T :

$$T = \frac{2\pi}{\omega}.$$

Или, используя соотношение (4.21), имеем

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{\rho g s}}. \quad (4.22)$$

Указания к работе:



Задание 1. Укрепите в верхней части лабораторного термометра с помощью пластилина спичку и утяжелите термометр пластилином так, чтобы он плавал в воде вертикально, погружившись в воду на большую часть своей длины (рис. 29).

Толкните термометр вниз и наблюдайте происходящие колебания. Оцените, чему равен период колебаний.



Задание 2. Дополнительно утяжелите термометр так, чтобы из воды «выглядывала» бы только часть спички. Вновь наблюдайте колебания.

Сделайте вывод, подтверждается ли качественно формула (4.22) для расчёта периода колебаний тела, плавающего в жидкости.

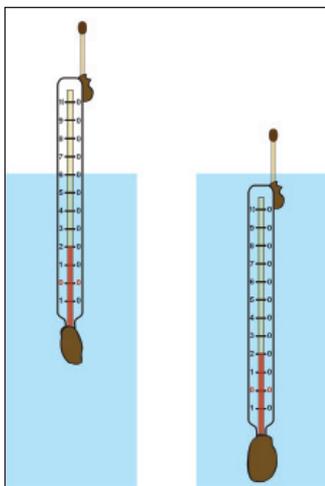


Рис. 29

4.1 ● Какова должна быть индуктивность катушки колебательного контура, чтобы частота свободных электромагнитных колебаний составляла 1 кГц при ёмкости конденсатора контура 10 мкФ?

4.2 ● Тело массой 0,4 кг совершает гармонические колебания так, что координата тела изменяется с течением времени по закону

$$x(t) = 0,02 \sin(20\pi t + \pi/4) \text{ (м)}.$$

Определите амплитуду, круговую частоту, период колебаний, а также координату, фазу, скорость, ускорение, кинетическую энергию, импульс и силу, действующую на тело, в момент времени 0,2 с.

4.3 ● На рисунке 30 изображён график зависимости свободных электромагнитных колебаний в контуре. Чему равен максимальный заряд конденсатора при данных колебаниях?



4.4. Маятник – ведро с водой, подвешенное на длинной верёвке, – совершает малые колебания. Будет ли с течением времени изменяться период этих колебаний, если в дне ведра проделать отверстие и предоставить возможность воде вытекать из ведра? Ответ обосновать. Проверьте свой ответ на опыте.

4.5 ● Коллеги лауреата Нобелевской премии по физике Изидора Айзека Раби (1898–1988) в своих воспоминаниях пишут, что профессор Раби очень гордился тем, что его ручные механические часы всегда ходили чрезвычайно точно. Но однажды, когда он поднялся на вершину горы для участия в эксперименте с космическими лучами, его часы стали несколько спешить. Как объяснить этот эффект?

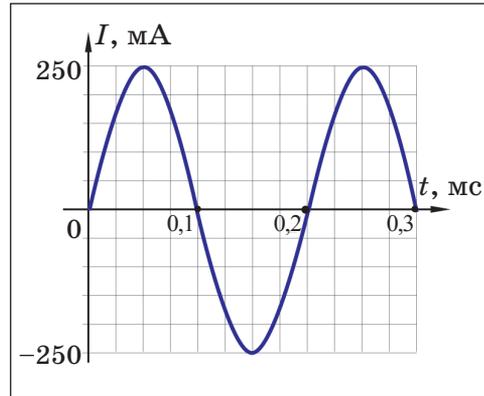
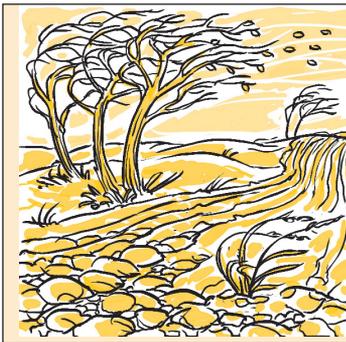


Рис. 30



§ 5. ВЫНУЖДЕННЫЕ КОЛЕБАНИЯ

Лишь изредка с унылым свистом
Бунтует вихорь в поле чистом
И на краю седых небес
Качает обнажённый лес.
*Александр Сергеевич Пушкин (1799–1837),
поэма «Руслан и Людмила»*

Вам уже известно, что помимо свободных колебаний возможны и вынужденные колебания.

Вынужденные электромагнитные колебания. Пусть проволочная рамка площадью S располагается в однородном магнитном поле индукцией \vec{B} так, что плоскость рамки перпендикулярна силовым линиям магнитного поля (рис. 31, а).



5.1. Чему равен магнитный поток, пронизывающий рамку (рис. 31, а)?

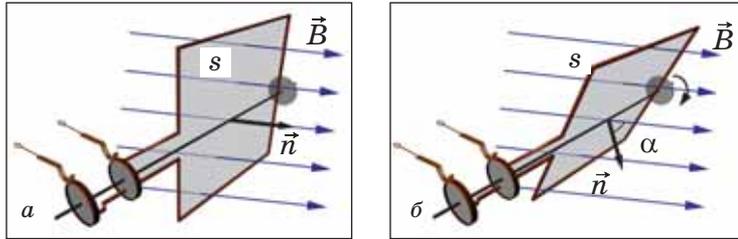


Рис. 31

Приведём рамку во вращение (рис. 31, б). При этом магнитный поток, пронизывающий рамку, изменяется. Если вектор магнитной индукции \vec{B} составляет с нормалью (перпендикуляром) к плоскости рамки \vec{n} угол α , то магнитный поток Φ равен

$$\Phi = Bs \cos \alpha. \quad (5.1)$$

Пусть рамка вращается с периодом T . Тогда за некоторое время t рамка повернётся на угол α рад, а за время, равное периоду T , – на угол 2π рад. Составим пропорцию

$$\frac{\alpha - t}{2\pi - T}.$$

Отсюда

$$\alpha = \frac{2\pi}{T} \cdot t.$$

Вспомним соотношение (3.5), устанавливающее связь между круговой (циклической) частотой ω и периодом T :

$$\omega = \frac{2\pi}{T}.$$

Следовательно, угол α равен

$$\alpha = \omega t.$$

С учётом последнего выражения зависимость (5.1) магнитного потока от времени будет иметь вид

$$\Phi(t) = Bs \cos \omega t. \quad (5.2)$$

Таким образом, при равномерном вращении рамки магнитный поток, пронизывающий рамку, изменяется по гармоническому закону.

Воспользуемся законом электромагнитной индукции и определим ЭДС, возникающую в рамке.

$$\mathcal{E}(t) = -\Phi'(t),$$

или с учётом соотношения (5.2)

$$\mathcal{E}(t) = - (Bs \cos \omega t)',$$

$$\mathcal{E}(t) = \omega Bs \sin \omega t. \quad (5.3)$$

Как следует из уравнения (5.3), ЭДС, возникающая при вращении рамки в магнитном поле, также изменяется по гармоническому закону.



5.2. Что называют амплитудой колебаний?

Так как наибольшее значение функции косинуса равно 1, то амплитуда ЭДС $\mathcal{E}_{\text{макс}}$ будет равна

$$\mathcal{E}_{\text{макс}} = \omega Bs. \quad (5.4)$$

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}_{\text{макс}} \sin \omega t. \quad (5.5)$$

Подключим к рамке – источнику переменной ЭДС – резистор сопротивлением R . В соответствии с законом Ома для полной цепи сила тока I составит

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R_{\text{полн}}},$$

где $R_{\text{полн}}$ – полное сопротивление цепи (резистора и проволочной рамки). Так как ЭДС переменна, то сила тока в цепи также с течением времени изменяется:

$$I(t) = \frac{\mathcal{E}_{\text{макс}}}{R_{\text{полн}}} \sin \omega t.$$

Амплитуда тока $I_{\text{макс}}$ равна

$$I_{\text{макс}} = \frac{\mathcal{E}_{\text{макс}}}{R_{\text{полн}}}.$$

$$I(t) = I_{\text{макс}} \sin \omega t. \quad (5.6)$$

По закону Ома для участка цепи, содержащей резистор сопротивлением R ,

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

Отсюда

$$U = IR$$

или с учётом соотношения (5.6)

$$U(t) = I_{\text{макс}} R \sin \omega t.$$

Амплитуда напряжения $U_{\text{макс}}$ равна

$$U_{\text{макс}} = I_{\text{макс}} R$$

и

$$U(t) = U_{\text{макс}} \sin \omega t . \quad (5.7)$$

Таким образом, под действием ЭДС, изменяющейся по гармоническому закону, в электрической цепи возникают гармонические колебания силы тока и напряжения. *Вынужденные электромагнитные колебания называют переменным током.*

Каковы отличия вынужденных электромагнитных колебаний – переменного тока – от свободных электромагнитных колебаний? Во-первых, вынужденные колебания происходят не самопроизвольно, а под действием переменной, гармонически изменяющейся ЭДС. Во-вторых, вынужденные колебания происходят с частотой, равной частоте изменения ЭДС, а свободные колебания совершаются с частотой, определяемой параметрами контура (его электроёмкостью и индуктивностью). В-третьих, вынужденные колебания, в отличие от свободных, являются незатухающими – амплитуда колебаний с течением времени не уменьшается.



5.3. Почему накал лампы, подключённой к модели генератора переменного тока (рис. 32), возрастает при увеличении частоты вращения генератора?

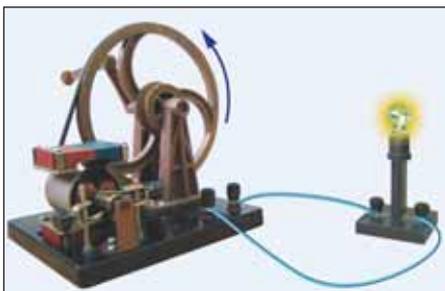


Рис. 32

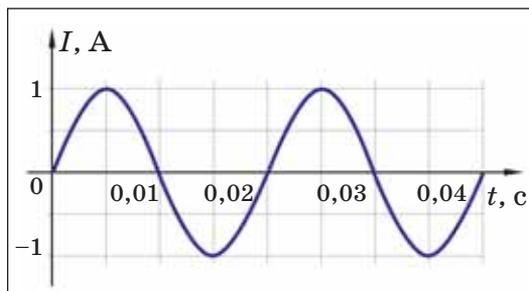


Рис. 33

Промышленными генераторами вырабатывается переменный ток частотой 50 Гц¹. Это означает, что 100 раз за секунду сила тока в цепи и напряжение становятся равными нулю, 100 раз за секунду сила тока достигает своего максимального значения (рис. 33).

¹ В некоторых странах (США, Южная Корея, западные области Японии) частота промышленного переменного тока 60 Гц.

Включим электроизмерительные приборы – амперметр и вольтметр – в цепь переменного тока (рис. 34).

Что же показывают приборы, если сила тока и напряжение переменны? Оказывается, электроизмерительные приборы, предназначенные для использования в цепях переменного тока, сконструированы таким образом, что они регистрируют некоторые «усреднённые» значения силы тока и напряжения. Электроизмерительные приборы – вольтметр и амперметр – фиксируют так называемые *действующее значение напряжения U и действующее значение силы тока I* , которые в случае синусоидального характера переменного тока в $\sqrt{2}$ раз меньше амплитудных значений силы тока $I_{\text{макс}}$ и напряжения $U_{\text{макс}}$.

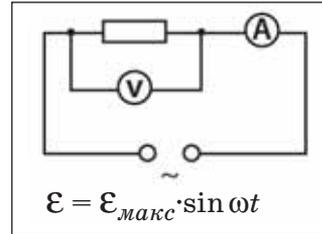


Рис. 34

$$U = \frac{U_{\text{макс}}}{\sqrt{2}}, \quad (5.8)$$

$$I = \frac{I_{\text{макс}}}{\sqrt{2}}. \quad (5.9)$$

Пусть, например, на рисунке 33 изображён график зависимости силы тока от времени в цепи переменного тока (рис. 34). Тогда показание амперметра будет равно

$$I = \frac{1 \text{ А}}{\sqrt{2}} = 0,71 \text{ А}.$$



5.4. Как рассчитывается электрическая мощность?

Мощность постоянного тока $P_{\text{пост}}$ определяется напряжением $U_{\text{пост}}$ и силой тока в цепи $I_{\text{пост}}$.

$$P_{\text{пост}} = U_{\text{пост}} I_{\text{пост}}.$$

Аналогично мгновенную мощность $P(t)$ определим как произведение мгновенного значения силы тока на мгновенное значение напряжения:

$$P(t) = U(t) I(t).$$

Используем известные зависимости силы тока и напряжения от времени – выражения (5.6) и (5.7). Тогда

$$P(t) = U_{\text{макс}} I_{\text{макс}} \sin^2 \omega t.$$

Воспользуемся тригонометрическим преобразованием

$$2 \sin^2 \varphi = 1 - \cos 2\varphi,$$

следовательно,

$$\sin^2 \omega t = \frac{1 - \cos 2\omega t}{2}$$

и мгновенная мощность $P(t)$ равна

$$P(t) = \frac{U_{\max} I_{\max} (1 - \cos 2\omega t)}{2},$$

$$P(t) = \frac{U_{\max} I_{\max}}{2} - \frac{U_{\max} I_{\max}}{2} \cos 2\omega t. \quad (5.10)$$

Теперь легко понять, чему равна средняя за период колебания мощность тока P . Для этого необходимо вычислить среднее значение мгновенной мощности. При расчете среднего значения мы видим, что первое слагаемое в формуле (5.10) от времени не зависит. Что касается второго слагаемого, то нужно будет все значения функции $\cos 2\omega t$ сложить и разделить на число этих значений. Но в пределах одного периода колебаний каждому положительному значению функции $\cos 2\omega t$, очевидно, соответствует такое же отрицательное значение. Значит, среднее значение второго слагаемого в формуле (5.10) равно нулю, и при усреднении мощности за период «выживает» только первое слагаемое.

$$P = \frac{U_{\max} I_{\max}}{2}.$$

$$P = \frac{U_{\max}}{\sqrt{2}} \cdot \frac{I_{\max}}{\sqrt{2}}.$$

С учётом соотношений (5.8) и (5.9), определяющих действующее значение силы тока и напряжения, имеем

$$P = UI. \quad (5.11)$$

Средняя мощность, выделяющаяся в цепи переменного тока, равна произведению действующего значения силы тока на действующее значение напряжения.

Производство, трансформация и передача электроэнергии. Переменному току принадлежит ведущая роль в электроэнергетике. Чем же это обусловлено? Какие достоинства переменного тока определили его место в быту, промышленности, транспорте, науке?

Электроэнергию достаточно просто получить. В промышленных *индукционных генераторах* кинетическая энергия падающей воды (на гидроэлектростанциях ГЭС) или водяного пара (на теплоэлектростанциях ТЭС и атомных электростанциях АЭС) превращается в кинетическую энергию вращающегося ротора генератора, а затем в электрическую энергию переменного тока (рис. 35).



Рис. 35. Быстроходная паровая турбина

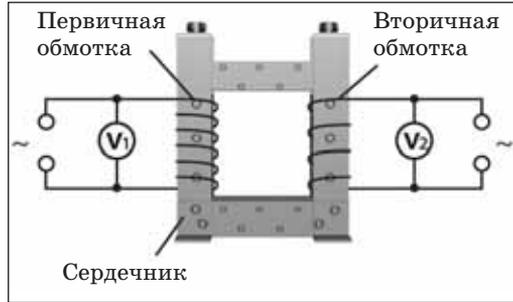


Рис. 36

Переменный ток достаточно легко трансформировать (преобразовать). С помощью *трансформаторов* можно повысить (или понизить) напряжение переменного тока. Напомним, каков принцип действия трансформатора (рис. 36). Трансформатор состоит из двух катушек – первичной и вторичной обмоток, расположенных на замкнутом железном сердечнике. Если по первичной обмотке проходит переменный ток, то он создаёт переменное магнитное поле и переменный магнитный поток, пронизывающий витки и первичной, и вторичной обмоток. Пусть магнитный поток равен $\Phi(t)$. Тогда ЭДС \mathcal{E}_0 , возникающая в одном витке первичной и вторичной обмоток, равна

$$\mathcal{E}_0(t) = -\Phi'(t).$$

Если число витков в первичной обмотке равно N_1 , а во вторичной N_2 , то ЭДС в первичной и вторичной обмотках трансформатора будут соответственно равны

$$\mathcal{E}_1(t) = N_1 \mathcal{E}_0(t)$$

и

$$\mathcal{E}_2(t) = N_2 \mathcal{E}_0(t),$$

или

$$\mathcal{E}_1(t) = -N_1 \Phi'(t)$$

и

$$\mathcal{E}_2(t) = -N_2 \Phi'(t).$$

Таким образом,

$$\frac{\mathcal{E}_1(t)}{\mathcal{E}_2(t)} = \frac{N_1}{N_2}. \quad (5.12)$$

Так как ЭДС в первичной и вторичной обмотках определяется быстротой изменения одного и того же магнитного потока, то равенство (5.12) будет справедливо не только для мгновенных значений ЭДС, но также и для амплитудных и действующих значений ЭДС \mathcal{E}_1 и \mathcal{E}_2 .

$$\frac{\mathcal{E}_1}{\mathcal{E}_2} = \frac{N_1}{N_2}. \quad (5.13)$$

Подключим к первичной и вторичной обмоткам трансформатора вольтметры и измерим напряжение (действующие значения) U_1 и U_2 на первичной и вторичной обмотках (рис. 36). Вольтметры покажут значения напряжения, которые зависят от ЭДС и близки к ней по величине. Поэтому для напряжений U_1 и U_2 на первичной и вторичной обмотках приближённо справедливо равенство, аналогичное равенству (5.13):

$$\boxed{\frac{U_1}{U_2} \approx \frac{N_1}{N_2}}. \quad (5.14)$$

Во сколько раз больше число витков во вторичной обмотке N_2 в сравнении с числом витков в первичной обмотке N_1 , во столько же раз напряжение во вторичной обмотке U_2 больше напряжения U_1 в первичной обмотке.

Трансформатор – прибор, который не «вырабатывает» электроэнергию, а преобразует её, осуществляя её передачу из первичной обмотки во вторичную обмотку. Поэтому мощность в первичной цепи примерно равна мощности во вторичной обмотке¹.

$$P_1 \approx P_2.$$

Или с учётом соотношения (5.11) имеем

$$\boxed{U_1 I_1 \approx U_2 I_2}. \quad (5.15)$$

¹ Равенство мощностей в первичной и вторичной обмотках трансформатора выполняется приближённо, так как при включении трансформатора в электрическую цепь часть энергии расходуется на нагревание проводников в обмотках трансформатора, часть энергии выделяется в процессе перемагничивания сердечника.

Следовательно, во сколько раз повышают с помощью трансформатора напряжение, во столько раз уменьшают силу тока во вторичной цепи в сравнении с первичной цепью.



5.5. Какую из обмоток понижающего трансформатора – первичную или вторичную – следует изготовить из провода большего сечения?

Ещё одно из достоинств переменного тока – *возможность передать его от места получения к месту потребления*. Передача электроэнергии производится с помощью линий электропередач (ЛЭП), но это сопровождается неизбежными потерями, связанными с нагреванием проводов ЛЭП при прохождении тока по ним. Для того чтобы уменьшить потери электроэнергии, следует уменьшить силу тока в проводах линии электропередач (вспомните закон Джоуля и Ленца). По этой причине *передача электроэнергии производится при повышенном напряжении в сотни киловольт*.



Трёхфазный ток. Представим себе, что статор генератора переменного тока содержит не одну обмотку, в которой возникает переменная ЭДС при вращении ротора, а три. Пусть эти три обмотки повернуты относительно друг друга на 120° . Такой генератор называют *трёхфазным* (рис. 37, а, б). В трёх обмотках генератора возникают ЭДС индукции $\mathcal{E}_1, \mathcal{E}_2, \mathcal{E}_3$, колебания которых отличаются по фазе на $\frac{2\pi}{3}$ рад. Если к обмоткам – источникам ЭДС – подключить одинаковые нагрузки, то в трёх электрических цепях будут протекать переменные токи (рис. 38).

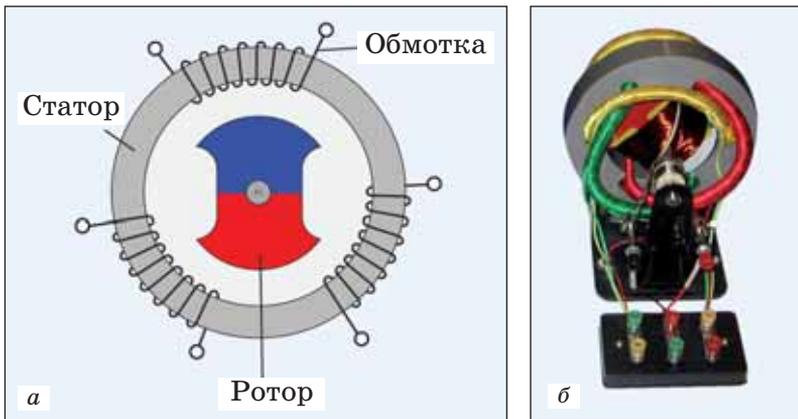


Рис. 37. Трёхфазный генератор переменного тока:
а – схема расположения обмоток генератора;
б – модель генератора

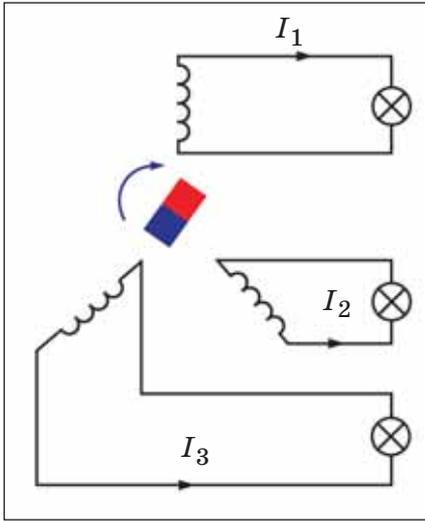


Рис. 38

Колебания силы тока $I_1(t)$, $I_2(t)$, $I_3(t)$ имеют одинаковые амплитудные значения, но отличаются по фазе на $\frac{2\pi}{3}$ рад.

$$I_1(t) = I_{\text{макс}} \cos \omega t,$$

$$I_2(t) = I_{\text{макс}} \cos(\omega t + \frac{2\pi}{3}),$$

$$I_3(t) = I_{\text{макс}} \cos(\omega t + \frac{2\pi}{3}).$$

Представим, что провода, в которых идут токи I_1 , I_2 , I_3 (рис. 38), соединили в единый провод. Чему будет равен ток $I(t)$ в этом проводе?

$$I(t) = I_1(t) + I_2(t) + I_3(t),$$

$$I(t) = I_{\text{макс}} \cos \omega t + I_{\text{макс}} \cos(\omega t + \frac{2\pi}{3}) + I_{\text{макс}} \cos(\omega t + \frac{4\pi}{3}),$$

$$I(t) = I_{\text{макс}} \cos \omega t + I_{\text{макс}} [\cos(\omega t + \frac{4\pi}{3}) + \cos(\omega t + \frac{2\pi}{3})],$$

$$I(t) = I_{\text{макс}} \cos \omega t +$$

$$+ I_{\text{макс}} \left[2 \cos\left(\frac{\omega t + \frac{4\pi}{3} + \omega t + \frac{2\pi}{3}}{2}\right) \cdot \cos\left(\frac{\omega t + \frac{4\pi}{3} - \omega t - \frac{2\pi}{3}}{2}\right) \right],$$

$$I(t) = I_{\text{макс}} \cos \omega t + 2I_{\text{макс}} \cos(\omega t + \pi) \cos \frac{\pi}{3},$$

$$I(t) = I_{\text{макс}} \cos \omega t - I_{\text{макс}} \cos \omega t,$$

$$I(t) = 0.$$

Сила тока в общем проводе равна нулю!

Какой же практический вывод следует из этого, на первый взгляд, парадоксального факта? Если имеется три отдельных генератора переменного тока, то для передачи электроэнергии от генераторов к

потребителям потребуется три линии электропередачи – шесть проводов. Если же три генератора объединить в один трёхфазный генератор, который будет вырабатывать три ЭДС, колебания которых отличаются по фазе на $\frac{2\pi}{3}$, то можно обойтись меньшим числом проводов! Это весьма солидная экономия металла и средств. Такого рода электротехнические системы называют *трёхфазным током*. Решающий вклад в создание техники трёхфазного тока был сделан русским электротехником Михаилом Осиповичем Доливо-Добровольским (1861/62–1919). Им были предложены конструкции трёхфазного генератора, трёхфазного трансформатора, трёхфазного электродвигателя.

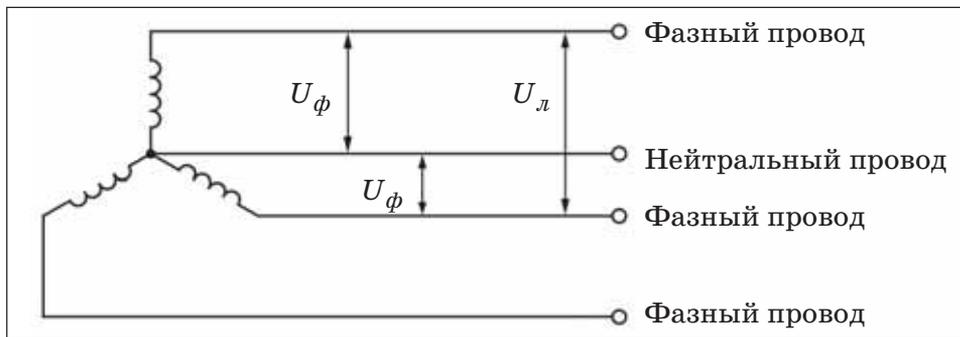


Рис. 39

При использовании системы трёхфазного тока концы всех трёх обмоток генератора соединяют, как правило, вместе (рис. 39).

Напряжение между началом и концом каждой фазной обмотки называют фазным напряжением U_ϕ , а напряжение между началом двух фазных обмоток – линейным напряжением U_λ . Линейное напряжение U_λ больше фазного напряжения, как показывает расчёт, в $\sqrt{3}$ раз. Если, к примеру, фазное напряжение

$$U_\phi = 220 \text{ В},$$

то

$$U_\lambda = 380 \text{ В}.$$

На первый взгляд кажется, что линейное напряжение должно составлять 440 В (220 В + 220 В). Но такое предположение неверно, так как в каждой из обмоток генератора ЭДС достигает амплитудного значения в различные моменты времени.

При использовании трёхфазного тока в быту электрооборудование подключают, как правило, к фазному напряжению, но в случае мощных электроплит, электронагревательных приборов проводят их подключение к линейному напряжению.

Вынужденные механические колебания. Вынужденные механические колебания – колебания, происходящие под действием внешней переменной силы. Физически наиболее интересен случай, когда внешняя переменная сила воздействует на колебательную

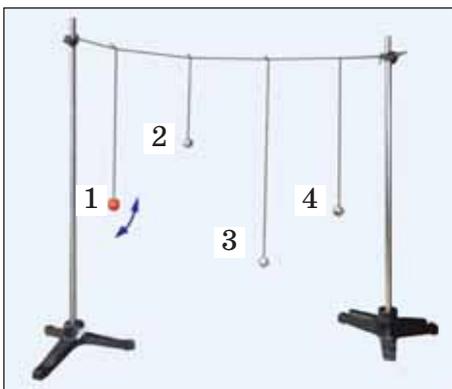


Рис. 40

систему, в которой возможны свободные колебания. Например, вспомните, как происходят колебания маятников 2, 3, 4, если на них действует переменная сила со стороны горизонтально расположенной нити, которую колеблет маятник 1 (рис. 40).

Сравним свободные и вынужденные механические колебания. Сходство этих колебаний заключается в том, что и малые свободные колебания, и вынужденные колебания (если на систему действует внешняя гармонически изменяющаяся сила) являются гармоническими колебаниями, которые характеризуются аналогичным «набором» физических величин – амплитудой, периодом, частотой, круговой частотой, фазой колебаний. Различия этих колебаний заключаются в том, что частота свободных колебаний определяется собственными параметрами колебательной системы, а частота вынужденных колебаний равна частоте внешней силы.



5.6. Чему равна круговая частота колебаний груза, прикрепленного к пружине? круговая частота математического маятника?

Амплитуда свободных колебаний зависит от первоначального запаса энергии в колебательной системе – как сильно растянута пружина при колебаниях груза, на какой угол отклонён маятник от вертикали. В случае вынужденных колебаний их *амплитуда зависит от частоты внешней вынуждающей силы*. Если постепенно увеличивать частоты внешней вынуждающей силы, то амплитуда вынужденных колебаний будет возрастать. Амплитуда достигнет максимального значения при частоте внешней вынуждающей силы, равной собственной частоте колебательной системы.

При дальнейшем увеличении частоты внешней вынуждающей силы амплитуда уменьшается (рис. 41). Это явление получило в физике название резонанса.

Резонанс – это явление значительного увеличения амплитуды вынужденных колебаний при условии совпадения частоты вынуждающей силы с собственной частотой колебательной системы.



5.7. Какой из графиков – 1 или 2, изображённых на рисунке 41, – соответствует явлению резонанса в колебательной системе с малой силой сопротивления?

Почему же именно условие равенства частот является условием резонансного увеличения амплитуды вынужденных колебаний? При совпадении частот направление внешней вынуждающей силы и направление перемещения колеблющегося тела совпадают в течение всего периода колебаний.



5.8. Как вычисляется механическая работа?

Следовательно, вынуждающей силой в течение всего периода колебаний совершается положительная работа. Это приводит к увеличению энергии колебательной системы, возрастанию амплитуды вынужденных колебаний.



Рассмотрим колебания тела массой m , прикреплённого к пружине жёсткостью k (рис. 42). Со стороны пружины на тело действует сила упругости $F_{упр}$, равная

$$F_{упр} = -kx, \quad (5.16)$$

где x – величина деформации пружины, равная координате колеблющегося тела (если положение равновесия принять за начало отсчёта координаты).

Пусть на тело помимо силы упругости также действует внешняя вынуждающая сила $F(t)$, изменяющаяся с течением времени по закону

$$F(t) = F_{макс} \cos \omega t, \quad (5.17)$$

где $F_{макс}$ – амплитуда;

ω – круговая частота внешней вынуждающей силы.

Запишем II закон Ньютона в проекции на ось OX , пренебрегая силами трения, действующими в системе.

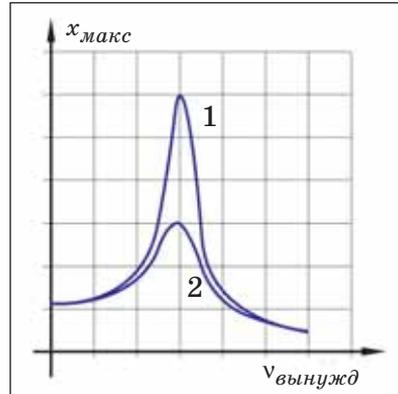


Рис. 41. График зависимости амплитуды вынужденных колебаний $x_{макс}$ от частоты внешней вынуждающей силы $\nu_{вынужд}$

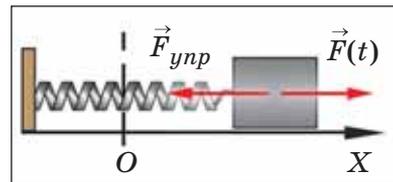


Рис. 42

$$ma = F_{\text{упр}} + F(t).$$

Или с учётом соотношений (5.16) и (5.17)

$$ma = -kx + F_{\text{макс}} \cos \omega t. \quad (5.18)$$

Пусть амплитуда вынужденных колебаний равна $x_{\text{макс}}$.
Тогда

$$x(t) = x_{\text{макс}} \cos \omega t. \quad (5.19)$$

Вычислим ускорение тела:

$$a = v' = (x')' = x''.$$

$$a = -\omega^2 x_{\text{макс}} \cos \omega t. \quad (5.20)$$

Подставив выражения (5.19) и (5.20) в уравнение (5.18), будем иметь

$$-m\omega^2 x_{\text{макс}} = -kx_{\text{макс}} + F_{\text{макс}}.$$

Отсюда

$$x_{\text{макс}} = \frac{F_{\text{макс}}}{k - m\omega^2},$$

$$x_{\text{макс}} = \frac{F_{\text{макс}}/m}{\frac{k}{m} - \omega^2}. \quad (5.21)$$

Вспомним, что квадрат собственной круговой частоты колебаний тела на пружине $\omega_{\text{собст}}^2$ равен

$$\omega_{\text{собст}}^2 = \frac{k}{m}.$$

Тогда выражение (5.21) окончательно примет вид

$$x_{\text{макс}} = \frac{F_{\text{макс}}/m}{\omega_{\text{собст}}^2 - \omega^2}. \quad (5.22)$$

Не представляет труда провести анализ выражения (5.22): если значение круговой частоты внешней вынуждающей силы ω будет близко к значению собственной круговой частоты колебательной системы $\omega_{\text{собст}}$, то амплитуда вынужденных колебаний $x_{\text{макс}}$ велика. Это условие как раз и является условием резонанса.

Возникновение переменной ЭДС при вращении рамки в магнитном поле, вынужденные электромагнитные колебания – переменный ток, $I(t) = I_{\max} \sin \omega t$, $U(t) = U_{\max} \sin \omega t$, действующие значения напряжения и силы тока: $U = \frac{U_{\max}}{\sqrt{2}}$, $I = \frac{I_{\max}}{\sqrt{2}}$; мощность переменного тока, $P = UI$; индукционный генератор переменного тока, трансформаторы, $\frac{U_1}{U_2} \approx \frac{N_1}{N_2}$, $U_1 I_1 \approx U_2 I_2$, передача переменного тока; трёхфазный ток, фазовое напряжение, линейное напряжение; вынужденные механические колебания, резонанс.

5.1 ● Контур пронизывает магнитный поток Φ , изменяющийся с течением времени по закону

$$\Phi(t) = 0,003 \cos \pi t \text{ (Вб)}.$$

Определите амплитуду и действующее значение ЭДС, возникающей в контуре за счёт изменения магнитного потока.

5.2 ● На рисунке 43, а, б изображены графики зависимости напряжения и силы тока от времени на резисторе, включённом в цепь переменного тока. Определите сопротивление резистора. Какая электрическая мощность выделяется на резисторе?

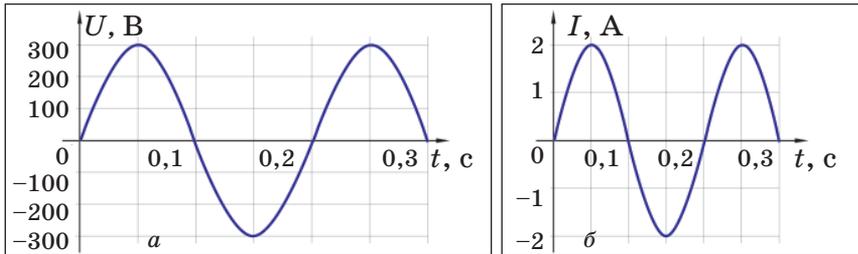


Рис. 43

5.3 ● Высоковольтная обмотка понижающего трансформатора содержит 3500 витков, а низковольтная обмотка – 100 витков. Какое по величине переменное напряжение следует подключить к первичной обмотке трансформатора, чтобы напряжение во вторичной обмотке составляло 4 В?

5.4 ● На железный сердечник намотано две катушки (рис. 44). Магнитный поток, создаваемый первой катушкой, не выходит из сердечника и делится поровну в его разветвлении. При включении катушки 1 в цепь переменного тока с напряжением 40 В напряжение на зажимах катушки 2 равно 10 В.

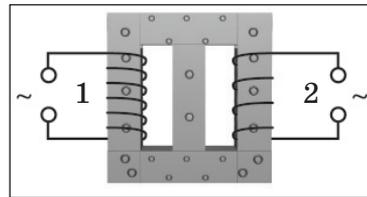


Рис. 44

Сколько витков содержит катушка 2, если катушка 1 состоит из 400 витков?

5.5 ● Какую часть периода сила тока в цепи переменного тока больше его действующего значения?

§ 6. РЕЗИСТОР, КОНДЕНСАТОР, КАТУШКА ИНДУКТИВНОСТИ В ЦЕПИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА



В природе очень часто что-нибудь «колеблется» и также часто наступает резонанс.

*Ричард Фейнман (1918–1988),
выдающийся американский физик-теоретик,
лауреат Нобелевской премии*

Вам уже известно, что такое переменный ток.

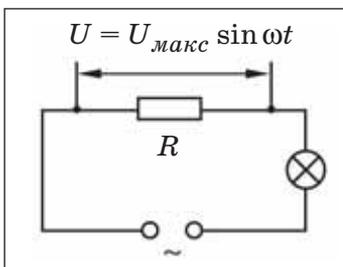


Рис. 45

Резистор в цепи переменного тока.

Включим резистор сопротивлением R в цепь переменного тока (рис. 45). При прохождении тока через резистор электрическое поле, создаваемое в проводнике генератором – источником переменной ЭДС, – совершает работу. Это приводит к нагреванию проводника, увеличению его температуры. Таким образом, происходит превращение электрической энергии во внутреннюю энергию проводника. Мощность,

выделяющаяся в резисторе, определяется действующими значениями напряжения на резисторе и силы тока.



6.1. Как рассчитывается мощность переменного тока?

Пусть электрическое напряжение $U(t)$, приложенное к резистору, изменяется с течением времени по закону

$$U(t) = U_{\text{макс}} \sin \omega t .$$

Мгновенное значение силы тока $I(t)$ можно определить в соответствии с законом Ома для участка цепи:

$$I(t) = \frac{U(t)}{R}$$

или

$$I(t) = \frac{U_{\text{макс}}}{R} \sin \omega t . \quad (6.1)$$

Из уравнения (6.1) следует, что амплитуда силы тока и амплитуда напряжения на резисторе связаны соотношением

$$I_{\text{макс}} = \frac{U_{\text{макс}}}{R}.$$

И подобное соотношение, очевидно, можно записать для действующих значений этих величин:

$$I = \frac{U}{R}. \quad (6.2)$$

В справедливости формулы (6.2) – закона Ома для R -участка цепи переменного тока – легко убедиться на опыте. Если повысить напряжение на резисторе (рис. 45), то сила тока в цепи возрастает, о чём можно судить по увеличению накала лампы. От частоты переменного тока действующее значение силы тока не зависит. В этом легко убедиться, меняя частоту переменного тока и наблюдая за накалом лампы, включённой последовательно с резистором (рис. 45).

Конденсатор в цепи переменного тока.

Включим конденсатор ёмкостью C в цепь переменного тока. В цепи будет идти ток, лампа светится (рис. 46). Если увеличить ёмкость конденсатора, то накал лампы возрастёт. Увеличение частоты переменного тока также приводит к увеличению действующего значения силы тока в цепи.

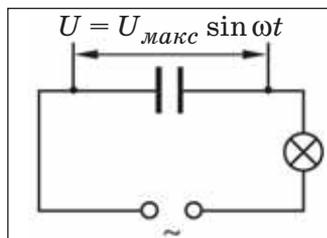


Рис. 46



6.2. Почему, несмотря на то, что конденсатор фактически является местом разрыва электрической цепи (пластины конденсатора разделены слоем изолятора), в цепи переменного тока с конденсатором существует электрический ток?

При подключении цепи, содержащей конденсатор, к источнику постоянной ЭДС происходит однократная быстрая зарядка конденсатора, и движение зарядов в цепи прекращается. Иное дело, если источником является переменная ЭДС. Тогда в те моменты времени, когда значение ЭДС мало, конденсатор разряжается, а в последующие моменты времени, когда значение ЭДС велико, конденсатор заряжается. В итоге в проводах, с помощью которых конденсатор включён в электрическую цепь, заряды перемещаются – существует электрический ток.

Выделение энергии в цепи при этом не происходит – часть периода энергия поступает из источника в конденсатор (конденсатор заряжается), часть периода энергия возвращается обратно из конденсатора в источник (конденсатор разряжается).

Чем больше электроёмкость, тем, с одной стороны, больший электрический заряд накапливается в конденсаторе при его зарядке. С другой стороны, тем больший заряд покидает конденсатор при его разрядке. Следовательно, и сила тока в цепи больше. Чем больше частота колебаний ЭДС, тем чаще происходит зарядка и разрядка конденсатора, тем больше сила тока.

Пусть электрическое напряжение, приложенное к конденсатору, изменяется с течением времени по закону

$$U(t) = U_{\text{макс}} \sin \omega t .$$

При изменении напряжения изменяется и заряд конденсатора.



6.3. Как определяется электроёмкость?

Так как

$$C = \frac{q(t)}{U(t)} ,$$

то

$$q(t) = CU(t)$$

или

$$q(t) = CU_{\text{макс}} \sin \omega t .$$

Вычислим мгновенное значение силы тока в цепи. Сила тока, как известно, вычисляется как производная заряда по времени:

$$I(t) = q'(t),$$

$$I(t) = (CU_{\text{макс}} \sin \omega t)',$$

$$I(t) = \omega CU_{\text{макс}} \cos \omega t. \quad (6.3)$$

Из уравнения (6.3) следует, что амплитуда силы тока и амплитуда напряжения на конденсаторе связаны соотношением

$$IU_{\text{макс}} = \omega CU_{\text{макс}} .$$

Подобное же соотношение, очевидно, можно записать для действующих значений этих величин:

$$I = \omega C U. \quad (6.4)$$



6.4. Подтверждается ли полученный результат – соотношение (6.4) – результатами соответствующих опытов, проведённых с конденсатором, включённым в цепь переменного тока (рис. 46)?

Придадим соотношению (6.4) вид, аналогичный закону Ома. Для этого перепишем соотношение следующим образом:

$$I = \frac{U}{\frac{1}{\omega C}}. \quad (6.5)$$

Введём обозначение

$$X_C = \frac{1}{\omega C}. \quad (6.6)$$

Величину X_C , обратную произведению круговой частоты ω на ёмкость конденсатора C , называют **ёмкостным сопротивлением**. Ёмкостное сопротивление измеряется в омах:

$$\frac{1}{\text{Гц} \cdot \text{Ф}} = \frac{1}{\frac{1}{\text{с}} \cdot \frac{\text{Кл}}{\text{В}}} = \frac{\text{В}}{\frac{\text{Кл}}{\text{с}}} = \frac{\text{В}}{\text{А}} = \text{Ом}.$$

С учётом введённого обозначения ёмкостного сопротивления X_C соотношение (6.5) запишется в виде закона Ома для C -участка цепи переменного тока следующим образом:

$$I = \frac{U}{X_C}. \quad (6.7)$$

Катушка в цепи переменного тока.

Включим катушку индуктивностью L в цепь переменного тока (рис. 47). Пусть напряжение $U(t)$ на катушке равно

$$U(t) = U_{\text{макс}} \sin \omega t. \quad (6.8)$$

Если увеличить индуктивность катушки (как это можно сделать?), то накал лампы уменьшится. Увеличение частоты переменного тока также приводит к уменьшению действующего значения силы тока в цепи.

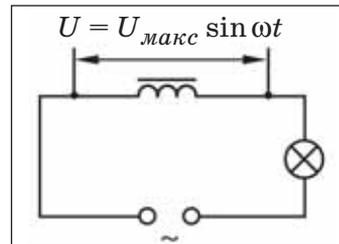


Рис. 47



6.5. Почему действующее значение силы тока в цепи переменного тока с катушкой зависит от её индуктивности и частоты тока?

При прохождении по катушке переменного тока возникает ЭДС самоиндукции. ЭДС самоиндукции тем больше, чем больше индуктивность катушки и чем быстрее изменяется сила тока в катушке:

$$\mathcal{E} = -LI'(t). \quad (6.9)$$

В соответствии с правилом Ленца ЭДС самоиндукции направлена так, что «тормозит» изменения силы тока в катушке. Поэтому при нарастании тока ЭДС самоиндукции «не даёт возможности» силе тока увеличиваться, а при убывании тока ЭДС самоиндукции «не даёт возможности» силе тока значительно уменьшаться. Иными сло-

вами, чем больше индуктивность катушки и чем быстрее меняется ток – чем больше частота переменного тока, тем меньше действующее значение силы тока в цепи.

Если катушка включена в электрическую цепь, то источником создаётся и поддерживается в цепи, в том числе и в катушке, электрическое поле. Ввиду явления самоиндукции в катушке одновременно с этим возникает и вихревое электрическое поле. Если катушка имеет пренебрежимо малое электрическое сопротивление R ($R=0$), то не требуется электрического поля для поддержания движения зарядов (тока) в катушке – «трения» нет. Это означает, что в идеальной катушке (при отсутствии сопротивления R) электрическое поле, созданное источником, и вихревое электрическое поле в катушке компенсируют друг друга, выделение энергии в катушке не происходит. По этой причине в любой момент времени напряжение $U(t)$, приложенное к катушке, равно по модулю и противоположно по знаку ЭДС самоиндукции:

$$U = - \mathcal{E}.$$

Или с учётом соотношений (6.8) и (6.9)

$$U_{\text{макс}} \sin \omega t = LI'(t). \quad (6.10)$$

Какова же должна быть зависимость силы тока от времени, чтобы равенство (6.10) выполнялось?

Проверим, не будет ли являться решением уравнения (6.10) зависимость силы тока от времени $I(t)$ вида

$$I(t) = I_{\text{макс}} \sin(\omega t - \frac{\pi}{2}), \quad (6.11)$$

где $I_{\text{макс}}$ – амплитуда силы тока.

Подставим соотношение (6.11) в уравнение (6.10):

$$U_{\text{макс}} \sin \omega t = L[I_{\text{макс}} \sin(\omega t - \frac{\pi}{2})]',$$

$$U_{\text{макс}} \sin \omega t = \omega LI_{\text{макс}} \cos(\omega t - \frac{\pi}{2}),$$

$$U_{\text{макс}} \sin \omega t = \omega LI_{\text{макс}} \sin \omega t,$$

$$U_{\text{макс}} = \omega LI_{\text{макс}}. \quad (6.12)$$

Мы видим, что зависимость (6.11) действительно является зависимостью силы тока от времени при включении катушки в цепь переменного тока. При этом амплитуда тока равна

$$I_{\text{макс}} = \frac{U_{\text{макс}}}{\omega L}.$$

И подобное же соотношение, очевидно, можно записать для действующих значений этих величин:

$$I = \frac{U}{\omega L}. \quad (6.13)$$



6.6. Подтверждается ли полученный результат – соотношение (6.13) – результатами соответствующих опытов, проведённых с катушкой, включённой в цепь переменного тока (рис. 47)?

Введём обозначение

$$X_L = \omega L. \quad (6.14)$$

Величину X_L , равную произведению круговой частоты ω на индуктивность катушки L , называют **индуктивным сопротивлением**.



6.7. Как доказать, что индуктивное сопротивление измеряется в омах?

С учётом введённого обозначения индуктивного сопротивления X_L соотношение (6.13) запишется в виде закона Ома для L -участка цепи переменного тока следующим образом:

$$I = \frac{U}{X_L}. \quad (6.15)$$

Резонанс в цепи переменного тока. Подключим к генератору – источнику переменной ЭДС – последовательно соединённые лампу накаливания (R -участок), батарею конденсаторов (C -участок) и катушку с сердечником (L -участок) так, как это показано на рисунке 48. Таким образом, мы имеем колебательный контур, в котором благодаря генератору происходят вынужденные колебания.



6.8. Как связана высота звука с частотой звуковых колебаний?



Рис. 48

Для того чтобы судить о частоте электрических колебаний, вырабатываемых генератором, подключим к выходу генератора громкоговоритель. Катушка, по которой проходит переменный ток, притягивается или отталкивается постоянным магнитом громкоговорителя. Возникают колебания диффузора громкоговорителя, что приводит к появлению звука. Высота звука и позволяет судить о частоте электрических колебаний генератора.

Будем постепенно повышать частоту электрических колебаний, вырабатываемых генератором. При этом яркость свечения лампы нарастает, становится максимальной, а при дальнейшем увеличении частоты переменного тока яркость свечения лампы вновь уменьшается. Таким образом, опыт показывает, что амплитуда силы тока зависит от частоты колебаний ЭДС, вырабатываемой генератором

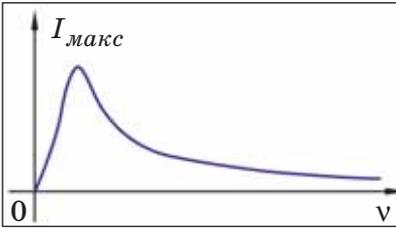


Рис. 49. Зависимость амплитуды силы тока в колебательном контуре от частоты колебаний ЭДС, вырабатываемой генератором

Наблюдаемое нами явление называется электрическим резонансом.

Электрический резонанс – явление резкого возрастания амплитуды колебаний силы тока в контуре при совпадении частоты колебаний ЭДС, вырабатываемых генератором, с собственной частотой контура.

Регулируя частоту колебаний генератора и следя за накалом лампы, настроим контур (рис. 48) в резонанс. Включим в цепь не все витки катушки, как прежде, а только половину витков. При этом накал лампы уменьшается.



6.9. Почему накал лампы уменьшился при уменьшении числа витков катушки, включённых в цепь? Как следует изменить – увеличить или уменьшить – ёмкость батареи конденсаторов, чтобы накал лампы вновь увеличился?

Собственная частота колебательного контура зависит от его электроёмкости и индуктивности. Так, круговая (циклическая) частота контура вычисляется по формуле

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}}.$$

Уменьшив число витков катушки, включённых в электрическую цепь, мы уменьшили индуктивность катушки и тем самым изменили (увеличили) собственную частоту колебаний. Было нарушено условие резонанса, и амплитуда силы тока в цепи уменьшилась. Чтобы восстановить резонанс, необходимо сделать прежней собственной частотой

ту колебаний контура, а этого можно добиться увеличением ёмкости конденсатора.

Явление электрического резонанса широко используется в радиотехнике, когда необходимо выделить из электрических колебаний различных частот колебания только той частоты, что совпадает с собственной частотой колебательного контура. С такой ситуацией сталкиваются, например, при настройке радиоприёмника на приём определённой радиостанции.

В ряде случаев резонанс в электрической цепи бывает и крайне вреден. При резонансе увеличивается сила тока в цепи, а значит, возрастает и напряжение на ёмкостном и индуктивном сопротивлениях. Возросшее напряжение может быть так велико, что может произойти пробой (замыкание) конденсатора или повреждение изоляции проводов катушки.

Физические процессы, протекающие на R -, C -, L -участках цепи переменного тока, $I = \frac{U}{X_C}$, $X_C = \frac{1}{\omega C}$, $I = \frac{U}{X_L}$, $X_L = \omega L$, электрический резонанс, применение явления резонанса в технике.

6.1 ● Конденсатор ёмкостью 6 мкФ подключён к источнику переменного напряжения 220 В частотой 50 Гц. Чему равно ёмкостное сопротивление конденсатора? Какова сила тока в цепи?

6.2 ● Катушка индуктивности, изготовленная из толстой медной проволоки и имеющая железный сердечник, включена в цепь переменного тока напряжением 220 В и частотой 50 Гц. Сила тока в катушке 0,8 А. Определите индуктивное сопротивление катушки. Чему равна её индуктивность?

6.3 ● Лампы Л1, Л2, Л3 включены в цепь переменного тока (рис. 50). При некоторой частоте тока накал всех трёх ламп одинаков. Как изменится накал ламп, если частоту уменьшить? увеличить? Ответы обосновать.

6.4 ● В цепи, схема которой изображена на рисунке 48, электрический резонанс наблюдается при частоте 3 кГц. Какова индуктивность катушки, если ёмкость батареи конденсаторов составляет 2 мкФ?

6.5 ● Колебательный контур подключили к источнику переменной ЭДС и, регулируя частоту, добились максимального значения силы тока в цепи (рис. 51). Как изменится показание вольтметра, если к конденсатору подключить конденсатор такой же ёмкости параллельно? последовательно? Ответы обосновать.

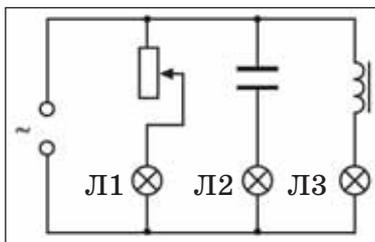


Рис. 50

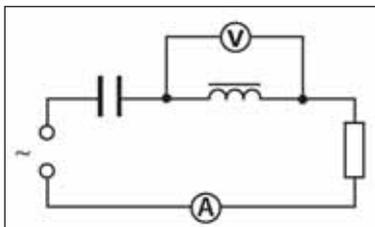


Рис. 51

§ 7. ВОЛНЫ



Дума за думой, волна за волной –
 Два проявления стихии одной:
 В сердце ли тесном, в безбрежном ли море,
 Здесь в заключении, там – на просторе –
 Тот же всё вечный прибой и отбой.

*Фёдор Иванович Тютчев (1803–1873),
 русский поэт*

Вам уже известны различные примеры волн.

Типы волн. В современной науке понятие волнового движения используется очень широко и практически невозможно указать тот единый признак, который бы позволял то или иное физическое явление относить к волнам. Для тех процессов, которые мы будем рассматривать в дальнейшем, определим, что **волна – это колебания, распространяющиеся в пространстве с течением времени.**

По тому, как направление распространения волны соотносится с направлением колебаний, волны подразделяют на *поперечные* и *продольные*.

Волну, в которой направление распространения волны перпендикулярно направлению колебаний, называют поперечной волной.

Общеизвестный пример поперечных волн – распространение поперечных возмущений в натянутом шнуре (рис. 52). Другой, не менее известный, пример поперечных волн – электромагнитные волны. Электромагнитные волны – колебания электромагнитного поля, распространяющиеся в пространстве со скоростью, равной скорости света. Учёными теоретически обосновано и экспериментально доказано, что

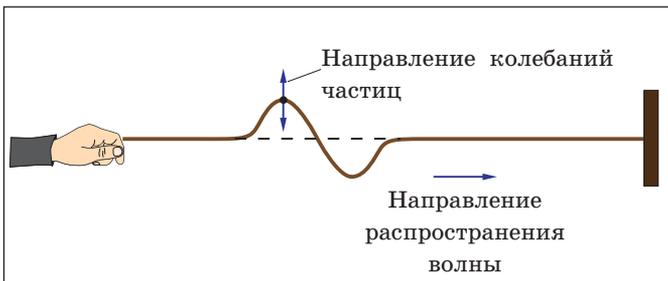


Рис. 52

колебания вектора напряжённости электрического поля \vec{E} и колебания вектора магнитной индукции \vec{B} перпендикулярны скорости электромагнитной волны $\vec{v}_{э/м}$ и друг другу (рис. 53).

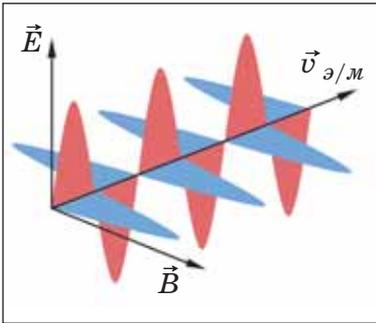


Рис. 53

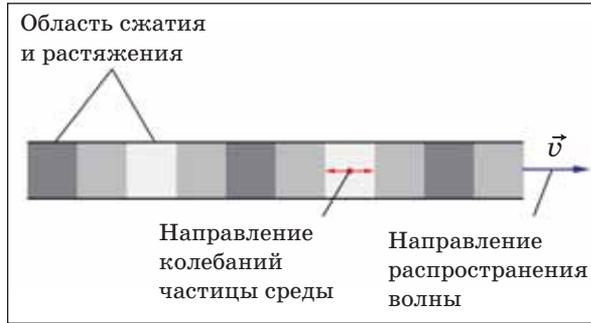


Рис. 54

Волну, в которой направление распространения волны совпадает с направлением распространения колебаний, называют продольной волной.

Примером продольных волн являются звуковые волны. В звуковой волне направление распространения звука совпадает с направлением распространения колебаний областей сжатия и разрежения воздуха (рис. 54).

По природе колебаний, происходящих при распространении волны, волны можно подразделить на *механические* и *электромагнитные*. Между этими двумя видами волн существует **принципиальное отличие**.

Для механических волн обязательно необходима вещественная среда (твёрдые тела, жидкости или газы), в которой эти волны распространяются. Ведь механические волны возникают благодаря взаимодействию между частицами среды. Пусть некоторые из частиц вещества приведены в колебательное движение и совершают вынужденные колебания под действием внешней переменной силы. Тогда благодаря упругому взаимодействию и частицы-соседи также начнут совершать колебательное движение – происходит распространение колебаний в упругой среде, возникает волна.

В твёрдых телах могут распространяться и поперечные, и продольные волны, так как силы упругости возникают и при поперечном сдвиге слоёв твёрдого тела, и при его продольном сжатии. В жидкостях и газах силы упругости при поперечном смещении слоёв вещества не возникают, поэтому здесь возможны только продольные волны сжатия и разрежения.

Наибольший интерес для нас в первую очередь представляют *продольные механические волны с частотой от 16 до 20 000 Гц – звук*.

Звуковые (акустические¹) волны характеризуют высотой и громкостью звука.



7.1. От чего зависит высота звука?



7.2. От чего зависит громкость звука?

Электромагнитные волны могут распространяться и в пустоте, для их распространения необязательно наличие среды. При колебательном (ускоренном) движении заряженных частиц электрические и магнитные поля частиц переменны. Переменное магнитное поле в соответствии с явлением электромагнитной индукции в окружающем пространстве создаёт вихревое электрическое поле. Оно, в свою очередь, порождает переменное магнитное поле и так далее. Так происходит процесс распространения электромагнитного поля в пространстве, то есть электромагнитная волна.

Скорость волн. Скорость механических волн в разных средах различна. В твёрдых телах она составляет несколько километров в секунду, в жидкостях – около километра в секунду, а в газах – сотни метров в секунду. В газах скорость упругих волн также зависит от его температуры.



7.3. Почему скорость звука в газах увеличивается с ростом температуры?

Скорость распространения электромагнитных волн в разных средах также различна и во многих случаях зависит и от частоты электромагнитных колебаний. В вакууме скорость электромагнитных волн вне зависимости от частоты колебаний равна скорости света c – наибольшей, предельной скорости, с которой может происходить какой-либо физический процесс.

$$c = 300\,000 \text{ км/с.}$$

Наряду со скоростью распространения волны и частотой колебаний одной из основных величин, которой характеризуется волновой процесс, является *длина волны*.

Длина волны – это расстояние, на которое распространяется волна за время, равное периоду колебаний.

¹ Акустика (от греческого *akustikos* – слуховой, слушающийся), область физики, исследующая упругие колебания и волны, их взаимодействия с веществом и разнообразные применения.

Длина волны обозначается буквой λ . Из определения длины волны следует, что

$$\lambda = vT, \quad (7.1)$$

где v – скорость волны;

T – период колебаний.

Так как частота колебаний ν и период колебаний T связаны известным соотношением

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

то формуле (7.1) легко придать иной вид:

$$\lambda = \frac{v}{\nu}. \quad (7.2)$$

Пусть поперечная волна распространяется в некоторой упругой среде со скоростью v вдоль оси OX (рис. 55). Рассмотрим колебания, происходящие в точках среды x_1 и x_2 , расстояние между которыми в точности равно длине волны λ . Если колебания частиц среды происходят в направлении оси OY , то зависимость координаты y от времени t для точки x_1 будет иметь вид

$$y(t) = y_{\max} \sin \omega t, \quad (7.3)$$

где ω – круговая частота колебаний,

$$\omega = \frac{2\pi}{T}. \quad (7.4)$$

Так как точка x_2 удалена от точки x_1 на расстояние, равное длине волны, то в точке x_2 колебания возникнут позже, через время, равное периоду колебаний. Тогда зависимость координаты y от времени t для точки x_2 будет иметь вид

$$y(t) = y_{\max} \sin[\omega(t - T)],$$

$$y(t) = y_{\max} \sin(\omega t - \omega T),$$

или с учётом соотношения (7.4)

$$y(t) = y_{\max} \sin(\omega t - 2\pi).$$

Так как функция синус – периодическая функция с периодом 2π , то

$$y(t) = y_{\max} \sin \omega t. \quad (7.5)$$

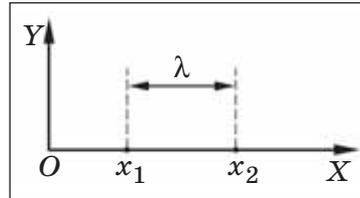


Рис. 55

Сравнивая уравнения (7.3) и (7.5), мы можем сделать вывод, что частицы среды, находящиеся на расстоянии, равном длине волны, совершают одинаковые колебания (совершают колебания с одинаковыми фазами). Подобный же вывод, очевидно, можно сделать и для продольных волн, а также для электромагнитных волн, если рассматривать не колебания частиц среды, а колебания электрического и магнитного полей.

Рассмотренный пример позволяет сделать вывод, что длина волны λ – это наименьшее расстояние, через которое повторяется профиль волны (рис. 56, а – в).

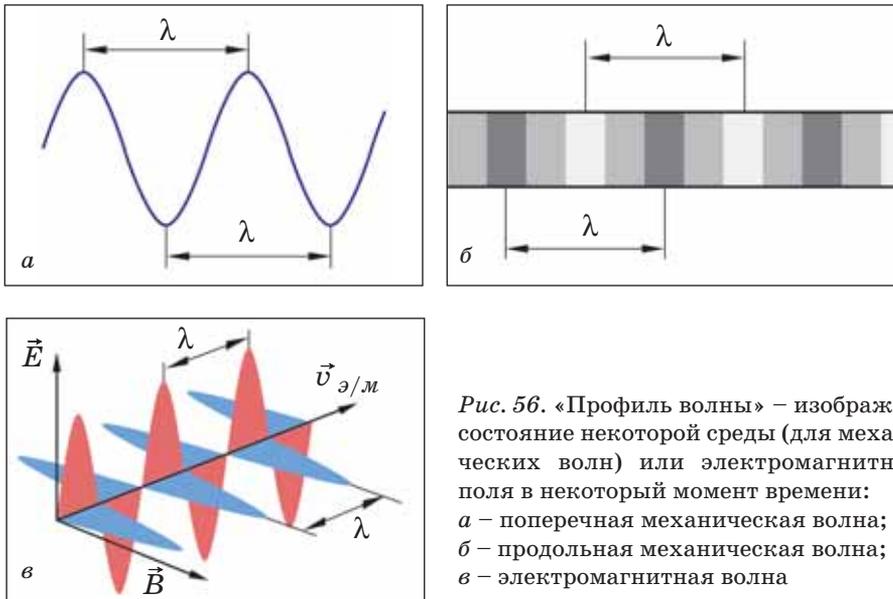


Рис. 56. «Профиль волны» – изображено состояние некоторой среды (для механических волн) или электромагнитного поля в некоторый момент времени: а – поперечная механическая волна; б – продольная механическая волна; в – электромагнитная волна

Волновые явления. При распространении волн и их взаимодействии с веществом наблюдается целый ряд физических явлений. Перечислим их: *явление отражения волн* от поверхности некоторой среды, *явление преломления волн* при переходе из одной среды в другую, *явление поглощения волн* в результате взаимодействия с другими волнами или средой, *явление интерференции волн*, *явление дифракции волн*. Эти явления наблюдаются и для поперечных, и для продольных волн любой природы – и механических, и электромагнитных.

Рассмотрим данные явления на примере электромагнитных волн. Для проведения соответствующих опытов нам потребуются *излучатель* и *приёмник электромагнитных волн*.

Излучатель (рис. 57, а) снабжён рупорной антенной, электромагнитные волны излучаются вдоль оси рупора. Рупорная антенна приёмника (рис. 57, б) улавливает электромагнитные волны. Радиотехническое устройство в приёмнике преобразует колебания электромагнитного поля в переменный ток. Этот переменный ток направляется в громкоговоритель и в результате при приёме электромагнитных волн возникает звуковой сигнал.

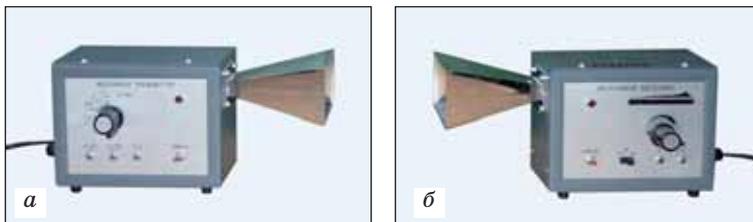


Рис. 57

Отражение волн. Расположим излучатель и приёмник электромагнитных волн под некоторым углом друг к другу и поместим над ними металлическую пластину так, как это показано на рисунке 58. При этом приёмник регистрирует электромагнитную волну, отражённую от металла.

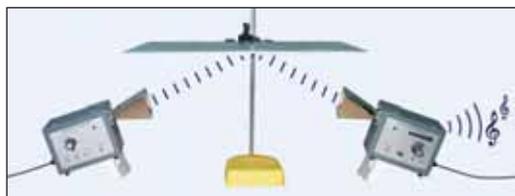


Рис. 58



7.4. Как может быть сформулирован закон отражения, исходя из результатов опыта (рис. 58)?

Возникновение электромагнитной волны, отражённой от металла, можно объяснить следующим образом. Падающая на металл электромагнитная волна – переменное электромагнитное поле – действует на свободные электроны, имеющиеся в металле-проводнике. В результате электроны начинают совершать вынужденные колебания. Порождающиеся колеблющимися электронами переменное электромагнитное поле распространяется в пространстве – возникает отражённая электромагнитная волна.

Преломление волн. Поместим на пути электромагнитных волн трёхгранную призму из изолятора (диэлектрика). Приёмник регистрирует электромагнитную волну (рис. 59). Результат опыта объясняется преломлением – изменением направления распространения электромагнитной волны на границе воздух-диэлектрик и диэлектрик-воздух.



Рис. 59

Явление преломления объясняется неодинаковостью скорости распространения волн в различных средах. Этим объясняется изменение направления распространения волны при переходе из одной среды в другую.

Поглощение волн. Расположим излучатель и приёмник на некотором расстоянии друг от друга (рис. 60, а). Приёмник регистрирует электромагнитную волну, об амплитуде волны можно судить по громкости звукового сигнала, издаваемого громкоговорителем. Поместим на пути электромагнитной волны пластину диэлектрика, например пластмассу. При этом громкость сигнала, создаваемого громкоговорителем приёмника, уменьшается. Это свидетельствует о частичном поглощении электромагнитной волны диэлектриком (рис. 60, б).

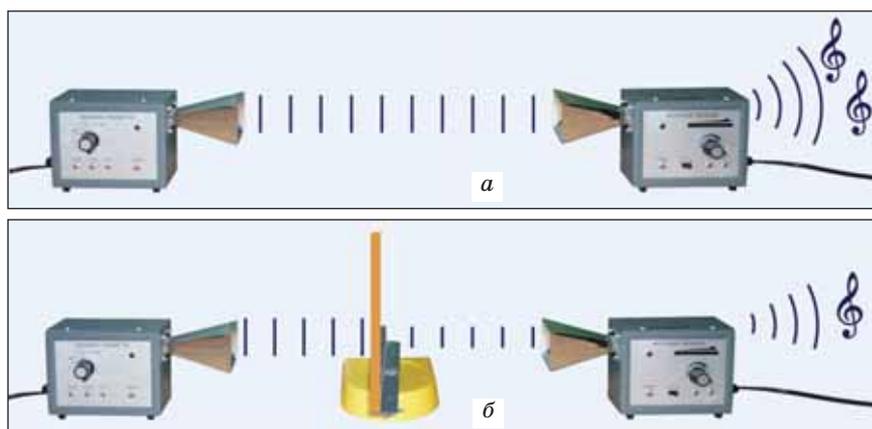


Рис. 60

Поглощение, то есть превращение энергии электромагнитной волны во внутреннюю энергию вещества, в данном случае объясняется возбуждением колебаний связанных электронов электрическим полем волны, что приводит к «потере» энергии электромагнитной волны.

Интерференция волн. Предположим, что в нашем распоряжении имеется два источника волн, которые совершают колебания с одинаковой частотой и постоянной разностью фаз $\Delta\varphi$.



7.5. Что называют фазой колебаний?

Например, источник в точке O_1 (рис. 61) совершает колебания по закону

$$y(t) = y_{\text{макс}} \sin(\omega t + \varphi_1),$$

а источник в точке O_2 совершает колебания по закону

$$y(t) = y_{\text{макс}} \sin(\omega t + \varphi_2),$$

где φ_1 и φ_2 – начальные фазы колебаний.

(Для простоты мы считаем амплитуды колебаний, создаваемых источниками O_1 и O_2 , одинаковыми.)

Отметим, что для дальнейшего рассмотрения нам совершенно неважно, о какой конкретно колеблющейся величине $y(t)$ идёт речь. Это может быть и смещение уровня воды в случае волн на поверхности воды. Это может быть и изменение давления при распространении звука. Это может быть и величина напряжённости электрического поля или вектора магнитной индукции при рассмотрении наложения электромагнитных волн.

Вычислим разность фаз $\Delta\varphi$ колебаний, создаваемых источниками O_2 и O_1 .

$$\Delta\varphi = (\omega t + \varphi_2) - (\omega t + \varphi_1),$$

$$\Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1,$$

то есть величина постоянная.

Колебания одинаковой частоты с постоянной во времени разностью фаз называют когерентными колебаниями, а создаваемые ими волны – когерентными¹ волнами.

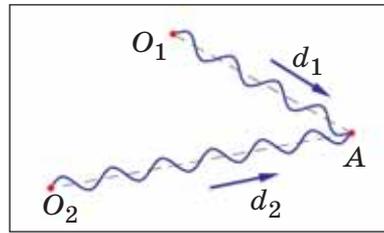


Рис. 61

¹ От латинского *cohaerens* – находящийся в связи.

Если волны, создаваемые источниками, расположенными в точках O_1 и O_2 , достигают точки A (рис. 61), то результирующее колебание $y_A(t)$ в этой точке определяется *суммой* колебаний $y_1(t)$ и $y_2(t)$, создаваемых первой и второй волной в точке A .

$$y_A(t) = y_1(t) + y_2(t).$$

Разность фаз $\Delta\varphi$ *источников волн* неизменна – волны когерентны. Значит, и разность фаз колебаний $y_1(t)$, $y_2(t)$, создаваемых источниками *в каждой точке пространства* (обозначим её как $\Delta\varphi_A$), от времени не зависит, является неизменной. Но в разных точках пространства значения разности фаз колебаний $\Delta\varphi_A$ будут различными. На рисунке 62, *a – г* в качестве примера изображены результирующие колебания для некоторых значений разности фаз $\Delta\varphi_A$. Наглядно видно, что амплитуда результирующего колебания зависит от разности фаз $\Delta\varphi_A$. И так как в каждой точке пространства эта разность фаз с течением времени не изменяется, то не будет изменяться и амплитуда результирующего колебания.

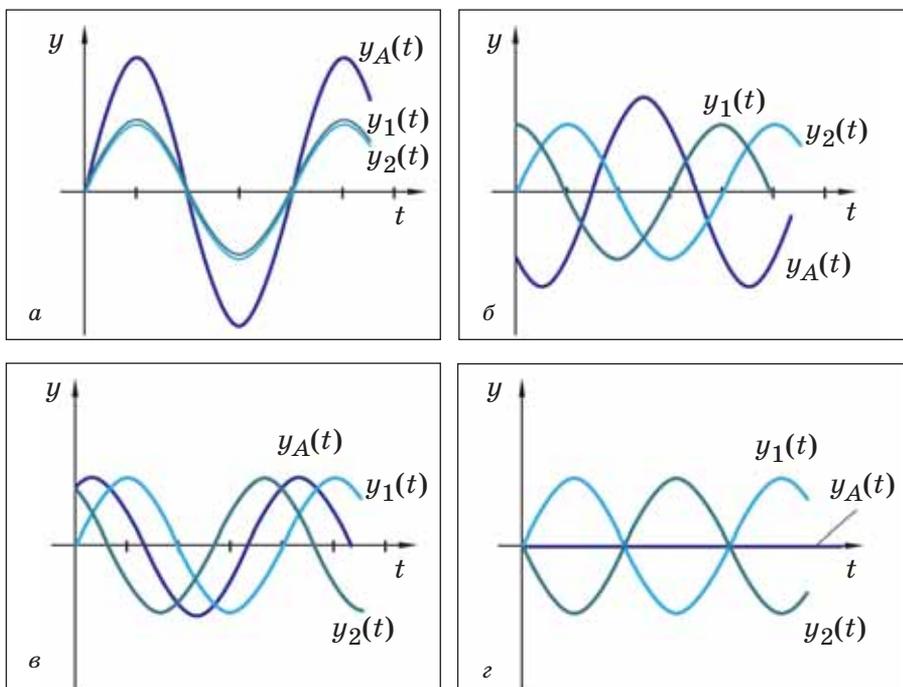


Рис. 62. Результирующие колебания при различных значениях разности фаз $\Delta\varphi_A$:

$$a - \Delta\varphi_A = 0 \text{ рад}; \quad \text{б} - \Delta\varphi_A = \frac{2}{3}\pi \text{ рад};$$

$$в - \Delta\varphi_A = \frac{\pi}{2} \text{ рад}; \quad \text{г} - \Delta\varphi_A = \pi \text{ рад}$$

Иными словами, при распространении когерентных волн в каждой точке пространства, «захваченного» этими волнами, устанавливается неизменная амплитуда результирующего колебания. Это физическое явление носит название *интерференция волн*.

Интерференция – сложение в пространстве двух (или нескольких) волн, при котором в различных точках пространства наблюдается усиление или ослабление результирующих колебаний.

Выясним, от чего будет зависеть результат интерференции (сложения) волн в некоторой точке A (рис. 61). Для простоты будем считать, что начальные фазы φ_1 и φ_2 источников волн, расположенных в точках O_1 и O_2 , равны нулю. Если расстояния d_1 и d_2 , пройденные волнами до точки «встречи» (ход волн), одинаковы, то фазы колебаний $y_1(t)$ и $y_2(t)$ будут, очевидно, одинаковы. Это означает, что в точку A одновременно приходят «гребень» одной волны и «гребень» другой волны, «впадина» одной волны и «впадина» другой волны (рис. 63). В таком случае амплитуда результирующих колебаний максимальна. Аналогичный результат сложения волн будет наблюдаться, если ход волны – расстояние d_2 – больше расстояния d_1 на одну длину волны, на две длины волны, на три длины волны и так далее. Таким образом, можно сформулировать **условие интерференционного максимума**: амплитуда результирующих колебаний при интерференции максимальна, если разность хода волн равна целому числу волн.

$$\Delta d = d_2 - d_1,$$

$$\Delta d = m\lambda,$$

где $m = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$ – целое число, номер интерференционного максимума.

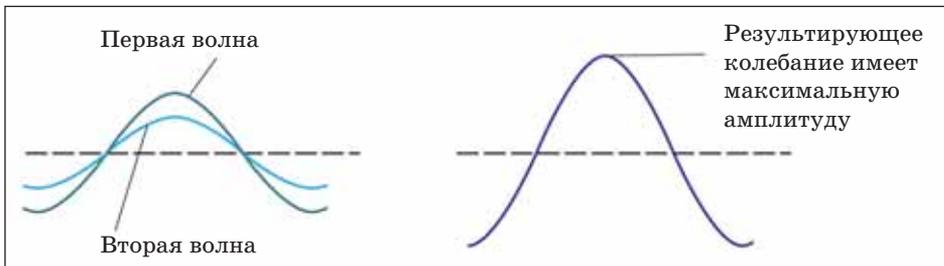


Рис. 63

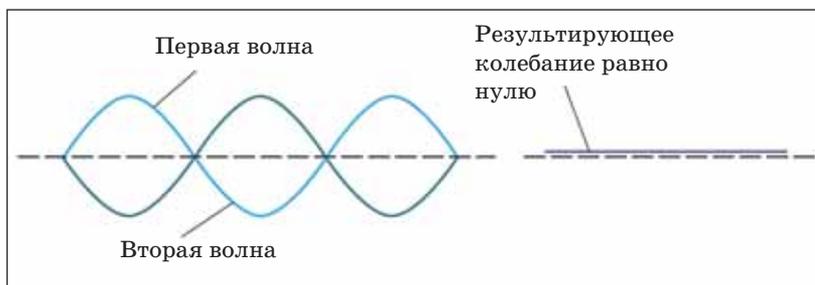


Рис. 64

Что будет наблюдаться, если в некоторую точку одновременно приходят «гребень» одной волны и «впадина» другой волны (рис. 64)? В таком случае, когда одна волна «отстаёт» от другой волны на половину длины волны (то есть разность фаз колебаний равна π рад), амплитуда результирующего колебания минимальна. Аналогичный результат сложения волн будет наблюдаться, если ход волны – расстояние d_2 – будет больше расстояния d_1 на одну длину волны плюс половина длины волны, на две длины волны плюс половина длины волны и так далее. Таким образом, можно сформулировать **условие интерференционного минимума**: амплитуда результирующего колебания при интерференции минимальна, если разность хода волн равна целому числу волн плюс половина длины волны.

$$\Delta d = d_2 - d_1,$$

$$\Delta d = m\lambda + \frac{\lambda}{2},$$

где $m = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$ – целое число, номер интерференционного минимума.

Подведём итог. В результате интерференции когерентных волн в некоторых точках пространства амплитуда результирующих колебаний удваивается (точки интерференционного максимума). В некоторых точках пространства результирующие колебания не происходят (точки интерференционного минимума). В некоторых точках пространства не происходит ни максимального усиления колебаний, ни их полного прекращения – в таких точках амплитуда результирующих колебаний больше нуля, но меньше удвоенного значения. Различия в амплитуде колебаний, очевидно, означают и различия в энергии этих колебаний. То есть *при интерференции происходит перераспределение энергии волн* (из точки минимума в точки максимума колебаний).

Для наблюдения интерференции электромагнитных волн расположим излучатель и приёмник на некотором расстоянии друг от друга и поместим между ними металлическую пластинку (рис. 65). Теперь в приёмник поступают *две когерентные волны*.

Одна электромагнитная волна поступает непосредственно из излучателя в приёмник, ход этой волны d_1 есть расстояние AB :

$$d_1 = AB.$$

Другая волна распространяется, отразившись от металлической пластины, ход этой волны d_2 есть расстояние AOB :

$$d_2 = AO + OB.$$



7.6. Почему электромагнитные волны, поступающие в приёмник, являются когерентными?

Будем медленно перемещать вверх или вниз металлическую пластинку (рис. 65). При этом разность хода

$$\Delta d = d_2 - d_1$$

изменяется, и изменяется результат интерференции электромагнитных волн от интерференционного максимума до интерференционного минимума. По этой причине в опыте мы слышим периодическое изменение громкости сигнала, создаваемого громкоговорителем приёмника: максимум – минимум – максимум – минимум и так далее.



Используя явление интерференции (рис. 65), определим скорость электромагнитных волн – скорость света c .

Выразим скорость света c через частоту колебаний ν и длину электромагнитной волны λ :

$$c = \lambda \nu. \quad (7.6)$$

Частота электромагнитных колебаний известна из технических параметров используемого в опыте излучателя, она составляет 11 ± 1 ГГц.

$$\nu = (11 \pm 1) \text{ ГГц.}$$

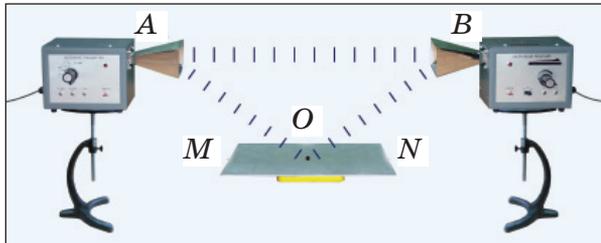


Рис. 65

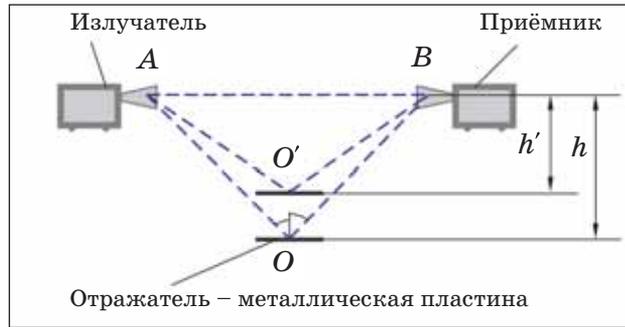


Рис. 66

Для определения длины излучаемой электромагнитной волны зафиксируем два соседних – следующих один за другим – интерференционных минимума (рис. 66). Номера соседних интерференционных минимумов различаются на единицу, и разность хода волн Δd и $\Delta d'$, соответствующая этим минимумам, равна

$$\Delta d = (m+1)\lambda + \frac{\lambda}{2},$$

$$\Delta d' = m\lambda + \frac{\lambda}{2}.$$

Отсюда

$$\Delta d - \Delta d' = \lambda. \quad (7.7)$$

Осталось выразить разность хода Δd и $\Delta d'$ через расстояния AB и высоты h , h' , которые непосредственно можно измерить при проведении опыта (рис. 66).

$$\Delta d = AO + OB - AB,$$

$$\Delta d = 2AO - AB,$$

$$\Delta d = 2\sqrt{\left(\frac{AB}{2}\right)^2 + h^2} - AB. \quad (7.8)$$

Аналогично

$$\Delta d' = 2\sqrt{\left(\frac{AB}{2}\right)^2 + h'^2} - AB. \quad (7.9)$$

Подставив соотношения (7.8) и (7.9) в выражение (7.7), имеем

$$\lambda = 2\left(\sqrt{\left(\frac{AB}{2}\right)^2 + h^2} - \sqrt{\left(\frac{AB}{2}\right)^2 + h'^2}\right).$$

Так, в одном из опытов расстояние AB составляло 150 см, а высоты h и h' были равны соответственно 17,5 и 10 см.

При этом

$$\lambda = 2,7 \text{ см.}$$

Используем формулу (7.6) и проведём расчёт скорости электромагнитных волн.

$$c = 2,7 \cdot 10^{-2} \text{ м} \cdot 11 \cdot 10^9 \text{ Гц} = 3,0 \cdot 10^8 \text{ м/с} .$$



7.7. Чему равна относительная погрешность полученного результата?

Дифракция волн. Если волна при своём распространении встречает препятствие или проходит через отверстие, то прямолинейный «геометрический» характер распространения волны нарушается. Это явление получило название *дифракции*.

Дифракция волн – явление огибания волнами препятствий.

Наиболее отчётливо дифракция проявляется, если препятствие на пути распространения волны или отверстие, через которое проходит волна, сравнимы по своим размерам с длиной волны.

Для наблюдения дифракции электромагнитных волн поставим вертикально две металлические пластины на небольшом расстоянии друг от друга так, чтобы они образовывали узкую щель размером в несколько сантиметров (рис. 67, а). Излучатель и приёмник электромагнитных волн расположим по разные стороны от щели. Приёмник фиксирует электромагнитные волны не только тогда, когда он находится напротив щели, но и в области геометрической «тени» (рис. 67, б). Если же увеличить размеры отверстия в несколько раз, то дифракция не наблюдается.

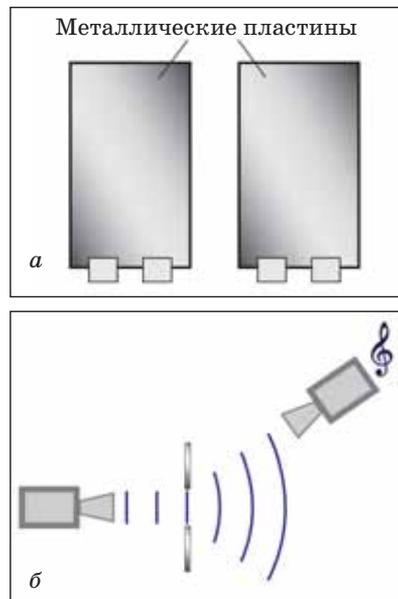


Рис. 67



7.8. Почему в опыте по наблюдению дифракции (рис. 67, б) расстояние между металлическими пластинами берётся равным нескольким сантиметрам? (Примечание. Частота электромагнитных колебаний, вырабатываемых используемым в опыте излучателем, составляет около 11 ГГц.)

Поляризация волн. Все волны вне зависимости от их природы (механические это волны или электромагнитные) характеризуются одними и теми же физическими величинами. Это частота колебаний источника волн, скорость распространения волны, длина волны, амплитуда волны и её энергия.

Но для поперечных волн имеется ещё одна характеристика волнового процесса, присущая только данному типу волн. Эта характеристика указывает на то, в какой именно плоскости происходят колебания.

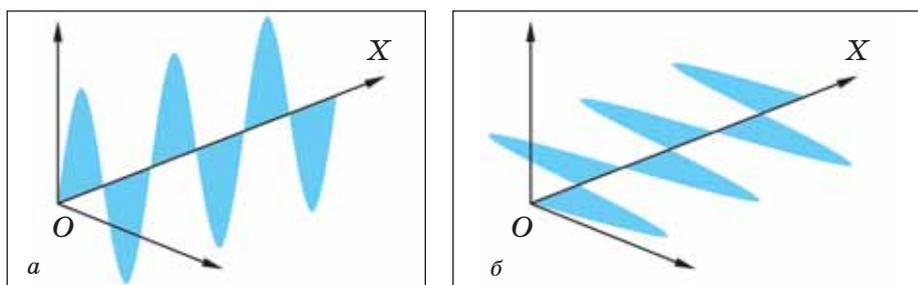


Рис. 68

На рисунке 68, *а*, *б* изображены две поперечные волны, распространяющиеся в одном и том же направлении вдоль оси OX . Источники, создающие волны, колеблются с одинаковыми частотами, волны распространяются с одинаковой скоростью и имеют одинаковые амплитуды. Несмотря на это, волны различны, так как различны плоскости, в которых происходят колебания. *Характеристику поперечной волны, определяющую плоскость, в которой происходят колебания, называют поляризацией волны.* Так, о поперечной волне, изображённой на рисунке 68, *а*, необходимо сказать, что она поляризована в вертикальной плоскости, а поперечная волна, изображённая на рисунке 68, *б*, поляризована в горизонтальной плоскости.

Поляризация позволяет отличить поперечные волны от продольных. Поместим на пути электромагнитной волны решётку, состоящую из металлических стержней (рис. 69, *а*, *б*).

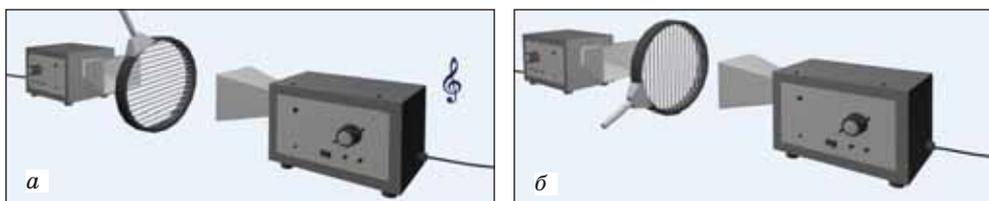


Рис. 69

При вертикальном расположении стержней волна не достигает приёмника (рис. 69, а). При горизонтальном расположении стержней приёмник регистрирует проходящую из излучателя электромагнитную волну (рис. 69, б).

Если бы электромагнитная волна была продольной и колебания вектора напряжённости электрического поля \vec{E} происходили бы в направлении распространения волны, то поворот решётки никак не повлиял бы на прохождение волны через решётку. Но электромагнитная волна является поперечной. Так, например, колебания вектора напряжённости электрического поля \vec{E} в электромагнитной волне, испускаемой излучателем, происходят в вертикальной плоскости. По этой причине, когда металлические стержни решётки параллельны вектору напряжённости \vec{E} , в них под действием переменного электрического поля возникает переменный ток. В итоге электромагнитная волна отражается от стержней точно так же, как она отражается от сплошной металлической пластины. Если же стержни перпендикулярны вектору напряжённости \vec{E} , то переменный ток в них не возбуждается и отражение электромагнитной волны не происходит.

Волна, поперечные и продольные волны, механические и электромагнитные волны, длина волны, $\lambda = vT$, $\lambda = \frac{v}{\nu}$, волновые явления (отражение волн, преломление волн, поглощение волн, интерференция волн, дифракция волн), когерентные волны, условие интерференционного максимума: $\Delta d = m\lambda$, условие интерференционного минимума: $\Delta d = m\lambda + \frac{\lambda}{2}$, поляризация.

7.1 ● Дельфины могут создавать колебания частотой 150 кГц. Какой длины ультразвуковые волны распространяются при этом в воде? Скорость звука в воде принять равной 1400 м/с.

7.2 ● На рисунке 70 изображена зависимость силы тока от времени в антенне радиопередатчика. Чему равна длина волны, излучаемая передатчиком?

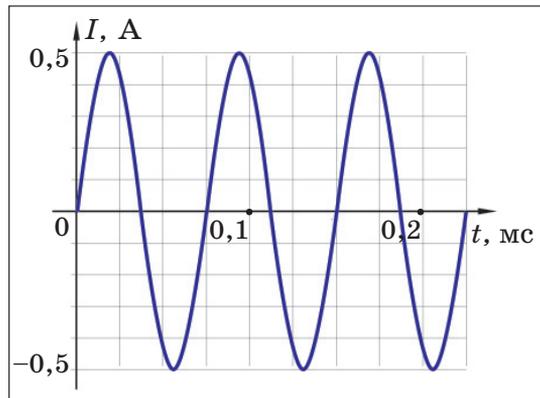


Рис. 70

7.3 ● Колебательный контур обладает ёмкостью 240 пФ и индуктивностью 50 мкГн. Какой длины электромагнитные волны могут излучаться таким контуром?

7.4 ● Духовой оркестр, удаляясь, заходит за угол здания. Некоторое время будут ещё слышны басовые звуки, издаваемые валторнами, тубами, трубами, но не слышны звуки флейт, кларнетов. Почему?

7.5 ● Волны одинаковой природы, созданные источниками, колеблющимися с одинаковой частотой с постоянной во времени разностью фаз, распространяются одновременно в одной области пространства. Предложите ситуацию, при которой такие волны не интерферируют.

§ 8. ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН



Уплотнённый силой электричества, земной шар теперь – не более чем дерева.

*Герберт Маршалл Маклюэн (1911–1980),
канадский философ, филолог,
литературный критик*

Вам уже известны примеры практического применения радиоволн.



Зависимость энергии электромагнитной волны от частоты колебаний. Вспомните, что энергия электромагнитного поля $W_{эл}$ конденсатора ёмкостью C , заряженного до разности потенциалов (напряжения) U , определяется выражением

$$W_{эл} = \frac{CU^2}{2}.$$

Но чем больше разность потенциалов U , тем больше напряжённость электрического поля E между обкладками (пластинами) конденсатора.

$$E = \frac{U}{d},$$

где d – расстояние между обкладками конденсатора.

Таким образом, энергия электрического поля $W_{эл}$ прямо пропорциональна квадрату напряжённости E^2 :

$$W_{эл} \sim E^2.$$

Пусть при колебательном движении электрических зарядов в пространстве вокруг них возникает электромагнитная волна. Энергия электромагнитной волны $W_{эм}$ равна сумме энергий электрического и магнитного полей $W_{эл}$ и W_m соответственно.

$$W_{эм} = W_{эл} + W_m.$$

В теории электромагнитного поля Максвелла доказывается, что в электромагнитной волне электрическая энергия в любой момент времени равна магнитной. Следовательно, энергия электромагнитной волны $W_{эм}$ также прямо пропорциональна квадрату напряжённости электрического поля E^2 :

$$W_{эм} \sim E^2. \quad (8.1)$$

Выясним, как напряжённость электрического поля зависит от частоты колебаний электрических зарядов – источников электромагнитной волны.

Рассмотрим замкнутый контур (рис. 71). Пусть контур пронизывает магнитный поток, созданный магнитным полем переменного тока, возникающем при колебательном движении зарядов.

ЭДС индукции \mathcal{E} в контуре в соответствии с законом электромагнитной индукции определяется производной (быстротой изменения) магнитного потока по времени $\Phi'(t)$:

$$\mathcal{E} = -\Phi'(t). \quad (8.2)$$

В свою очередь магнитный поток $\Phi(t)$ зависит от величины магнитной индукции $B(t)$, которая тем больше, чем больше сила тока $I(t)$, создающего магнитный поток.

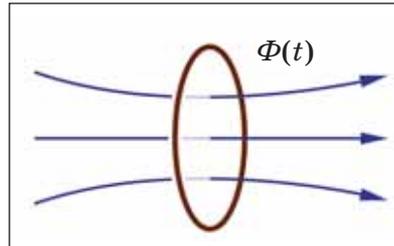


Рис. 71

$$\Phi(t) \sim B(t) \sim I(t). \quad (8.3)$$

Сила тока $I(t)$ равна производной заряда по времени $q'(t)$:

$$I = q'(t). \quad (8.4)$$

Из соотношений (8.2) – (8.4) имеем

$$\mathcal{E} \sim I'(t)$$

или

$$\mathcal{E} \sim q''(t). \quad (8.5)$$

Но чем больше ЭДС \mathcal{E} , тем бóльшая работа совершается вихревым электрическим полем при перемещении единичного электрического заряда. Следовательно, тем бóльшая сила действует на заряд, а значит, тем больше напряжённость E вихревого электрического поля.

$$E \sim \mathcal{E}.$$

С учётом соотношения (8.5) имеем

$$E \sim q''(t). \quad (8.6)$$

Напряжённость вихревого электрического поля определяется второй производной заряда по времени.

Пусть величина заряда $q(t)$ изменяется с течением времени по гармоническому закону

$$q(t) = q_{\text{макс}} \cos 2\pi\nu t,$$

где $q_{\text{макс}}$ – амплитуда колебаний заряда;

ν – частота колебаний.

Вычислив вторую производную заряда по времени, мы выясним зависимость напряжённости вихревого электрического поля от частоты колебаний:

$$E \sim \nu^2.$$

Полученный результат позволяет сделать вывод о зависимости энергии электромагнитной волны $W_{\text{эм}}$ от частоты колебаний. Так как в соответствии с формулой (8.1)

$$W_{\text{эм}} \sim E^2,$$

то окончательно имеем

$$W_{\text{эм}} \sim \nu^4.$$

Энергия электромагнитной волны прямо пропорциональна четвёртой степени частоты излучения.

По этой причине для увеличения мощности электромагнитного излучения необходимо использовать колебания высокой частоты. Так, при увеличении, например, частоты колебаний в сто раз (10^2) мощность излучаемых электромагнитных волн увеличится в сто миллионов раз (10^8).

Принцип радиосвязи. Для осуществления радиосвязи – передачи информации с помощью электромагнитных волн радиодиапазона – необходимо создать переменный электрический ток высокой частоты в передающей антенне. Этот ток порождает электромагнитную волну – колебания электромагнитного поля, распространяющиеся в окружающем пространстве со скоростью света.

Достигнув приёмной антенны, электрическое поле электромагнитной волны вызывает в проводнике приёмной антенны колебания электронов – возникает переменный электрический ток.

Сколько-нибудь заметная электромагнитная волна излучается, если частота колебаний переменного тока достаточно велика и составляет 100 000 Гц. Это связано с тем, что энергия излучаемой электромагнитной волны $W_{эм}$ пропорциональна частоте колебаний ν в четвёртой степени:

$$W_{эм} \sim \nu^4.$$

Следовательно, если с помощью микрофона превратить звуковые колебания в переменный ток частотой 16–20 000 Гц, то подобный электрический ток низкой (звуковой) частоты не приведёт к излучению практически значимой электромагнитной волны.

Для установления радиосвязи необходимо дополнительно провести процессы модуляции и демодуляции (*детектирования*).

Модуляция – изменение параметров высокочастотных электромагнитных колебаний под воздействием низкочастотных электромагнитных колебаний – источника информации. В зависимости от того, какой именно параметр высокочастотных колебаний изменяется, различают амплитудную, частную, фазовую модуляции. Во многих случаях применяются не непрерывные высокочастотные колебания, а последовательность отдельных высокочастотных импульсов. В этом случае возможна также модуляция (изменение) длительности импульса.

Модулированные высокочастотные электромагнитные колебания направляются в передающую антенну и излучаются электромагнитные волны, при распространении которых в этом случае переносятся не только энергия, но и информация, «закодированная» в изменённых параметрах волны. Когда электромагнитная волна достигает приёмной антенны, то в ней возникают аналогичные высокочастотные модулированные электромагнитные колебания. С этими колебаниями проводят процесс демодуляции (*детектирования*).

Демодуляция (детектирование) – процесс обратной модуляции, состоящий в выделении низкочастотных электромагнитных колебаний из модулированных высокочастотных электромагнитных колебаний. В выделенных низкочастотных колебаниях как раз и содержится переданная с помощью электромагнитных волн информация. Например, низкочастотные колебания (переменный ток) могут быть направлены в громкоговоритель с тем, чтобы получить звук.

Упрощённая блок-схема радиосвязи изображена на рисунке 72.

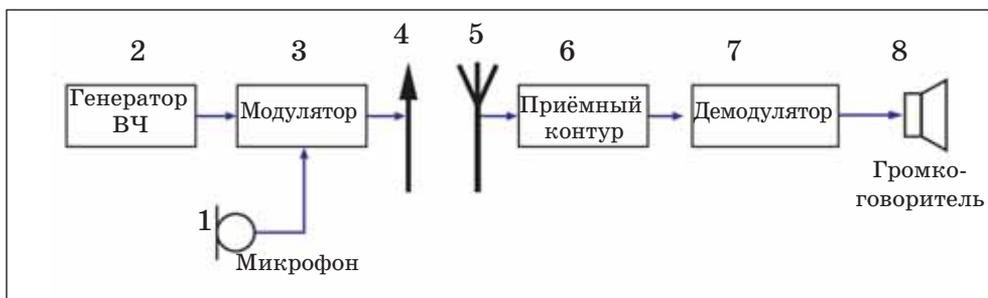


Рис. 72. Упрощённая блок-схема радиосвязи:

- | | |
|-------------------------|-----------------------|
| 1 – микрофон; | 5 – приёмная антенна; |
| 2 – генератор ВЧ; | 6 – приёмный контур; |
| 3 – модулятор; | 7 – демодулятор; |
| 4 – передающая антенна; | 8 – громкоговоритель |

Организация *телевидения* – *передачи изображения с помощью электромагнитных волн* – сходна с радиотелефонной связью, но требует проведения и ряда особых физических процессов.

Во-первых, в телецентре производят преобразование оптического изображения в набор электрических импульсов. Раньше (середина – конец XX века) телевизионная камера имела в своём составе электровакуумный прибор – передающую трубку. На мозаичный экран трубки с помощью объектива проецировалось изображение, и различные участки экрана – элементы мозаики – под действием падающего света приобретали электрический заряд различной величины. В настоящее время в телевизионных камерах используются полупроводниковые матрицы, состоящие из светочувствительных элементов – пикселей. С их помощью оптическое изображение преобразуется в серии электрических импульсов – видеосигналы, соответствующие трём основным цветам: красному, синему, зелёному.

Во-вторых, видеосигналы модулируют электромагнитные колебания, вырабатываемые генератором высокочастотных колебаний телевизионного радиопередатчика. Таким образом, электромагнитные импульсы, излучённые передающей антенной, несут информацию и о звуке, и об изображении.

В-третьих, в телевизионном приёмнике происходит обратное преобразование электрических сигналов в оптическое изображение (при параллельной демодуляции электрических сигналов, с помощью которых транслируется звуковое сопровождение). При восстановлении оптического изображения на экране телевизионного приёмника –

телевизора – учитываются особенности зрения человека – сравнительно невысокая разрешающая способность глаза и инерционность зрения.

Разрешающая способность глаза такова, что с расстояния 1 м он способен различать по отдельности точки, находящиеся друг от друга не ближе, чем на расстоянии 0,3 мм. Если же смотреть на эти точки с большего расстояния, то они сливаются в единое целое. Поэтому на экране телевизора близко друг от друга располагают «красные», «синие», «зелёные» пиксели, которые светятся тем ярче, чем больший электрический сигнал к ним приложен. Трёх цветowych точек – красной, синей, зелёной – в одном элементе изображения достаточно для получения изображения в цвете. Совокупность большого числа отдельных элементов изображения воспринимается глазом как единая цветная «картинка».

Инерционность зрения заключается в том, что мозг человека сохраняет зрительный образ после прекращения действия света ещё в течение 0,1–0,2 с. Поэтому при быстрой смене цветowych «картинок»-кадров на экране телевизора глаз воспринимает изображение как непрерывное.

Самое широкое распространение радиосвязь нашла при организации так называемой *сотовой связи*, услугами которой пользуется практически каждый из нас. В сети сотовой связи можно выделить следующие основные элементы:

- мобильные телефоны (мобильные станции), которыми пользуются абоненты сети;
- базовые станции, управляющие процессом соединения с мобильными телефонами;
- коммуникационные центры мобильной связи, обеспечивающие соединение пользователей мобильных телефонов внутри сети и соединение пользователей мобильных телефонов с абонентами проводных телефонных сетей, и наоборот.

Система сотовой связи строится в виде набора ячеек, покрывающих обслуживаемую территорию. Ячейки обычно изображают в виде правильных шестиугольников, что по внешнему сходству с пчелиными сотами и стало поводом назвать систему связи сотовой (рис. 73).

В центре каждой ячейки-соты располагается базовая станция с незначительной мощностью выходного сигнала. Это позволяет, не вызывая помех, использовать те же самые частоты каналов связи данной базовой станции в других, удалённых от неё, сотах. Повторное использование частот каналов связи делает возможным значительно увеличить число пользователей-абонентов сотовой связи.

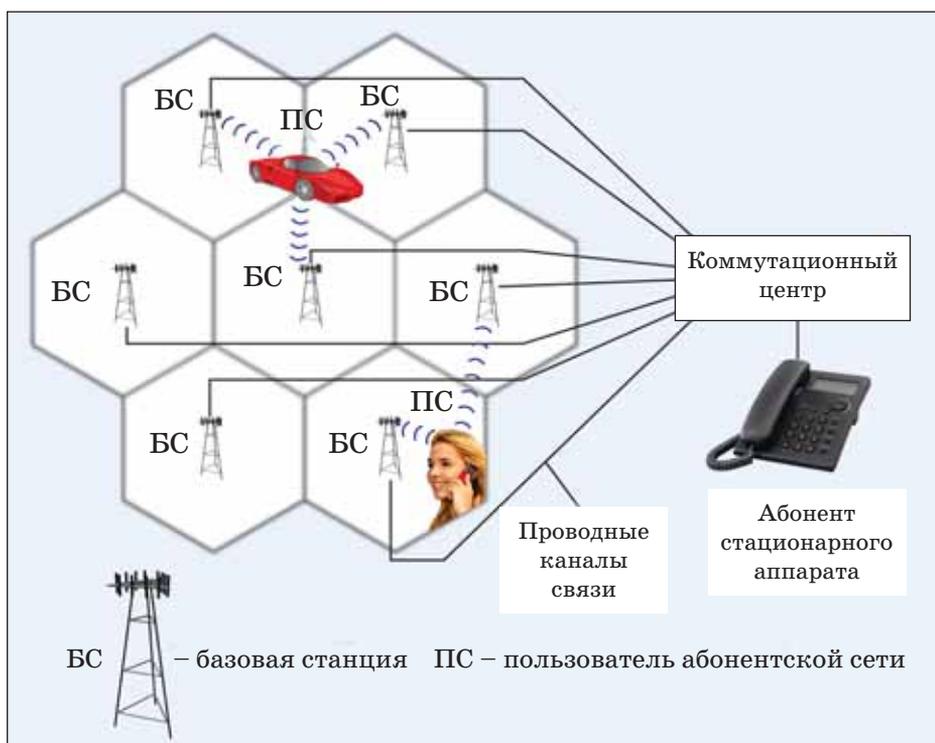


Рис. 73

Когда мобильный телефон абонента сети находится в режиме ожидания, то его приёмное устройство постоянно сканирует (отслеживает) сигналы ближайших доступных базовых станций. Если пользователю-абоненту сети необходимо позвонить, то с его мобильного телефона отправляется сигнал на доступную базовую станцию. С базовой станции сигнал-запрос поступает в коммутационный центр. Коммутационный центр автоматически отправляет полученный запрос на ту базовую станцию, которая получает наибольший сигнал с мобильного телефона вызываемого абонента. Так устанавливается связь между двумя абонентами – пользователями сети.

Коммутационный центр – автоматическая телефонная станция системы сотовой связи – отслеживает уровень сигнала при связи абонентов. По мере удаления абонента от базовой станции, при ухудшении распространения радиоволн, из-за помех или возникновения неисправности коммутационного оборудования уровень радиосигнала может стать меньше установленной нормы. Информация об этом

по служебному каналу связи сразу же поступает в коммутационный центр и происходит переключение мобильного телефона на ту из базовых станций, которая обеспечивает наибольший уровень сигнала. Переключения с одной базовой станции на другую происходят так быстро, что абонент совершенно их не замечает и эти эстафетные передачи обеспечивают устойчивость и непрерывность сотовой связи.

Распространение радиоволн. Распространение радиоволн – электромагнитных волн, используемых для осуществления радио- и телевизионной связи – сложный физический процесс. При распространении волн в неоднородной атмосфере вблизи поверхности Земли происходят различные физические явления: поглощение и рассеяние радиоволн, их преломление, интерференция и дифракция.

Основные факторы, наиболее существенно влияющие на распространение радиоволн, это:

- *дифракция* – огибание волнами выпуклой поверхности Земли;
- *отражение радиоволн от ионосферы* – ионизированного слоя атмосферы, расположенного на высоте 100–300 км;
- *отражение от поверхности Земли.*

Для радиоволн с различной длиной волны значение этих факторов неодинаково, что послужило основанием для подразделения радиоволн на отдельные диапазоны:

Название диапазона	Длина волны, м	Особенности распространения
Длинные волны (ДВ)	10 000–1000	Дифракция волн
Средние волны (СВ)	1000–100	Дифракция волн, но в меньшей степени
Короткие волны (КВ)	100–10	Отражение от ионосферы и поверхности Земли
Ультракороткие волны (УКВ)	Менее 10	Проходят через ионосферу

Благодаря дифракции длинные волны используются для устойчивой дальней и сверхдальней радиосвязи. Помимо этого наиболее длинные радиоволны используются для подземной и подводной радиосвязи.

Средние волны распространяются вдоль поверхности Земли и используются в радиовещании, радиотелефонной связи. В ночное время помимо волны, распространяющейся вдоль земной поверхно-

сти, возникает волна, отражённая от ионосферы. Эта ионосферная волна является источником помех для тех радиослужб, что ориентированы на приём «земной» волны.

Короткие волны отражаются от ионосферы и от поверхности Земли. Неоднократные отражения коротких волн «земля – ионосфера – земля – ионосфера – земля» позволяют осуществлять радиосвязь и на малых, и на больших расстояниях. Но изменение условий отражения радиоволн и интерференционные эффекты могут приводить к нарушению связи на коротких волнах. Этот диапазон радиоволн применяется для радиотелефонной связи, а также для радиолокационной связи.

Ультракороткие волны, которые не огибают поверхность Земли и проходят через атмосферу, используются в пределах «прямой видимости» радиопередатчика и радиоприёмника, в телевидении, для связи с космическими аппаратами, в радиоастрономии. Ультракоротковолновое электромагнитное излучение используется также при радиолокации. *Радиолокация* – обнаружение, распознавание, определение местонахождения и скорости объекта с помощью отражённых от объекта радиоволн. Излучающая антенна радиолокационной установки – радара – излучает ультракороткие волны остронаправленным пучком – радиолучом. Радиолуч достигает объекта, отражается, и отражённый сигнал фиксируется радаром.

Направление принятого сигнала указывает направление на объект, а расстояние до него определяется следующим образом. Радар излучает электромагнитные волны кратковременными импульсами продолжительностью в микросекунду. Во время пауз между импульсами – в «радиотишине» – радаром улавливается отражённый сигнал. Если время, за которое радиоимпульс достиг объекта и вернулся обратно, составляет t , то расстояние L до объекта, очевидно, равно

$$L = \frac{ct}{2},$$

где c – скорость света.

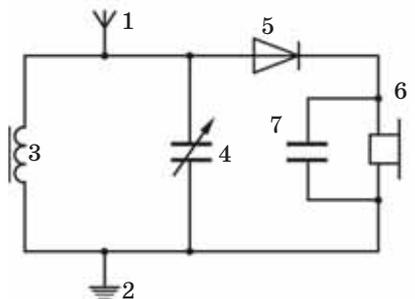
Зависимость энергии электромагнитной волны от частоты колебаний, $W_{эм} \sim \nu^4$, **модуляция и демодуляция (детектирование), блок-схема радиосвязи, телевидение, сотовая связь**, особенности распространения радиоволн различных диапазонов, **радиолокация**, $L = \frac{ct}{2}$.

8.1 ● Какова длина радиоволны, принимаемой сотовым телефоном, если базовой станцией излучается сигнал частотой 940 МГц?

8.2 ● На рисунке 74 изображена схема простейшего радиоприёмника. Антенна 1, заземление 2, катушка 3, конденсатор переменной ёмкости 4 образуют колебательный контур, в котором за счёт электромагнитных волн возникают высокочастотные модулированные электромагнитные колебания. Диод 5 выполняет роль демодулятора (детектора), выделяя низкочастотные колебания. С помощью телефона 6 низкочастотные колебания – переменный ток – превращаются в звуковые колебания. Конденсатор 7 способствует улучшению качества звучания. С какой целью в колебательном контуре приёмника использован конденсатор переменной ёмкости? В каком диапазоне радиоволн может работать приёмник, если индуктивность катушки колебательного контура 0,4 мГн, а ёмкость конденсатора колебательного контура изменяется от 12 до 500 пФ?

Рис. 74. Схема простейшего радиоприёмника:

- 1 – антенна;
- 2 – заземление;
- 3 – катушка;
- 4 – конденсатор переменной ёмкости;
- 5 – диод;
- 6 – телефон;
- 7 – конденсатор



8.3 ● Радиолокатор посылает 2000 импульсов в секунду. Какова предельная дальность действия (глубина разведки) этого радиолокатора? Длительность самого излучённого импульса не учитывать.

8.4 ● Оцените, какова дальность уверенного приёма телевизионных передач, считая, что она ограничена линией горизонта. При расчёте примите, что антенна телевизионного передатчика установлена на высоте 300 м.

8.5 ● Оцените, во сколько раз потребуется увеличить мощность радиопередатчика при переходе с частоты 100 МГц на частоту 1 МГц при условии одинаковой мощности излучения электромагнитных волн.

Самое важное в разделе «Электромагнитные колебания и волны»

1. Колебания – физический процесс, повторяющийся через определённый промежуток времени.

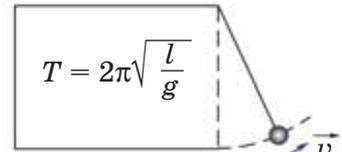
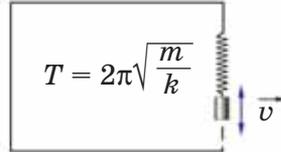
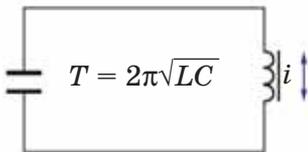
2. Свободные колебания при малой амплитуде колебаний являются гармоническими.

$$x(t) = x_{\text{макс}} \cos(\omega t + \varphi_0)$$

амплитуда
фаза, рад
круговая частота, Гц

$$\omega = 2\pi\nu \quad \text{частота, Гц}$$

$$\nu = \frac{1}{T} \quad \text{период, с}$$

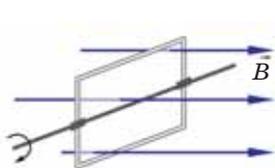


3. Свободные электромагнитные колебания в колебательном контуре происходят благодаря явлению самоиндукции.

$$\mathcal{E} = -\Phi'(t), \quad \text{где } \Phi(t) = LI(t)$$

ЭДС самоиндукции, В
магнитный поток, Вб
индуктивность, Гн
сила тока, А

4. Вынужденные электрические колебания – переменный ток.



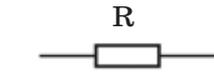
$$\mathcal{E} = -\Phi'(t), \quad \text{где } \Phi(t) = Bs \cos \omega t$$

ЭДС индукции, В
магнитная индукция, Тл
площадь контура, м²

Переменный ток характеризуют действующими значениями величин:

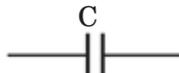
$$I = \frac{I_{\text{макс}}}{\sqrt{2}}, \quad U = \frac{U_{\text{макс}}}{\sqrt{2}}.$$

В цепи переменного тока происходят различные физические процессы:



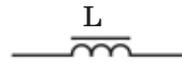
Выделение
тепловой энергии

$$P = UI$$



Зарядка и разрядка
конденсатора

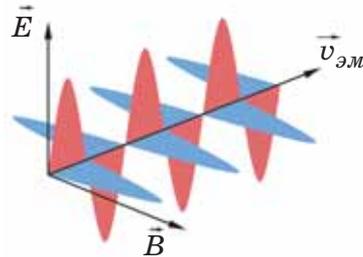
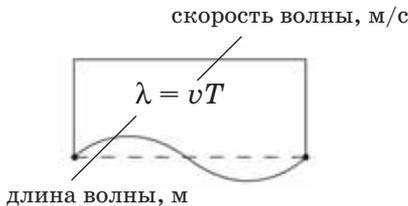
$$X_C = \frac{1}{\omega C}$$



Явление
самоиндукции

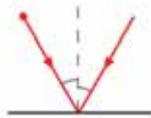
$$X_L = \omega L$$

5. Волна – колебания, распространяющиеся в пространстве с течением времени. Электромагнитная волна – поперечная волна.

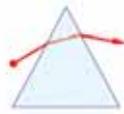


Скорость электромагнитной волны в вакууме $c \approx 300\,000$ км/с.

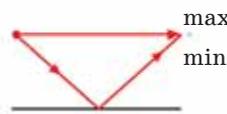
6. Для волн различной природы наблюдаются явления:



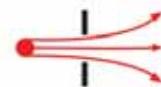
Отражение



Преломление



Интерференция



Дифракция

7. Радиоволны нашли самое широкое практическое применение (радиосвязь, телевизионное вещание, радиолокация).

1.1 ● Историки техники утверждают, что первая в мире радиограмма была передана Александром Степановичем Поповым в 1896 году на расстояние 250 м. Сколько времени потребовалось радиосигналу, чтобы преодолеть это расстояние?

1.2 ● Что необходимо сделать при переходе радиоприёмника на приём более длинных радиоволн – выдвинуть из катушки или вдвинуть в катушку индуктивности колебательного контура радиоприёмника сердечник? Ответ обосновать.



1.3. Подготовьте сообщение по теме «Радиоастрономия».

1.4 ● При поднятии на гору период колебаний математического маятника увеличивается. Изменится ли период колебаний маятника, если его опустить в глубокую шахту? Ответ обосновать.

1.5 ● При радиолокационном обзоре окружающего пространства, как правило, производят механический поворот антенны радара. Возможна ли конструкция антенны радиолокатора, которая позволяла бы сканировать окружающее пространство без поворота самой антенны? Если да, то как это можно сделать?

P. S.



Изучая электромагнитные и механические колебания и волны, мы убедились в схожести описания различных по физической природе колебательных и волновых процессов. Совершенно разные колебания – будь то колебания величины электрического заряда и силы тока в колебательном контуре или колебания координаты или скорости груза, прикреплённого к пружине, – протекают по сходным математическим «сценариям». Так, например, нам удалось одинаковым образом вывести формулы для расчёта периода свободных колебаний в различных колебательных системах. На примере электромагнитных волн мы выяснили, что для волн характерны такие физические явления, как отражение, преломление, интерференция, дифракция. Также было установлено, что поперечным волнам присуща ещё одна характеристика – поляризация волн.

Несмотря на такое глубокое обобщение «колебательно-волновых» процессов, целый ряд вопросов, касающихся колебаний и волн, не рассматривался. Вот только некоторые из них:

– Нам известно, что частота свободных электромагнитных колебаний в колебательном контуре определяется ёмкостью конденсатора и индуктивностью катушки. Однако способы экспериментального измерения или теоретического расчёта этих величин не изучались.

– Нам известно, что свободные электромагнитные колебания в колебательном контуре являются затухающими. Но устройство генератора незатухающих электромагнитных колебаний, который необходим, например, при осуществлении радиосвязи, не рассматривалось.

– Мы знаем, от чего зависят ёмкостное и индуктивное сопротивления. Но не известно, как рассчитать силу тока в цепи переменного тока в том случае, когда последовательно или параллельно включены все три элемента: резистор, конденсатор, катушка индуктивности (закон Ома для цепи переменного тока).

– Нам известны принципы радиосвязи. Но не рассматривалось, например, каковы должны быть конструкции передающей и приёмной антенн в зависимости от используемого диапазона радиоволн.

Раздел 2. Геометрическая и волновая оптика

В этом разделе учебника вы углубите имеющиеся у вас знания в области световых явлений. При изучении законов геометрической оптики будет приведено математическое выражение закона преломления света. Это позволит провести расчёты, связанные, например, с волоконной оптикой.

При изучении волновой оптики будет рассмотрен целый ряд явлений, свидетельствующих о волновом характере распространения света.



Вспомните, что вы изучали ранее и ответьте на вопросы:

- Какие законы геометрической оптики вам известны?
- Что такое линзы и как строится ход лучей в линзе?
- Каково строение глаза?
- В чём заключаются явления интерференции и дифракции волн?

§ 9. Законы геометрической оптики

Электромагнитная природа света

Основные законы геометрической оптики

Лабораторная работа «Определение абсолютного показателя преломления стекла»

§ 10. Линзы: их свойства и применение

Собирающие и рассеивающие линзы

Изображения, даваемые линзами

Формула линзы

Глаз. Очки

§ 11. Решение расчётных и экспериментальных задач по теме «Геометрическая оптика»

Примеры решения задач

Лабораторная работа «Определение фокусного расстояния и оптической силы собирающей линзы»

§ 12. Дисперсия света

Явление дисперсии света

Радуга

Рассеяние света

§ 13. Поляризация света

§ 14. Интерференция света

Опыт Юнга

Интерференция света в природе и технике

Лабораторная работа «Наблюдение интерференции света»

§ 15. Дифракция света

Явление дифракции света

Зоны Френеля

Дифракционная решётка

Лабораторная работа «Наблюдение дифракции света»

Самое важное в разделе «Геометрическая и волновая оптика»

P. S.

§ 9. ЗАКОНЫ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ОПТИКИ



Где виден путь прямой, не ездите по кривой.
Русская пословица

Вам уже известны основные понятия геометрической оптики.

Электромагнитная природа света. Вторая половина XIX века была ознаменована в истории цивилизации выдающимся достижением человеческого разума – созданием великим английским физиком Джеймсом Клерком Максвеллом (1831–1879) теории электромагнитного поля. Выдающийся американский физик-теоретик Ричард Фейнман (1918–1988) писал: «В истории человечества (если посмотреть на неё, скажем, через десять тысяч лет) самым значительным событием XIX столетия, несомненно, будет открытие Максвеллом законов электродинамики. На фоне этого важного научного открытия гражданская война в Америке в том же десятилетии будет выглядеть мелким провинциальным происшествием».

Сам Максвелл так определил созданную им теорию: «Та теория, которую я предлагаю, может быть названа теорией *электромагнитного поля*, потому что она имеет дело с пространством, окружающим электрические или магнитные тела, и она может быть названа также динамической теорией, поскольку она допускает, что в этом пространстве имеется материя, находящаяся в движении, посредством которой и производятся наблюдаемые электромагнитные явления».

«Материя, находящаяся в движении» – это электромагнитные волны, существование которых и является весомым подтверждением теории электромагнетизма. Скорость электромагнитных волн в вакууме, как следовало из теории Максвелла, равна скорости света c :

$$c \approx 300\,000 \text{ км/с.}$$

Это позволило Максвеллу сделать вывод, что свет, воспринимаемый органом зрения человека – глазом, – это тоже электромагнитные волны, отличающиеся от других видов электромагнитного излучения лишь длиной волны.



9.1. Какие виды электромагнитного излучения вам известны?

Видимое человеком излучение (оптический диапазон) – это электромагнитное излучение с длиной волны от 400 до 760 нм.

Основные законы геометрической оптики. Электромагнитная природа света была установлена учёными лишь во второй половине XIX века. Но научное изучение световых явлений имеет более чем двухтысячелетнюю историю и ведёт свой отсчёт с работ древнегреческого математика Евклида (3 в. до н. э.). Первоначально основным понятием оптики – науки о свете и световых явлениях – было понятие светового луча.

Световой луч – узкий пучок света, распространяющийся в прозрачной среде. В направлении светового луча происходит перенос энергии.

На основе понятия светового луча была развита *геометрическая оптика* – раздел оптики, устанавливающий законы распространения, отражения, преломления света без анализа физической природы света.

Сформулируем закон прямолинейного распространения света.

Свет в прозрачной однородной среде распространяется прямолинейно.



9.2. Какие физические и астрономические явления являются доказательством прямолинейного распространения света?

Следующий закон геометрической оптики – это **закон отражения света**, который устанавливает изменение направления светового луча в результате его встречи с отражающей поверхностью.

Луч падающий, луч отражённый, нормаль к отражающей поверхности в точке падения лежат в одной плоскости.

Угол отражения равен углу падения.

На рисунке 75 изображена гладкая (зеркальная) отражающая поверхность MN , падающий луч AO , отражённый луч OB и перпендикуляр (нормаль) к отражающей поверхности в точке падения $O'O$. Угол между падающим лучом AO и нормалью $O'O$ называют углом падения (он обозначен как α). Угол между отражённым лучом OB и нормалью $O'O$ называют углом отражения (он обозначен как γ). В соответствии с законом отражения

$$\gamma = \alpha. \quad (9.1)$$

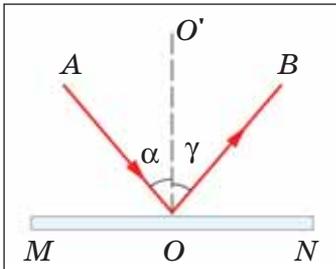


Рис. 75

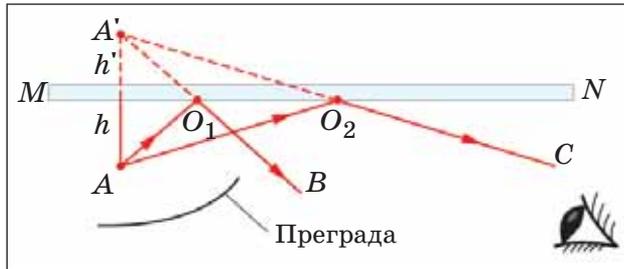


Рис. 76

Закон отражения позволяет объяснить возникновение так называемого мнимого изображения при рассмотрении предмета в зеркале. Обратимся к рисунку 76. Пусть световые лучи AO_1 , AO_2 и так далее, испускаемые светящимся предметом (точка A), отражаются от зеркала MN и возникают отражённые лучи O_1B , O_2C и так далее.

Если на пути отражённых лучей поставить экран, то вне зависимости от положения экрана на нём не будет возникать изображение предмета. Отражённые лучи не пересекаются, они являются расходящимися.

Но что будет происходить, если эти отражённые расходящиеся лучи попадают в глаз человека? Глаз – орган зрения, непосредственно связан с мозгом. Мозг человека «знает», что световые лучи распространяются прямолинейно (об этом свидетельствует «накопленный» им опыт анализа хода световых лучей). Поэтому отражённые лучи мозгом мысленно продолжают до воображаемой точки их пересечения (точка A' на рисунке 76). Эта точка A' , из которой как будто бы исходят световые лучи, называется мнимым изображением¹ точки A в плоском зеркале.

¹ Изображение называют мнимым, так как фактически световая энергия в точку мнимого изображения не поступает.

Если аккуратно провести построение мнимого изображения в соответствии с законом отражения (равенство углов отражения и падения), то можно убедиться, что *мнимое изображение расположено симметрично относительно зеркала* (рис. 76):

$$h' = h.$$

(Попробуйте доказать это утверждение строго, используя имеющиеся у вас математические знания.)

В окружающей нас действительности намного чаще происходит не отражение от плоской зеркальной поверхности, а так называемое *диффузное (рассеянное) отражение от шероховатой поверхности*. При отражении от шероховатой поверхности в каждой её точке отражение происходит в соответствии с законом отражения (рис. 77). Но отдельные отражающие участки поверхности повернуты относительно друг друга произвольным образом. В итоге отражённые лучи будут направлены самым разным образом – происходит рассеяние света. Этим диффузное отражение отличается от отражения от гладкой поверхности, когда параллельные лучи после отражения таковыми и остаются (рис. 78). Диффузное (рассеянное) отражение – очень важное для нас физическое явление. Ведь только благодаря диффузному отражению свет, отражённый от поверхности различных предметов, достигает органов зрения людей и вызывает зрительное восприятие. Не будь диффузного отражения, мы могли бы видеть только светящиеся предметы – источники света.

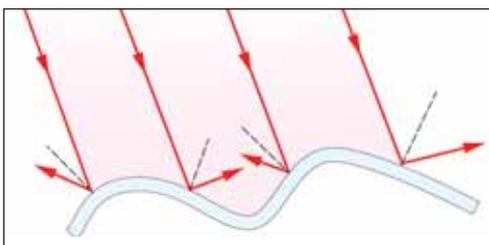


Рис. 77

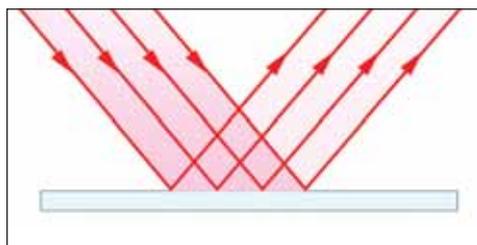


Рис. 78

Закон прямолинейного распространения света и закон отражения света определяют характер распространения света в однородной среде и при встрече света с отражающей поверхностью, когда свет возвращается в прежнюю среду. В отличие от этих законов **закон преломления света** устанавливает изменение направления светового луча при переходе из одной прозрачной среды в другую.

Явление преломления света обусловлено неодинаковостью скорости света в различных средах.



Это утверждение можно проиллюстрировать следующей наглядной аналогией. Пусть колонна солдат, в том числе и её первая шеренга A_1A_2 (рис. 79) движется по асфальтированной площади под некоторым углом к границе площади KL , после которой начинается песчаная поверхность. Правофланговый (точка A_1 на рисунке 79) достигает границы KL и уменьшает скорость своего движения, переходя с асфальта на песчаную поверхность. Остальные солдаты в шеренге также уменьшают скорость своего движения. Через некоторое время и левофланговый, пройдя расстояние A_2A_2' , достигает границы KL и вынужден уменьшить свою скорость. К этому моменту времени правофланговый, двигаясь с меньшей скоростью, проходит меньшее расстояние A_1A_1' . В итоге колонна поворачивает и движется под другим углом к границе KL .

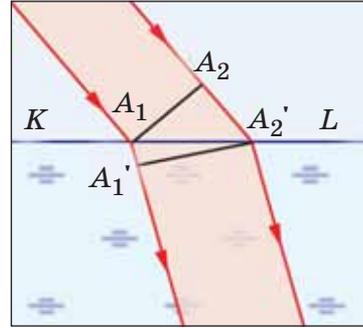


Рис. 79

Оптические свойства веществ характеризуют физической величиной, называемой *абсолютным показателем преломления*. **Абсолютный показатель преломления вещества – это величина, равная отношению скорости света в вакууме к скорости света в этом веществе.**

Абсолютный показатель преломления обозначают буквой n .

$$n = \frac{c}{v}, \quad (9.2)$$

где v – скорость света в веществе.



9.3. Какой – скалярной или векторной – величиной является абсолютный показатель преломления n ?

В каких единицах измеряется абсолютный показатель преломления?

Значения абсолютных показателей преломления некоторых веществ приведены в таблице 1.

Таблица 1. Абсолютный показатель преломления некоторых веществ (при температуре 20 °С) для длины волны светового излучения¹ 589,3 нм

Алмаз	2,417	Кислород (при н. у.)	1,000272
Ацетон	1,359	Органическое стекло	1,485–1,500
Азот (при н. у.)	1,000297	Спирт этиловый	1,361
Вода	1,333	Стекло кварцевое	1,458
Воздух (при н. у.)	1,000292	Стекло обычное	1,48–1,53
Глицерин	1,474	Стекло оптическое	1,47–2,04
Каменная соль	1,544	Янтарь	1,532

Пусть световой луч падает на границу раздела двух прозрачных сред (рис. 80). Угол между падающим лучом и нормалью к границе раздела двух сред называют углом падения (он обозначен как угол α). Угол между преломлённым лучом и нормалью к границе раздела двух сред называют углом преломления (он обозначен как угол β).

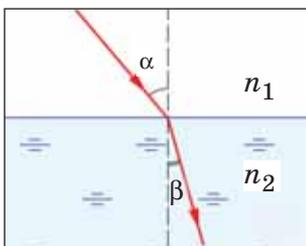


Рис. 80

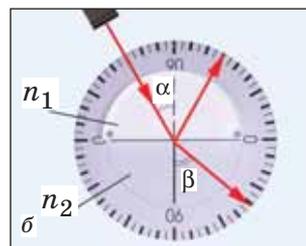
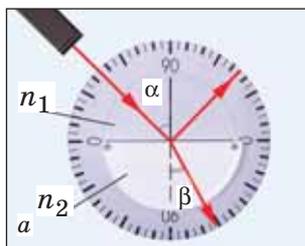


Рис. 81. Наблюдение явления преломления:
a – преломление света на границе «воздух – стекло»
 $n_2 > n_1$, $\beta < \alpha$;
б – преломление света на границе «стекло – воздух»
 $n_2 < n_1$, $\beta > \alpha$

Используем источник света – осветитель, круглый экран – диск и стеклянный полуцилиндр (рис. 81, *a*, *б*). Опыт показывает, что при переходе светового луча из среды с меньшим абсолютным показателем преломления (воздух) в среду с большим показателем преломления (стекло) угол преломления β всегда меньше угла падения α (рис. 81, *a*). И наоборот, при переходе из оптически более плотной среды² (стекло) в оптически менее плотную среду (воздух) угол преломления β превосходит угол падения α (рис. 81, *б*).

¹ Жёлтая линия в спектре излучения натрия.

² Из двух сред оптически более плотной средой называют ту прозрачную среду, которая имеет больший абсолютный показатель преломления.

Открытие закона преломления, которым устанавливается связь между углом падения, углом преломления и абсолютными показателями преломления прозрачных сред, связано в истории физики с именами нидерландского астронома и математика Виллеброрда Снеллиуса (1580–1626) и французского философа, математика, физика и физиолога Рене Декарта (1596–1650).

Формулируется **закон преломления света** следующим образом:

Луч падающий, луч преломлённый и нормаль к границе раздела двух прозрачных сред в точке падения лежат в одной плоскости. Произведение абсолютного показателя преломления среды, в которой шёл световой луч, на синус угла падения равно произведению абсолютного показателя преломления среды, в которой будет идти световой луч, на синус угла преломления.

$$n_1 \sin \alpha = n_2 \sin \beta, \quad (9.3)$$

где n_1 и n_2 – абсолютные показатели преломления соответствующих прозрачных сред.

При рассмотрении явления преломления наиболее интересным является случай перехода светового луча из оптически более плотной среды в оптически менее плотную (рис. 81, б). Будем увеличивать угол падения α . При этом угол преломления β также возрастает и он всегда больше, чем угол падения:

$$\beta > \alpha.$$

При достижении некоторого предельного значения угла падения α_0 угол преломления β становится равным 90° (рис. 82, а).

В случае дальнейшего увеличения угла падения преломление не происходит, а наблюдается только *полное отражение* (рис. 82, б). Явление полного отражения наблюдается при падении светового луча, распространяющегося в оптически более плотной среде, на границу с менее плотной средой при условии, что угол падения светового луча больше некоторого предельного значения.

Выведем формулу для расчёта *предельного угла полного отражения* α_0 . Будем исходить из установленного на опыте факта: если угол

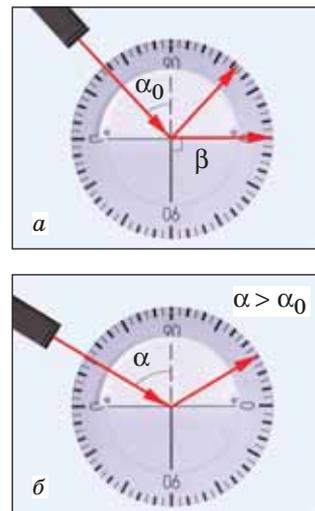


Рис. 82

падения равен α_0 , то угол преломления достиг 90° . Используем формулу закона преломления (9.3):

$$n_1 \sin \alpha_0 = n_2 \sin 90^\circ.$$

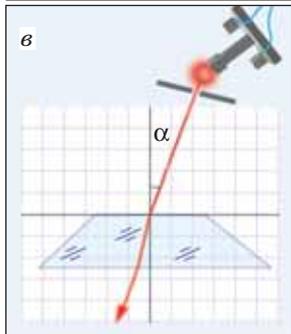
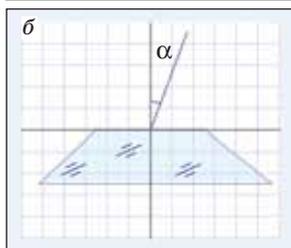
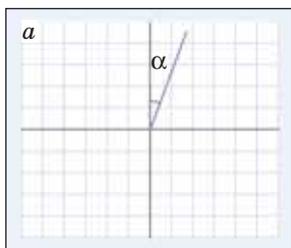
Отсюда

$$\sin \alpha_0 = \frac{n_2}{n_1}, \quad (9.4)$$

$$\alpha_0 = \arcsin \frac{n_2}{n_1}.$$

Лабораторная работа «Определение абсолютного показателя преломления стекла».

Оборудование: источник тока, низковольтная лампа на подставке, экран со щелью, стеклянная плоскопараллельная пластинка, транспортир.



Задание 1. Проверка закона преломления света.

На листе тетради начертите две взаимно перпендикулярные прямые и с помощью транспортира постройте луч, который составляет угол $\alpha = 20^\circ$ с одной из прямых (рис. 83, а).

Совместите плоскопараллельную грань стеклянной пластины с другой прямой (рис. 83, б).

Подключите лампу к источнику тока и расположите лампу и экран со щелью так, чтобы узкий пучок света шёл вдоль проведённого вами луча. Тогда угол падения светового луча на стеклянную пластинку составляет 20° (рис. 83, в).

Отметьте карандашом точку выхода светового луча из стекла. Уберите стеклянную пластинку и, соединив точку падения светового луча на стекло с точкой выхода светового луча из стекла, постройте ход светового луча в стекле.

Измерьте угол преломления β .

Аналогичные измерения проведите для случаев, когда угол падения составляет $30, 40, 50, 60, 70^\circ$.

Данные занесите в таблицу:

Рис. 83

$\alpha, ^\circ$	20	30	40	50	60	70
$\beta, ^\circ$						
$\sin \alpha$						
$\sin \beta$						

Постройте график зависимости синуса угла преломления от синуса угла падения. Сделайте вывод, выполняется ли закон преломления света.

Задание 2. Определение абсолютного показателя преломления стекла.

В соответствии с законом преломления в случае преломления света на границе «воздух – стекло» имеем

$$n_{\text{вх}} \sin \alpha = n_{\text{см}} \sin \beta,$$

где $n_{\text{вх}}$ и $n_{\text{см}}$ – абсолютные показатели преломления воздуха и стекла соответственно.

Отсюда

$$n_{\text{см}} = \frac{n_{\text{вх}} \sin \alpha}{\sin \beta}.$$

На построенном графике зависимости синуса угла преломления от синуса угла падения выберите произвольную точку. Определите, какие значения синуса угла падения $\sin \alpha$ и синуса угла преломления $\sin \beta$ соответствуют выбранной точке и проведите вычисление абсолютного показателя преломления стекла. Сравните результат со справочными значениями.



9.4. Почему результат вычисления абсолютного показателя преломления стекла $n_{\text{см}}$ не зависит от того, какую точку на графике вы выбрали?



Задание 3. Наблюдение явления полного отражения.

Направьте пучок света через боковую грань стеклянной пластины и наблюдайте преломление света на границе «стекло – воздух» (рис. 84).

Измерьте предельный угол полного отражения α_0 .

Используя значение предельного угла полного отражения α_0 , определите абсолютный показатель преломления стекла. Сравните со значением абсолютного показателя преломления стекла, полученным при выполнении задания 2 лабораторной работы.

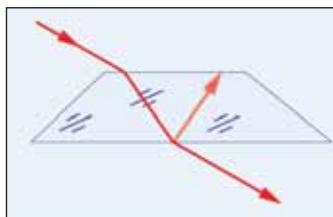


Рис. 84



9.5. Как оценить абсолютную погрешность проведённых вами косвенных измерений абсолютного показателя стекла $n_{\text{см}}$?

Электромагнитная природа света, оптика, световой луч, геометрическая оптика, закон прямолинейного распространения света, закон отражения света, причина преломления света на границе раздела двух прозрачных сред, абсолютный показатель преломления вещества, $n = \frac{c}{v}$, закон преломления, $n_1 \sin \alpha = n_2 \sin \beta$, явление полного отражения, предельный угол полного отражения, $\alpha_0 = \arcsin \frac{n_2}{n_1}$.

9.1 ● Вычислите скорость света в янтаре.



9.2. Луч света, распространяющегося в воздухе, падает под углом 30° в первом случае на поверхность воды, а во втором случае – на поверхность глицерина. В каком из случаев угол преломления будет больше? Проверьте свой ответ на опыте. (Вместо глицерина можно использовать подсолнечное масло.)

9.3 ● Пластику кварцевого стекла поместили в воду. На сколько градусов отклонится световой луч от своего первоначального направления при переходе из воды в кварцевое стекло? Угол падения 45° .



9.4. Чему равен предельный угол полного отражения для алмаза? С какой целью производят огранку алмазов, превращая их в бриллианты?

9.5 ● Аквалангист, находящийся на глубине 3 м, освещает поверхность воды над головой. Определите диаметр светлого круга, который увидит наблюдатель, находящийся поблизости на берегу.

§ 10. ЛИНЗЫ: ИХ СВОЙСТВА И ПРИМЕНЕНИЕ

Не прошло и 20 лет с тех пор, как было открыто искусство изготовления очков, призванных улучшить зрение. Это одно из самых лучших и необходимых искусств в мире.

*Из проповеди монаха-доминиканца
Джордано да Ривальто (1305 г.)*

Вам уже известно, что существуют различные виды линз.



Собирающие и рассеивающие линзы. Линзой, как известно, называют прозрачное тело, ограниченное двумя сферическими поверхностями, одна из ограничивающих поверхностей может быть и плоской (рис. 85, а, б). Линию O_1O_2 , проходящую через центры поверхностей и центр линзы, называют *главной оптической осью линзы*.

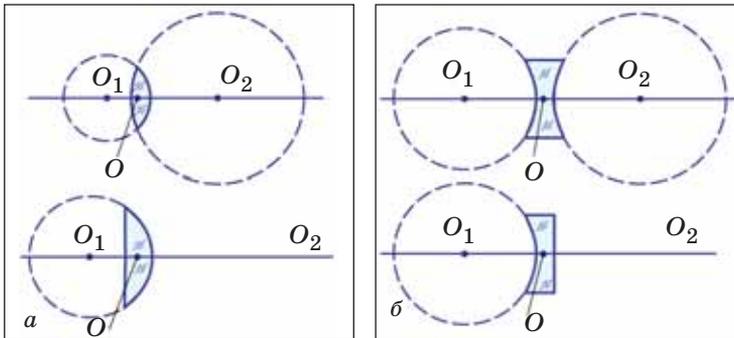


Рис. 85. Виды линз:

a – выпуклая и плосковыпуклая линзы;
б – вогнутая и плосковогнутая линзы

По внешнему виду линзы подразделяют на *выпуклые* и *вогнутые*, по оптическим же свойствам – на *собирающие* и *рассеивающие*.

Пронаблюдаем ход лучей через линзы. Направим световой луч через центр собирающей, а затем рассеивающей линзы (рис. 86, *a*, *б*). Опыт показывает, что при прохождении луча через центр линзы световой луч не изменяет своего направления.

Направим параллельный пучок световых лучей вдоль главной оптической оси выпуклой стеклянной линзы и убедимся, что она является собирающей линзой (рис. 87, *a*). Направим параллельный пучок световых лучей вдоль главной оптической оси вогнутой стеклянной линзы и убедимся, что она является рассеивающей линзой (рис. 87, *б*).

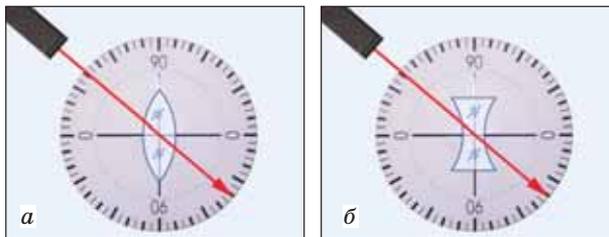


Рис. 86

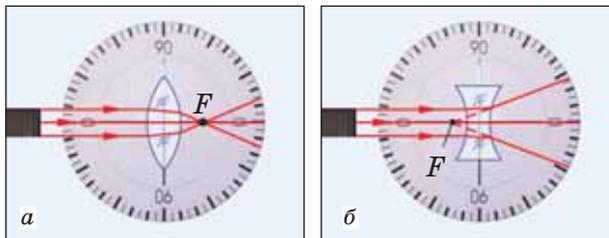


Рис. 87

Световые лучи, параллельные главной оптической оси, после преломления в собирающей линзе проходят через одну точку на главной оптической оси. Эту точку называют *главным фокусом линзы F* (рис. 88, *а*). Главных фокусов у собирающей линзы два – они расположены симметрично относительно центра линзы O . Условное обозначение собирающей линзы, центр линзы O , её главная оптическая ось и фокусы F изображены на рисунке 88, *б*. При отражении и преломлении выполняется *свойство обратимости световых лучей*. Это означает, например, что если световые лучи будут выходить из фокуса собирающей линзы, то, достигнув линзы, они преломятся так, что далее будут идти параллельно главной оптической оси (рис. 88, *в*).

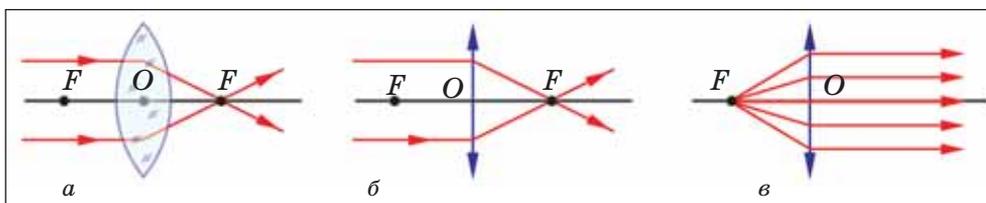


Рис. 88

Рассеивающие линзы также имеют фокусы – их называют *мнимыми главными фокусами*. Такое название связано с тем, что в точке мнимого фокуса после преломления в линзе собираются не сами лучи, идущие параллельно главной оптической оси рассеивающей линзы, а их мысленные продолжения (рис. 89, *а*). Условное обозначение рассеивающей линзы, центр линзы O , её главная оптическая ось и мнимые фокусы F изображены на рисунке 89, *б*.

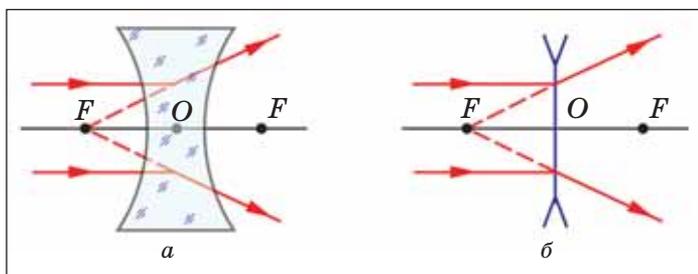


Рис. 89

Расстояние OF от центра линзы до её фокуса называют *фокусным расстоянием*. Фокусное расстояние линзы, как и саму точку фокуса, обозначают буквой F .

Помимо фокусного расстояния свойства линз характеризуют физической величиной, называемой *оптическая сила линзы*. Само название подчёркивает, что эта величина определяет преломляющую способность линзы (или системы линз). Чем больше оптическая сила, тем «сильнее», «круче» преломляются световые лучи в линзе, тем в итоге меньше её фокусное расстояние.

Для линз, находящихся в воздухе, оптическая сила (она обозначается буквой D) рассчитывается по формуле

$$D = \frac{1}{F}. \quad (10.1)$$

Единица измерения оптической силы называется диоптри́я (сокращённо обозначается дп).

Пусть мы располагаем стеклянной плоскопараллельной пластиной, лампой и экраном со щелью. Используя это оборудование, на опыте можно убедиться, что при падении луча на скошенную боковую грань пластины свет, преломляясь в стеклянном клине, всегда отклоняется в сторону более толстой части клина.



10.1. Почему выпуклые стеклянные линзы являются собирающими?

Рассмотрим ход светового луча при его преломлении в стеклянном клине (рис. 90). На границе «воздух – стекло» в соответствии с законом преломления угол преломления β меньше угла падения α . На границе «стекло – воздух» угол преломления β' больше угла падения α' . В итоге световой луч после двух преломлений отклоняется к основанию клина. Если мысленно разделить выпуклую и вогнутую линзы на отдельные клиновидные участки (рис. 91) и воспользоваться полученным нами правилом «отклонения к основанию клина», то становится ясно, почему выпуклая стеклянная линза собирающая, а вогнутая – рассеивающая.

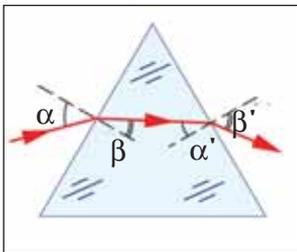


Рис. 90

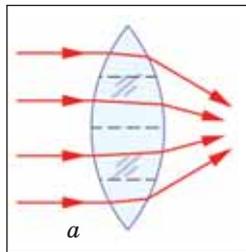
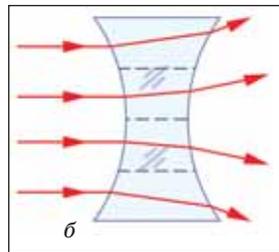


Рис. 91



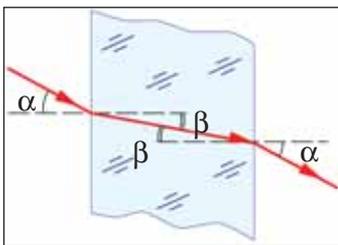


Рис. 92

Одновременно ясно, почему световой луч, проходя через центр линзы, не изменяет своего направления. Ведь центральная часть линзы – это стеклянная пластина с практически параллельными боковыми гранями (рис. 92). В этом случае после двух преломлений – на передней поверхности линзы (граница «воздух – стекло») и на задней поверхности линзы (граница «стекло – воздух») – световой луч не меняет своего направления, а лишь смещается. Но если линза тонкая (то есть её толщина много меньше радиусов кривизны сферических поверхностей линзы), то этим смещением можно пренебречь.

Изображения, даваемые линзами. Пусть предмет AB находится перед рассеивающей линзой (рис. 93). Световые лучи, излучаемые любой из точек предмета (например, точкой A) после прохождения через тонкую линзу будут являться расходящимися. Для простоты на рисунке 93 показан ход двух «самых удобных» световых лучей: луча 1, который проходит через центр линзы, не меняя своего направления, и луча 2, параллельного главной оптической оси линзы, который преломляется в линзе так, что его продолжение проходит через мнимый фокус F .

Расположим за линзой экран. Световые лучи, излучаемые любой из точек предмета, на экране не пересекутся и, следовательно, на экране не возникнет изображение предмета ни при каком положении экрана. Но если на этот предмет через линзу *посмотреть*, то мозг человека (как и в случае с зеркалом) мысленно продолжит расходящиеся лучи и наблюдатель будет считать, что лучи исходят из точки A' – точки мнимого изображения (рис. 93). Таким образом, рассеивающая линза даёт мнимое уменьшенное прямое (неперевёрнутое) изображение рассматриваемого предмета. Легко убедиться, что мнимое изображение предмета остаётся уменьшенным и прямым всегда, на каком расстоянии от линзы ни находился бы предмет.

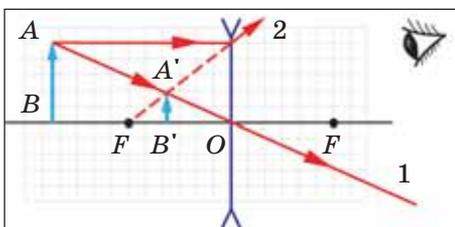


Рис. 93

Мнимое изображение можно получить, если рассматривать предмет и через собирающую линзу (рис. 94). Но в этом случае расстояние от линзы до предмета (обозначим его как a) должно быть меньше фокусного расстояния F :

$$a < F.$$

Для простоты на рисунке 94 показан ход двух «самых удобных» световых лучей: луча 1, который проходит через центр линзы, не меняя своего направления, и луча 2, параллельного главной оптической оси линзы, который преломляется в линзе так, что проходит через фокус F . Как видно из рисунка 94, мнимое изображение предмета будет увеличенным и прямым. Так, собирающую линзу располагают на малом расстоянии от предмета, если необходимо разглядеть мелкие детали какого-нибудь предмета (вспомните, к примеру, часовщиков).

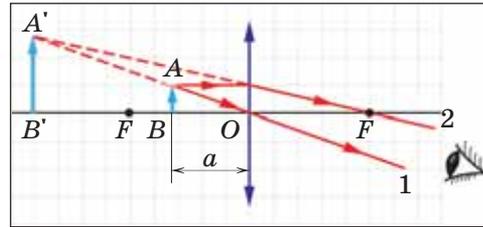


Рис. 94

Какое изображение предмета мы будем наблюдать, если предмет находится от собирающей линзы на расстоянии, большем, чем её фокусное расстояние? В таком случае световые лучи, излучаемые любой точкой предмета (например, точкой A), будут пересекаться (рис. 95, a , b).

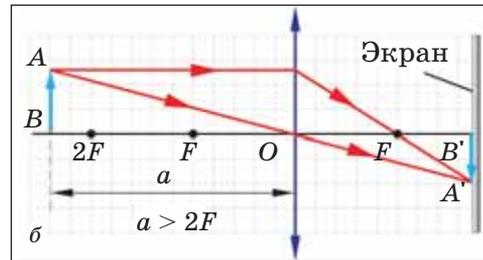
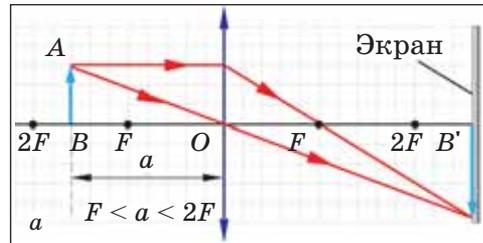


Рис. 95

Поставив в точку пересечения экран (или электронную матрицу фотоаппарата), мы будем наблюдать (или зафиксирруем фотоаппаратом) *действительное перевернутое изображение* предмета.

Если расстояние от линзы до предмета больше фокусного расстояния линзы, но меньше, чем два фокусных расстояния,

$$F < a < 2F,$$

то мы будем иметь *действительное увеличенное перевернутое изображение* предмета.

Если же расстояние от линзы до предмета больше, чем два фокусных расстояния линзы,

$$a > 2F,$$

то мы будем иметь *действительное уменьшенное перевернутое изображение* предмета.

Формула линзы. Если изменяют расстояние между линзой и предметом, то для того, чтобы получить четкое изображение предмета на экране, нужно изменить и расстояние от линзы до экрана (рис. 95, а, б). Так, если предмет от линзы удаляют, то экран к линзе необходимо приблизить. Следовательно, существует определенное соотношение между расстоянием от линзы до предмета (оно обозначено как a), расстоянием от линзы до изображения (обозначим его как b) и фокусным расстоянием F .

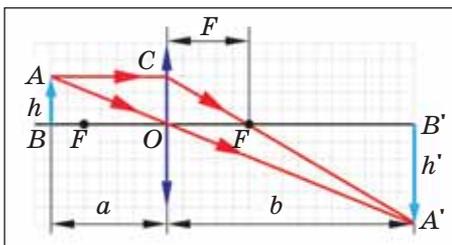


Рис. 96

Установим это соотношение. Пусть $A'B'$ – изображение предмета AB , даваемое собирающей линзой с фокусным расстоянием F (рис. 96). Обозначим высоту предмета как h , а высоту изображения – как h' . Тогда из подобия треугольников AOB и $A'O'B'$ следует, что

$$\frac{h'}{h} = \frac{b}{a}. \quad (10.2)$$

Из подобия треугольников CFO и $A'FB'$ следует, что

$$\frac{h'}{h} = \frac{b - F}{F}. \quad (10.3)$$

Из соотношений (10.2) и (10.3) имеем

$$\frac{b}{a} = \frac{b - F}{F}$$

или

$$\frac{1}{a} = \frac{b - F}{bF},$$

$$\frac{1}{a} = \frac{1}{F} - \frac{1}{b},$$

$$\boxed{\frac{1}{a} + \frac{1}{b} = \frac{1}{F}}. \quad (10.4)$$

Выведенная формула (10.4) называется *формулой линзы*. Если вспомнить определение оптической силы

$$D = \frac{1}{F},$$

то формулу линзы можно также записать в виде

$$\boxed{\frac{1}{a} + \frac{1}{b} = D}. \quad (10.5)$$

Формула линзы выведена нами для случая собирающей линзы, дающей действительное изображение. Но её можно применить и для случая, когда линза даёт мнимое изображение – необходимо только перед слагаемым $\frac{1}{b}$ поставить знак минус. Если же линза рассеивающая, то фокусное расстояние F и оптическую силу D также можно взять со знаком минус.

Пример решения задачи.

Во сколько раз предмет, рассматриваемый через рассеивающую линзу с фокусным расстоянием F , больше своего мнимого изображения? Расстояние от линзы до предмета равно $3F$.

Решение:

Рассеивающая линза даёт мнимое изображение (рис. 93). Если обозначить высоту предмета AB как h , а высоту мнимого изображения $A'B'$ как h' , то

$$\frac{h}{h'} = \frac{a}{b},$$

где a – расстояние от линзы до предмета;

b – расстояние от линзы до изображения.

Запишем формулу линзы (10.4) с учётом сформулированного правила знаков:

$$\frac{1}{a} - \frac{1}{b} = -\frac{1}{F}.$$

Тогда

$$b = \frac{aF}{a + F}.$$

Учтём, что по условию задачи $a = 3F$, следовательно,

$$b = \frac{3F}{4}.$$

Окончательно имеем

$$\frac{h}{h'} = 4.$$

Ответ: предмет больше своего изображения в 4 раза.



10.2. Каким образом можно убедиться в справедливости полученного ответа?

Глаз. Очки. Линзы, системы линз – основной элемент фотоаппаратов, биноклей, микроскопов, телескопов. Но самым важным для нас является оптический прибор, подаренный нам самой природой, – орган зрения человека глаз.

За миллионы лет эволюции глаз оптимальным образом приспособился к окружающим условиям. Оптическая сила нашего природного «фотоаппарата» может изменяться от 58,6 до 70,6 дп за счёт деформации хрусталика глаза, изменения кривизны его поверхности глазными мышцами. Это позволяет в широких пределах осуществлять

«наводку на резкость» – человек с нормальным зрением видит предметы, находящиеся на разных расстояниях.

Область длин волн, доступная зрительному восприятию человеческого глаза (400–760 нм), соответствует именно той части спектра, на которую приходится большая часть солнечного излучения. Более короткие длины волн (ультрафиолетовый диапазон) большей частью задерживаются атмосферой Земли. По этой причине отсутствует биологическая целесообразность в расширении органа зрения на коротковолновое ультрафиолетовое излучение. Нечувствительность глаза к длинноволновому излучению (инфракрасный диапазон) объясняется тем, что глаз человека как любое нагретое тело сам является источником инфракрасного (теплового) излучения. Это послужило бы препятствием, если глаз регистрировал бы инфракрасное (тепловое) излучение Солнца.

Светочувствительная часть глаза *сетчатка* имеет сложное строение и состоит из нескольких слоёв нервных клеток. В нервных клетках сетчатки, называемых *палочки* и *колбочки*, свет вызывает раздражения, превращающиеся в электрические импульсы. Эти импульсы по волокнам зрительного нерва передаются в кору головного мозга, и в результате создаётся зрительное впечатление. Число светочувствительных клеток-палочек в глазу достигает 130 миллионов, колбочек – 7 миллионов. Палочки обладают существенно большей светочувствительностью, чем колбочки. В вечернее время и в сумерках при малом количестве световой энергии, попадающей на сетчатку, «работают» только палочки в «чёрно-белом» варианте, без восприятия цветов. Цвет способны «различать» только колбочки, причём часть из них реагирует преимущественно на красный свет, часть – на зелёный свет и часть – на сине-голубой. Благодаря такому сложному строению сетчатки глаз способен реагировать на световые потоки, различающиеся в 10^{12} (миллион миллионов!) раз – 10^{-17} до 10^{-5} Вт.



10.3. Какое можно предложить физическое толкование русской пословицы «Ночью все лошади вороные»?

Практическая работа «Определение разрешающей способности глаза».

Оборудование: линейка с миллиметровыми делениями, измерительная лента.

Указания к работе:

В каком случае нам удаётся по отдельности различить две близко-расположенные точки некоторого предмета? Для этого необходимо,

чтобы световые лучи от этих точек попадали бы на две разные светочувствительные клетки сетчатки S_1 и S_2 (рис. 97). В противном случае, если световыми лучами возбуждается одна и та же светочувствительная клетка сетчатки, то различить точки предмета не удастся.

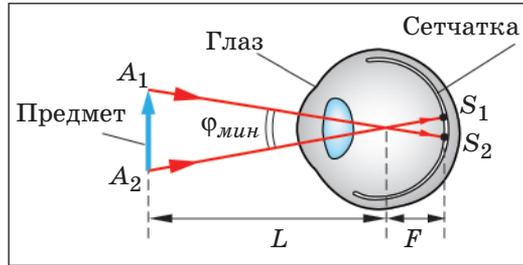


Рис. 97

Разрешающую способность глаза определяют как минимальный угол зрения $\varphi_{\text{мин}}$, под которым две близко расположенные точки ещё видны раздельно. Его принято измерять в угловых минутах.

В радианной мере угол $\varphi_{\text{мин}}$, как видно из рисунка 97, равен

$$\varphi_{\text{мин}} = \frac{A_1 A_2}{L}.$$

Вспомним, что

$$2\pi \text{ рад} = 360^\circ$$

или

$$2\pi \text{ рад} = 360 \cdot 60'.$$

Тогда

$$\varphi_{\text{мин}} = \frac{A_1 A_2}{L} \cdot \frac{360 \cdot 60'}{2\pi}.$$



Задание 1. Закройте левый глаз, а правым глазом наблюдайте штрихи, ограничивающие миллиметровые деления на линейке. Постепенно удаляясь от линейки, определите максимальное расстояние, на котором два соседних штриха, ограничивающих миллиметровое деление линейки, ещё не сливаются в один, а видны раздельно. Определите, какова разрешающая способность левого глаза, рассчитав минимальный угол зрения $\varphi_{\text{мин}}$.

Проделайте аналогичные измерения и определите разрешающую способность правого глаза.

Задание 2. Оцените расстояние между светочувствительными клетками в сетчатке глаза. Фокусное расстояние оптической системы глаза F (рис. 97) равно 17 мм.

Система зрительного восприятия человека помимо очевидных достоинств неизбежно имеет и некоторые недостатки, присущие ей как любой оптической системе ввиду особенностей преломления и распространения световых волн. Например, любая собирающая линза сводит световые лучи, параллельные главной оптической оси, не строго в одной точке фокуса. Лучи, прилегающие к главной оптичес-

кой оси, фокусируются чуть дальше от линзы, а лучи, отстоящие далеко от главной оптической оси, фокусируются чуть ближе к линзе. Световые волны с разной длиной волны различаются показателями преломления, а значит, также неодинаково преломляются в линзе и фокусируются в различных точках.



10.4. Для каких – красных или фиолетовых – лучей показатель преломления стекла больше?

Свет в глаз попадает через зрачок (диаметр зрачка может меняться от 2 до 8 мм). На зрачке глаза, как на всяком отверстии, происходит дифракция световых волн (огибание волнами препятствия). Явление дифракции ограничивает разрешающую способность глаза, и по этой причине нельзя увидеть отдельно две близкорасположенные точки предмета, если угол зрения меньше $1'$.

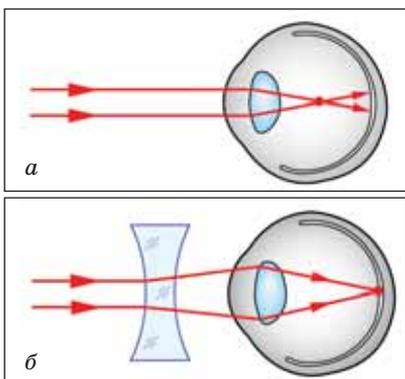


Рис. 98

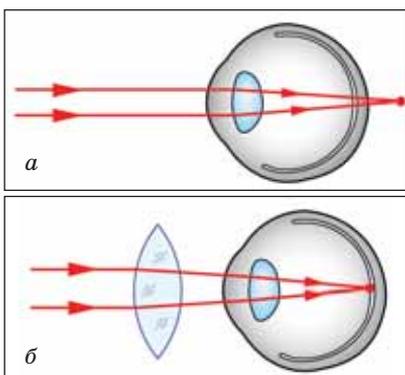


Рис. 99

При близорукости световые лучи «не успевают» сфокусироваться, точка их «схождения» находится за сетчаткой (рис. 99, а). Дальнозоркость исправляют с помощью очков с выпуклыми линзами (рис. 99, б).

Помимо природных недостатков оптической системы глаза, практически не влияющих заметным образом на качество зрения, дефекты зрения могут быть и приобретены человеком. Небрежное отношение к собственному зрению, нарушение правил гигиены зрения (рабочее место с неправильным освещением, слабое или чрезмерно яркое освещение, длительная работа за монитором компьютера, работа с мелкими предметами, чтение без кратковременных периодических перерывов) могут привести к ухудшению зрения.

Чаще всего встречаются такие недостатки зрения, как близорукость и дальнозоркость. При близорукости лучи фокусируются перед сетчаткой глаза (рис. 98, а). Исправляют близорукость, применяя очки с вогнутыми линзами (рис. 98, б).

При дальнозоркости световые лучи «не успевают» сфокусироваться, точка их «схождения» находится за сетчаткой (рис. 99, а). Дальнозоркость исправляют с помощью очков с выпуклыми линзами (рис. 99, б).

Линзы (выпуклые и вогнутые, собирающие и рассеивающие), главная оптическая ось линзы, главный фокус линзы, фокусное расстояние, оптическая сила, $D = \frac{1}{F}$, диоптрия, правило построения изображений, даваемых собирающей и рассеивающей линзами, формула линзы, $\frac{1}{a} + \frac{1}{b} = \frac{1}{F}$, глаз, строение сетчатки глаза (палочки и колбочки), разрешающая способность глаза, близорукость и дальнозоркость, очки.

10.1 ● Определите фокусное расстояние и оптическую силу собирающей линзы, если с её помощью на экране получено изображение предмета, удалённого от экрана на расстояние 160 см, а линза находится от экрана на расстоянии 40 см. Постройте ход лучей в линзе. Во сколько раз изображение предмета меньше самого предмета?

10.2 ● Постройте изображение предмета АВ, даваемого собирающей линзой с фокусным расстоянием F (рис. 100).

10.3 ● На объективе фотоаппарата написано «5,5 – 22». Это означает, что фокусное расстояние объектива может изменяться от 5,5 до 22 мм (четырёхкратный оптический трансфокатор – зум). С какой целью фокусное расстояние объектива сделано переменным?

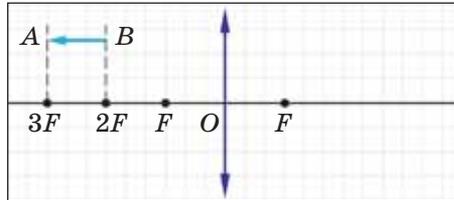


Рис. 100



10.4. Поле зрения человека – это угол максимального видения по вертикали и по горизонтали (рис. 101, а, б).

Измерьте поле зрения по вертикали и по горизонтали для правого и левого глаза. Для этого возьмите рейку длиной 50 см и нанесите три метки – одну в центре рейки и две в крайних точках. Расстояние h между центральной и крайней метками будет равно 25 см. Установите перед правым глазом рейку в вертикальном положении и, приближая её, определите то минимальное расстояние l , на котором ещё видны обе крайние метки. Повторите опыт 3–4 раза и определите среднее значение l .

Рассчитайте поле зрения по вертикали для правого глаза.

Проведите необходимые измерения и определите поле зрения по вертикали для левого глаза. Аналогичным образом определите поле зрения по горизонтали для правого и левого глаза.

Проанализируйте полученные результаты.

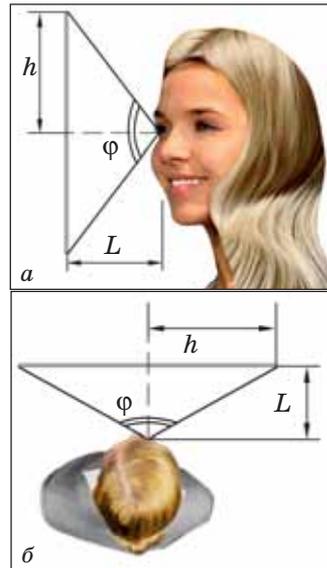


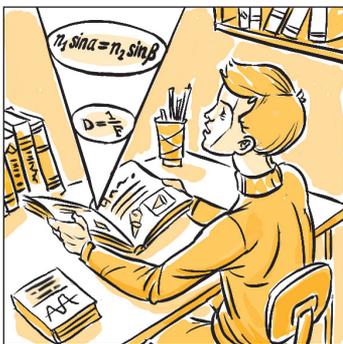
Рис. 101

10.5 ● Докажите, что если с помощью собирающей линзы получают действительное изображение предмета на экране, то расстояние L между предметом и экраном не меньше четырёх фокусных расстояний линзы. (Подсказка. Запишите функцию зависимости расстояния L между предметом и экраном от расстояния между линзой и предметом a :

$$L = f(a)$$

и исследуйте её.)

§ 11. РЕШЕНИЕ РАСЧЁТНЫХ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ЗАДАЧ ПО ТЕМЕ «ГЕОМЕТРИЧЕСКАЯ ОПТИКА»



Лишь первых познаний блеснёт тебе свет,
Узнаешь: предела для знания нет.

Абулькасим Фирдоуси
(около 940–1020 или 1030),
персидский и таджикский поэт

Вам уже известны основные законы геометрической оптики.

Примеры решения задач.

Задача 1. На вертикальной стене висит зеркало. Какова должна быть высота зеркала и на какой высоте оно должно быть закреплено на стене, чтобы человек видел себя в зеркале в полный рост?

Решение:

Пусть OO' – плоское зеркало, AB – человек, а $A'B'$ – его изображение в зеркале (рис. 102). Плоское зеркало даёт мнимое симметрично расположенное изображение. Обсудим, как, к примеру, возникает изображение носка ботинка (точка B на рисунке 102). Лучи, испускаемые этой точкой¹, отражаются от зеркала и достигают глаза человека. Далее мозг человека мысленно продолжает отражённые лучи, и точка пересечения продолженных лучей и есть точка мнимого изображения (точка B' на рисунке 102). Соединим отрезком глаз челове-

¹ Безусловно, носок ботинка (как и любая другая точка поверхности человека) не является самосветящимся источником света. Но любой освещённый участок поверхности в большей или меньшей степени отражает падающий на него свет. Это замечание сразу же позволяет сделать вывод, что же необходимо освещать – зеркало или предмет, который отражается в этом зеркале.

ка (точка A) и мнимое изображение носка ботинка (точка B'). Отрезок AB' пересекает плоскость зеркала в точке O_1 . В этой точке поверхность, отражающая лучи, – зеркало – должна быть! Иначе не будет отражённого луча O_1A и его мысленного продолжения O_1B' .

Итак, нижняя «рабочая точка» зеркала определена, это точка O_1 . Участок зеркала O_1O' не участвует в создании мнимого изображения, и в нём нет необходимости.

Рассуждая аналогичным образом, обосновываем необходимость наличия отражающей поверхности в точке O_2 на высоте, равной росту человека, и то, что часть зеркала OO_2 может быть удалена.

Так как O_2O_1 – средняя линия треугольника $AA'B'$ ($AO_2 = O_2A'$), то высота зеркала O_1O_2 должна быть равна половине роста человека, рассматривающего своё изображение в этом зеркале.

Ответ: высота зеркала должна быть равна половине роста человека, верхний край зеркала должен быть закреплён на уровне глаз человека.

Задача 2. Одним из современных разделов геометрической оптики является так называемая *волоконная оптика*. Основным рабочим элементом волоконной оптики – это *волоконный световод* (рис. 103, а, б).

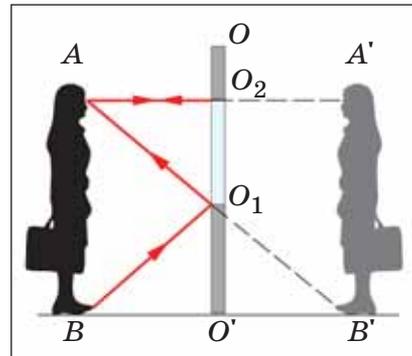


Рис. 102

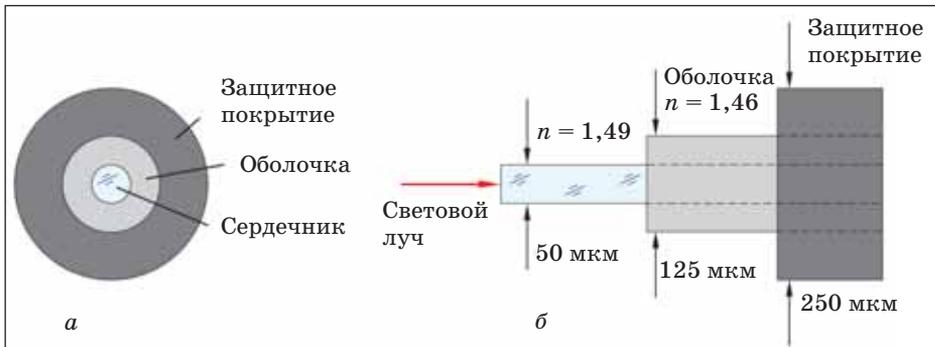


Рис. 103. Устройство простейшего волоконного световода:

а – поперечный разрез;

б – продольный разрез

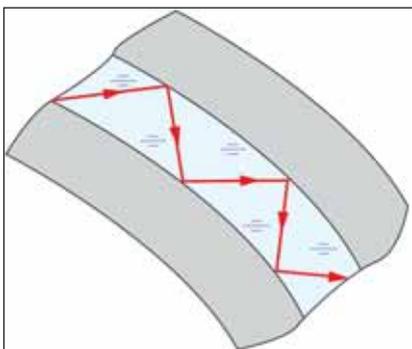


Рис. 104

Абсолютный показатель преломления центральной части световода – сердечника – больше, чем абсолютный показатель преломления его прозрачной оболочки. Поэтому на границе «сердечник – оболочка» происходит явление полного отражения и свет распространяется по волоконному световоду путём многократных отражений (рис. 104).

Устройства волоконной оптики находят самое широкое применение. В медицине, например, их используют для освещения внутренней поверхности желудка при проведении операций или при диагностике. Созданы оптоволоконные системы связи. Они имеют целый ряд преимуществ перед линиями связи на основе медных проводников: менее подвержены помехам, не являются источниками электромагнитного излучения, поддерживают высокие скорости передачи информации. При передаче информации по оптоволоконной системе связи на входе производят модуляцию светового потока – меняют амплитуду, частоту, фазу сигнала либо, включая и выключая, «превращают» набор электрических импульсов в набор световых сигналов, а на выходе – демодулируют светового потока и обратное его превращение в электрический сигнал.

Оцените, каков может быть внешний радиус изгиба сердечника световода R , чтобы свет, вошедший в световод перпендикулярно плоскости его поперечного сечения, распространялся бы, не выходя через боковую поверхность сердечника в оболочку световода (рис. 105).

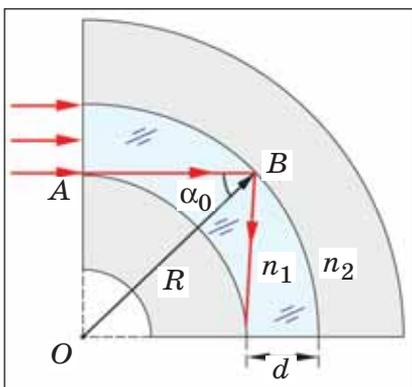


Рис. 105

Решение:

Световод будет нормально функционировать, когда на границе «сердечник – оболочка» происходит явление полного отражения. Полное отражение наблюдается в случае, если угол падения светового луча α больше предельного угла полного отражения α_0 :

$$\alpha > \alpha_0.$$

В соответствии с формулой (9.4)

$$\sin \alpha_0 = \frac{n_2}{n_1}. \quad (11.1)$$

С другой стороны, из треугольника OAB (рис. 105)

$$\sin \alpha_0 = \frac{OA}{OB},$$

или

$$\sin \alpha_0 = \frac{R-d}{R}, \quad (11.2)$$

где d – диаметр сердечника световода.

Из соотношений (11.1) и (11.2) имеем

$$\frac{R-d}{R} = \frac{n_2}{n_1}.$$

Отсюда

$$R = \frac{n_1}{n_1 - n_2} \cdot d,$$

$$R = \frac{1,49 \cdot 50 \cdot 10^{-6} \text{ м}}{1,49 - 1,46},$$

$$R = 2,5 \text{ мм.}$$

Ответ: $R = 2,5$ мм.

Задача 3. Дайте физическое толкование русской поговорки «Не зная броду не суйся в воду».

Решение:

Пусть наблюдатель рассматривает предмет S , находящийся на дне водоёма, глядя на поверхность воды вертикально вниз (рис. 106). Построим ход лучей, «испускаемых» предметом (точнее, отражаемых предметом). Луч 1 направлен вертикально вверх, перпендикулярно поверхности воды. Этот луч не испытывает преломления на границе «вода – воздух». Луч 2 направлен под малым углом падения α . Этот луч преломляется, причём при переходе света из оптически более плотной среды (воды) в оптически менее плотную (воздух) угол преломления β будет больше угла падения α .

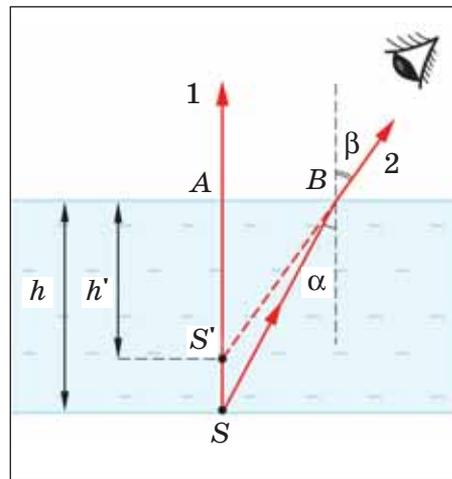


Рис. 106

$$\beta > \alpha.$$

Лучи 1 и 2 являются расходящимися. Как и в случае зеркала или рассеивающей линзы, мозг человека мысленно продолжает лучи 1 и 2, и наблюдателю кажется, что световые лучи исходят из точки S' – мнимого изображения предмета S .

Рассматривая мнимое изображение предмета S' , необходимо будет считать, что кажущаяся ему глубина водоёма h' меньше, чем глубина h .

$$h' < h.$$

Об этом как раз и предупреждает поговорка – не следует доверять зрительным ощущениям, не зная истинной глубины водоёма.

Определим, во сколько раз кажущаяся глубина водоёма h' меньше истинной глубины водоёма h .

Рассмотрим треугольник ASB . Не составляет труда доказать, что угол ASB равен углу падения α луча 2. Тогда

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{AB}{AS}$$

или

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{AB}{h}. \quad (11.3)$$

Рассмотрим треугольник $AS'B$. В этом треугольнике угол $AS'B$ равен углу преломления β луча 2. Тогда

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{AB}{AS'},$$

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{AB}{h'}. \quad (11.4)$$

Из соотношений (11.3) и (11.4) имеем

$$\frac{\operatorname{tg} \alpha}{\operatorname{tg} \beta} = \frac{h'}{h}. \quad (11.5)$$

Известно, что значение тангенса малого угла практически равно значению синуса малого угла (проверьте это, используя калькулятор, вычислив значения синуса и тангенса углов $5 - 10^\circ$). Так как углы α и β малы, то

$$\operatorname{tg} \alpha \approx \sin \alpha,$$

$$\operatorname{tg} \beta \approx \sin \beta.$$

Следовательно, выражение (11.5) можно записать в виде

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{h'}{h}. \quad (11.6)$$

В соответствии с законом преломления

$$n_{\text{вод}} \sin \alpha = n_{\text{возд}} \sin \beta,$$

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{n_{\text{возд}}}{n_{\text{вод}}}.$$
(11.7)

Из соотношений (11.6) и (11.7) окончательно имеем

$$\frac{h'}{h} = \frac{n_{\text{возд}}}{n_{\text{вод}}}.$$

$$\frac{h'}{h} = \frac{1,000292}{1,333} = 0,75.$$

Таким образом, кажущаяся глубина составляет только 75% от истинной глубины водоёма.

Ответ: из-за преломления света кажущаяся глубина водоёма меньше истинной.

Задача 4. Имеются две собирающие линзы, оптические силы которых равны D_1 и D_2 соответственно. Чему равна оптическая сила объектива, состоящего из двух таких, поставленных вплотную, линз?

Решение:

Пусть в объективе слева находится линза с оптической силой D_1 , а справа – с оптической силой D_2 (рис. 107).

Поместим источник света S в фокусе левой линзы. Эти лучи, преломившись в левой линзе, образуют параллельный пучок лучей.

Параллельный пучок лучей, падающий на правую линзу, после преломления соберётся в фокусе этой линзы (точка S' на рисунке 107).

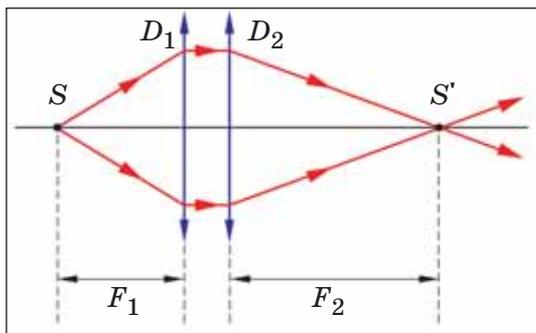


Рис. 107

В соответствии с формулой линзы

$$\frac{1}{F_1} + \frac{1}{F_2} = D,$$
(11.8)

где F_1 – фокусное расстояние левой линзы;

F_2 – фокусное расстояние правой линзы;

D – оптическая сила системы двух линз.

Вариант 2.

Запишем формулу линзы для случая, когда человек читает книгу без очков, держа её на расстоянии a .

$$\frac{1}{a} + \frac{1}{b} = D_{\text{гл}}, \quad (11.9)$$

где b – расстояние от центра оптической системы глаза до сетчатки;

$D_{\text{гл}}$ – оптическая сила глаза.

Вооружившись очками, человек читает книгу с расстояния наилучшего зрения a_0 .

Тогда

$$\frac{1}{a_0} + \frac{1}{b} = D_{\text{оч}} + D_{\text{гл}}. \quad (11.10)$$

При этом мы считаем оптическую силу системы «очки и глаз» равной сумме оптических сил линз очков и глаза.

Вычтя из уравнения (11.10) уравнение (11.9), имеем

$$D_{\text{оч}} = \frac{1}{a_0} - \frac{1}{a}.$$

Ответ: $D_{\text{оч}} = -1$ дп.

Лабораторная работа «Определение фокусного расстояния и оптической силы собирающей линзы».

Оборудование: источник тока, низковольтная лампа на подставке, ключ, экран, собирающая линза, измерительная лента.

 **Задание 1.** Подключите лампу к источнику света. Лампу, собирающую линзу и экран расположите на одной прямой; добейтесь чёткого изображения лампы на экране. Измерьте расстояние от линзы до лампы a , от линзы до экрана b .

Вычислите фокусное расстояние F и оптическую силу D собирающей линзы.

Вычислите относительную погрешность измерения фокусного расстояния ε_F по формуле

$$\varepsilon_F = \varepsilon_a + \varepsilon_b,$$

где ε_a – относительная погрешность измерения расстояния a ,

$$\varepsilon_a = \frac{\Delta a}{a};$$

ε_b – относительная погрешность измерения расстояния b ,

$$\varepsilon_b = \frac{\Delta b}{b}.$$

Абсолютную погрешность измерений расстояний Δa и Δb примите равной 1 см.

Вычислите абсолютную погрешность измерения фокусного расстояния ΔF . По определению,

$$\varepsilon_F = \frac{\Delta F}{F}.$$

Тогда

$$\Delta F = \varepsilon_F \cdot F.$$

Расчёт абсолютной погрешности измерений позволяет записать значение фокусного расстояния линзы $F_{\text{линз}}$ с учётом границ интервала, в котором это значение может находиться:

$$F_{\text{линз}} = F \pm \Delta F.$$

Вычислите оптическую силу линзы D .

$$D = \frac{1}{F}.$$

Вычислите абсолютную погрешность измерения оптической силы ΔD и запишите значение оптической силы с учётом границ интервала, в котором это значение может находиться:

$$D_{\text{линз}} = D \pm \Delta D.$$

При проведении вычислений учтите, что

$$\varepsilon_D = \varepsilon_F.$$



Задание 2. Установите лампу на расстоянии от линзы, равном удвоенному фокусному расстоянию:

$$a = 2F.$$

Постройте изображение предмета, даваемое линзой в этом случае, выполнив чертёж и указав на нём ход лучей. Выясните, на каком расстоянии от линзы находится изображение. Докажите, что размер изображения равен размеру предмета.

Установите экран на расстоянии от линзы, равном удвоенному фокусному расстоянию:

$$b = 2F.$$

Убедитесь, что на экране наблюдается чёткое изображение лампы в натуральную величину.

Сделайте вывод, верно ли вами измерено фокусное расстояние собирающей линзы.



Задание 3. Установите лампу и экран на расстоянии друг от друга L , большем четырёх фокусных расстояний линзы.

$$L > 4F.$$

Перемещая линзу между лампой и экраном, добейтесь получения на экране уменьшенного изображения лампы (рис. 109, а). При этом расстояние между лампой и экраном, очевидно, равно

$$L = a + b. \quad (11.11)$$

Не меняя расстояние между лампой и экраном, передвиньте линзу так, чтобы получить на экране увеличенное изображение лампы (рис. 109, б).

Запишите формулу линзы для случая, когда на экране было получено уменьшенное изображение (рис. 109, а):

$$\frac{1}{a} + \frac{1}{b} = \frac{1}{F}. \quad (11.12)$$

Запишите формулу линзы для случая, когда на экране было получено увеличенное изображение (рис. 109, б):

$$\frac{1}{a'} + \frac{1}{b'} = \frac{1}{F}. \quad (11.13)$$

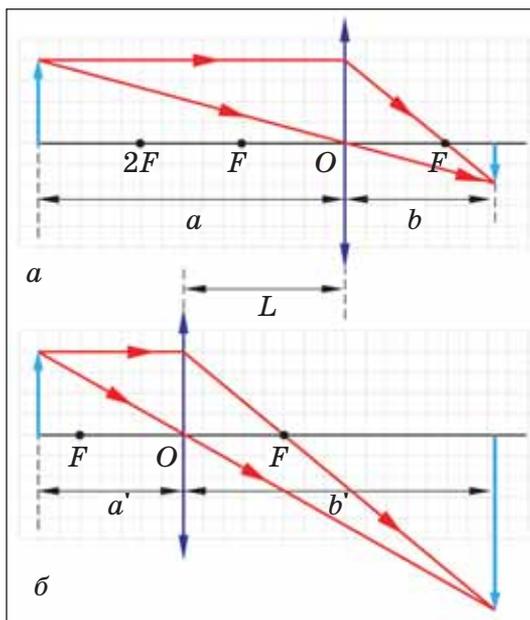


Рис. 109

При неизменном расстоянии между лампой и экраном формулы (11.12) и (11.13) выполняются, если расстояния «поменять местами»:

$$\begin{aligned} a' &= b, \\ b' &= a. \end{aligned}$$

Пусть при проведении опыта линзу передвинули на расстояние l . Тогда

$$l = a - b. \quad (11.14)$$

Измерьте расстояние L между лампой и экраном. Измерьте расстояние l , на которое необходимо было передвинуть лампу, чтобы взамен уменьшенного изображения получить на экране увеличенное изображение лампы.

Используя соотношения (11.11), (11.12) и (11.14), вычислите фокусное расстояние линзы. Сравните результат с тем, что был получен ранее при выполнении задания 1 лабораторной работы.

Волоконная оптика, волоконный световод, оптическая сила системы двух близкорасположенных линз равна сумме оптических сил линз, составляющих систему: $D = D_1 + D_2$, **расстояние наилучшего зрения – 25 см.**

11.1 ● Аквалангист видит Солнце под углом 60° к поверхности воды. Какова настоящая высота Солнца над горизонтом? (Примечание. Высота Солнца над горизонтом равна значению угла, который составляют солнечные лучи с поверхностью земли.)

11.2 ● На каком расстоянии от линзы следует поставить экран, чтобы на нём было отчётливо видно изображение пламени свечи, находящейся от линзы на расстоянии 60 см? Фокусное расстояние линзы 12 см.

11.3 ● Почему звёзды мерцают?

11.4 ● На рисунке 110, а, б изображено устройство призмного бинокля и ход лучей через его оптическую систему. Какое физическое явление обуславливает применение призм в бинокле? Почему бинокль в отличие от линзы даёт не перевернутое, а прямое изображение?

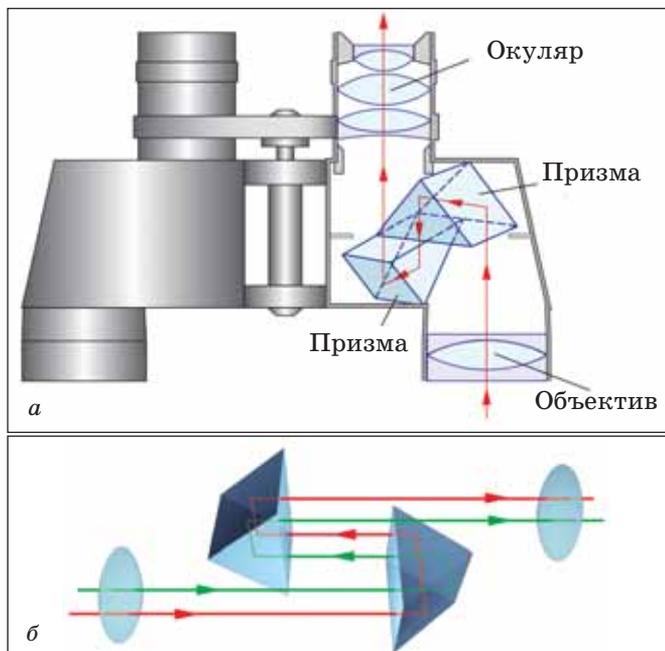


Рис. 110

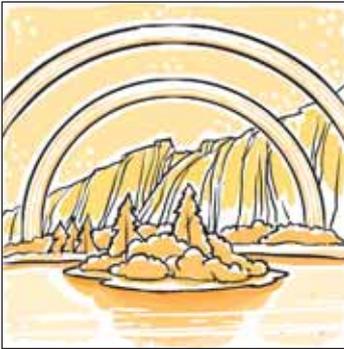


11.5. Пожилой человек читает газету, держа её на расстоянии 40 см от глаз. Очки с какой оптической силой ему следует носить? Если вы или ваши близкие пользуетесь очками, то определите, какова их оптическая сила. Сравните полученное значение с тем, которое было указано при изготовлении очков.

§ 12. ДИСПЕРСИЯ СВЕТА

Солнечный свет состоит из лучей различной преломляемости.

*Из труда Исаака Ньютона
«Оптика, или Трактат об отражениях,
преломлениях, изгибаниях и цветах света»*



Вам уже известно, что явление преломления света обусловлено неодинаковостью скорости света в различных средах.

Явление дисперсии света. Явление дисперсии света было открыто и всесторонне экспериментально исследовано великим английским учёным Исааком Ньютоном (1643–1727). Ньютон направил узкий пучок солнечного света на стеклянную призму (рис. 111). Свет, преломившись в призме, расщепился на отдельные компоненты – образовался *спектр*. В этом спектре, как известно, выделяют следующие цвета: красный, оранжевый, жёлтый, зелёный, голубой, синий, фиолетовый.

Проведя целый ряд экспериментов, Ньютон убедительно установил следующие научные факты:

– Белый свет имеет сложную структуру.

– Если с помощью линзы или других призм собрать все лучи спектра в одну область на экране, то вновь получится белый свет.

– Если какой-нибудь из лучей спектра направить на следующую призму, то очередной спектр не возникает – по-прежнему будем иметь луч одного цвета. Проведя подобные опыты, Ньютон писал: «Примечательно, кроме того, то, что цвет однородного света никогда не менялся при преломлении ... Лучи, отличающиеся по цвету, отличаются и по степеням преломления».

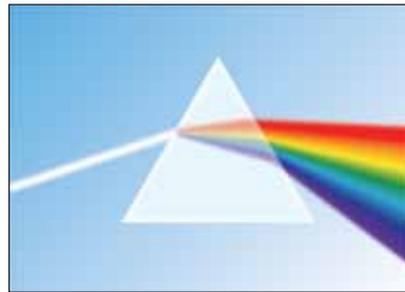


Рис. 111



12.1. У какого из лучей – красного или фиолетового – «степень преломления» или, используя современную научную терминологию, показатель преломления больше?

Зависимость преломления световых лучей от их цвета, обнаруженная Ньютоном, получила название *дисперсия* (от латинского *dispersio* – рассеяние).

Открытие Ньютоном явления дисперсии позволило ему объяснить возникновение цветов¹ окружающих тел. При падении белого света на поверхность какого-нибудь тела часть лучей может поглощаться, а часть – отражаться. По этой причине мы и воспринимаем поверхность как имеющую некоторый цвет. Если свет попадает в глаз человека от самосветящегося источника света, то его цвет также определяется тем, какие именно световые лучи излучаются источником света. Светофильтры, пропускающие только часть лучей, входящих в состав белого, также будут восприниматься как обладающие определённым цветом.



12.2. Каким цветом будет восприниматься красный сигнал светофора, если смотреть на него через зелёный светофильтр?

Ньютон писал, что «если бы солнечный свет состоял из одного сорта лучей, во всём мире был бы только один цвет, и нельзя было бы получить какой-нибудь новый цвет посредством отражений или преломлений; следовательно, разнообразие цветов зависит от сложности света».

Следует отметить, что если мы и говорим о световых лучах как об окрашенных, как об имеющих определённый цвет (красные лучи, зелёные лучи и так далее), то подобные высказывания не следует понимать дословно. «Ибо лучи, если выражаться точно, не окрашены. В них нет ничего другого, кроме определённой силы или predispositiona к возбуждению того или иного цвета» при воздействии на орган зрения человека, а значит, и на его мозг.

Но чем именно характеризуется «определённая сила», predispositiona к возбуждению того или иного цвета? Чем отличается один «сорт» световых лучей от другого? Почему наблюдается явление дисперсии? Во времена Ньютона ответов на эти вопросы не было. Они были получены значительно позже после создания Максвеллом (1831–1879) теории электромагнитного поля и установления электромагнитной природы света. Впервые теоретическое объяснение явления дисперсии получило в трудах нидерландского физика-теоретика Хендрика Антона Лоренца (1853–1928).

¹ Цвет – одно из свойств тел, воспринимаемое как осознанное зрительное ощущение.

Основная идея теоретического объяснения явления дисперсии заключается в следующем. Свет – электромагнитная волна и при её взаимодействии с веществом переменное электрическое поле волны приводит в вынужденное колебательное движение электроны вещества. Колеблющиеся электроны излучают электромагнитные волны. В результате в веществе распространяется электромагнитная волна, являющаяся суммой исходной электромагнитной волны и волн, излучаемых электронами вещества. Но амплитуда вынужденных колебаний электронов вещества, а значит, и амплитуда излучаемых ими волн зависит от частоты «вынуждающей силы» – от частоты электромагнитного излучения, воздействующего на вещество.

Следовательно, «успешность» распространения электромагнитной волны в веществе – скорость распространения волны в веществе, её амплитуда – зависит от частоты падающей на вещество электромагнитной волны. Вспомним, что абсолютный показатель преломления вещества n зависит от скорости света в веществе v :

$$n = \frac{c}{v},$$

где c – скорость света в вакууме.

Так как скорость света в веществе, как мы выяснили, зависит от частоты света, то можно определить явление дисперсии следующим образом:

Дисперсия света – зависимость абсолютного показателя преломления прозрачного для света вещества от частоты света.



12.3. Увеличится или уменьшится абсолютный показатель преломления стекла при увеличении частоты света?

Таким образом, призма разлагает белый свет в спектр на отдельные компоненты определённой частоты. Электромагнитное излучение (свет) одной определённой частоты называют **монохроматическим излучением**. Происхождение термина «монохроматическое излучение» (от греческого *mónos* – один и *chróma* – цвет) обусловлено тем, что различие в частоте световых волн воспринимается человеком как различие в цвете.

Радуга. Одним из самых замечательных (и заметных) проявлений дисперсии света является *радуга*. Радуга видна, когда наблюдатель рассматривает завесу дождя, освещаемую солнцем, находящимся *за спиной наблюдателя*. Радугу образуют световые лучи, испытавшие два преломления и одно отражение в капле воды (рис. 112).

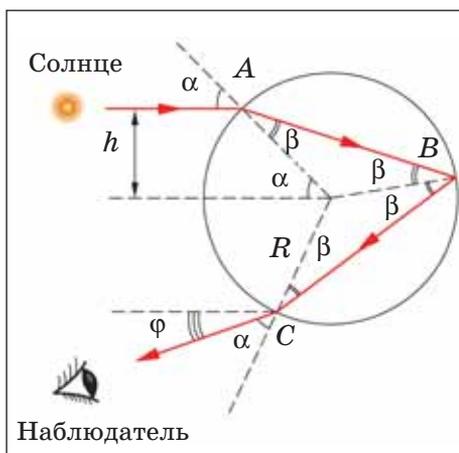


Рис. 112. Ход светового луча в капле воды: α – угол падения (зависит от того, на каком «прицельном» расстоянии от линии, проходящей через центр капли и параллельной падающему лучу, находится падающий луч. $0 \leq h \leq R$, где R – радиус капли); β – угол преломления в точке A (зависит от угла падения α и показателя преломления света n для данного светового луча); φ – угол «возврата» луча (зависит от угла падения и преломления).

Примечание. На рисунке 112 не указаны луч, отражённый в точке A ; луч, преломлённый в точке B ; луч, отражённый в точке C . Эти лучи не участвуют в образовании радуги

Световые лучи после двух преломлений (точка A и точка C на рисунке 112) «возвращаются» к наблюдателю под разными углами φ . Но оказывается, *большая часть лучей возвращается к наблюдателю под углами, близкими к максимально возможному «углу возврата» φ , значение которого зависит от показателя преломления.*

На рисунке 113 показан в качестве примера ход красных и фиолетовых лучей. Большинство красных световых лучей (абсолютный показатель преломления $n = 1,331$) возвращаются под углом $\varphi = 42^\circ 22'$. Большинство фиолетовых световых лучей (абсолютный показатель преломления $n = 1,344$) возвращаются под углом $\varphi = 40^\circ 36'$.

В итоге для наблюдателя (точка O на рисунке 114) радуга представляет собой окружность конуса с осью OO' , частично находящейся выше горизонта.

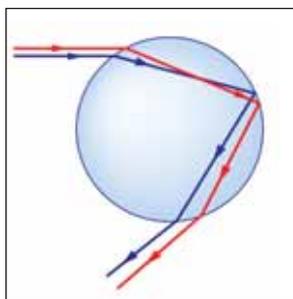


Рис. 113

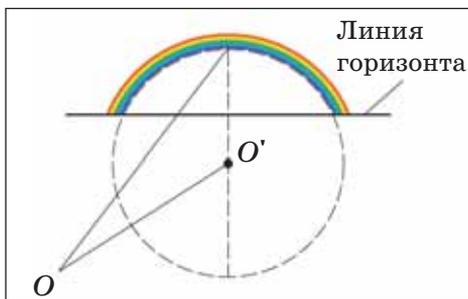


Рис. 114

Красные лучи приходят к наблюдателю под бóльшим углом и поэтому внешний край радуги имеет красный цвет. Фиолетовые лучи приходят под меньшим углом, и внутренний (ближний к земле) край радуги имеет фиолетовый цвет. Между ними в обычном порядке располагаются все остальные цвета: оранжевый, жёлтый, зелёный, голубой, синий.



Рассеяние света. В прозрачной однородной среде, как известно, свет распространяется прямолинейно. Иным образом обстоит дело, если однородность среды нарушена. Пусть, например, в воздухе содержится множество частичек пыли или имеется туман (мельчайшие капельки воды), дым; в жидкости может быть растворена краска и так далее. В таком случае в мутной среде свет распространяется не только в прямом случае, но и *рассеивается в стороны*. С точки зрения электромагнитной теории света это объясняется тем, что неоднородности среды являются дополнительными источниками электромагнитного излучения.

Рассмотрим следующий опыт. Наполним аквариум водой и добавим в воду немного молока. Частицы жира, имеющиеся в молоке, не растворяются в воде и способствуют рассеянию света. Направим на боковую стенку аквариума узкий пучок белого света (рис. 115). Мы увидим, что рассеянный свет имеет голубоватый оттенок. В то же время свет, прошедший через мутную воду, падая на противоположную боковую стенку аквариума, имеет красноватый оттенок.



Рис. 115



12.4. Какой свет в видимом диапазоне – фиолетовый или красный – имеет бóльшую частоту излучения?

Теоретический анализ процесса рассеяния света, проведённый на основе теории электромагнетизма Максвелла, привёл учёных к выводу, что интенсивность рассеяния света определяется его частотой. *Чем больше частота света, тем сильнее рассеивается свет.*



12.5. Подтверждают ли результаты опыта (рис. 115) теоретический вывод, связанный с рассеянием света?

Явление рассеяния объясняет, почему небо имеет голубой свет, почему Солнце в зените кажется нам жёлтым, а при восходе и закате – красным. При прохождении солнечного света через атмосферу

Земли существенная доля света рассеивается в стороны. Причём сильнее всего рассеивается высокочастотное излучение (фиолетовая, синяя части спектра). Этим и объясняется синий цвет неба. Глаза же земного наблюдателя достигает оставшийся свет, то есть преимущественно красные, оранжевые, жёлтые лучи. Поэтому-то Солнце, находясь в зените, и воспринимается как жёлтое. При восходе и закате Солнца прямой солнечный свет, проходя через большую толщину атмосферного воздуха, рассеивается ещё в большей степени. По этой причине при восходе и закате Солнце красное.

Изучая процесс рассеяния света в атмосфере, учёные установили, что рассеяние света происходит даже и тогда, когда воздух чист (например, в высокогорных районах). За счёт беспорядочного теплового движения молекул плотность воздуха в его отдельных местах объёма беспрепятственно отклоняется от среднего значения. Эти-то малые области неоднородности воздуха и приводят к рассеиванию света.

Опыт Ньютона по дисперсии света, спектр, объяснение возникновения цветовых ощущений, дисперсия света с точки зрения электромагнитной природы света, монохроматическое излучение, радуга, рассеяние света, объяснение наблюдаемого цвета неба и Солнца.

12.1 ● Узкий пучок белого света падает на дисперсионную стеклянную призму так, что угол падения света на грань призмы составляет 20° . Чему равен угол между красным и фиолетовым лучом после преломления света на этой грани? Абсолютный показатель преломления стекла для красного света составляет 1,54, для фиолетового – 1,56.

12.2 ● Ньютон один из проведённых им оптических опытов описывает следующим образом: «На ...кусок бумаги, две половины которого были окрашены в красный и синий цвет... я намотал несколько раз тонкую нить очень чёрного шёлка таким образом, что несколько витков на окрашенной бумаге казались рядом чёрных линий, нанесённых на бумагу... Я мог бы начертить чёрные линии пером, но нитки были более тонкими и отчётливыми... Вблизи бумаги, около раздела красок, внизу я поместил свечу для сильного освещения бумаги, так как опыт производился ночью... Далее... я поставил стеклянную линзу..., собирающую лучи... и заставляющую их сходиться... белую бумагу... я передвинул несколько раз то по направлению к линзе, то от неё, для того, чтобы найти те места, где изображения синей и красной частей окрашенной бумаги кажутся наиболее отчётливыми. Я легко узнавал эти места по изображениям чёрных линий, полученных при помощи шёлка, намотанного на бумагу». В результате проведения опыта Ньютон установил, что «расстояние белой бумаги от линзы в случае отчётливого изображения красной половины окрашенной бумаги было на один дюйм с половиной больше, чем расстояние той же белой бумаги от линзы, когда изображение синей половины казалось наиболее отчётливым». Как объяснить результаты этого опыта?

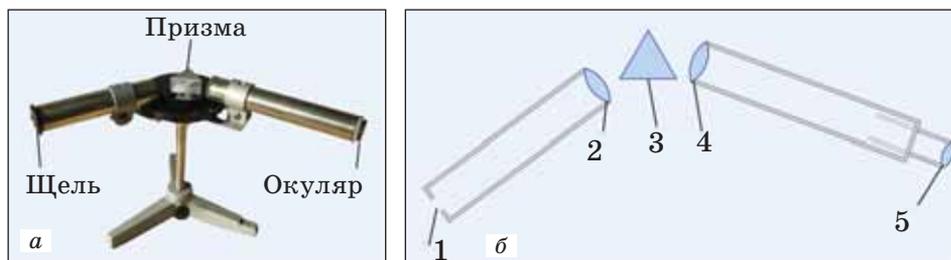


Рис. 116

12.3 При изучении спектров в диапазоне видимого излучения в недалёком прошлом часто использовался призмный спектроскоп (рис. 116, а). Оптическая схема прибора изображена на рисунке 116, б. Поясните устройство и принцип действия прибора, ответив на следующие вопросы:

1. Почему световое излучение направляется в прибор через узкую щель 1?
2. С какой целью собирающая линза 2 расположена так, что щель 1 находится в фокусе линзы?
3. Какова роль призмы 3 в приборе?
4. Объектив 4 и окуляр 5 являются простейшей зрительной трубкой. С какой целью окуляр 5 сделан подвижным?

§ 13. ПОЛЯРИЗАЦИЯ СВЕТА



Нет ли других изначальных свойств у лучей света кроме тех, которые уже описаны?.. Остаётся исследовать, нет ли ещё свойств света, по отношению к которым отличались бы стороны луча и различались бы одна от другой.

*Из труда Исаака Ньютона
«Оптика, или Трактат об отражениях,
преломлениях, изгибаниях и цветах света»*

Вам уже известно, что поперечные волны обладают характеристикой, присущей только этому типу волн.

В настоящее время, когда установлена электромагнитная природа света, ответ на вопрос «К какому типу волн – продольным или поперечным – относятся световые волны?» не вызывает затруднения. Свет – это электромагнитные волны с длиной волны от 0,40 до 0,76 мкм, они являются поперечными волнами.

Для поперечных электромагнитных волн всегда можно установить плоскость, в которой происходят колебания вектора напряжённости электрического поля \vec{E} , и перпендикулярную ей плоскость, в которой происходят колебания вектора магнитной индукции \vec{B} магнитного поля. Так, например, на опыте (рис. 69, а, б) нам удалось установить плоскость колебаний вектора напряжённости \vec{E} электрического поля для электромагнитных волн радиодиапазона. В случае световых волн доказательство их поперечности связано с некоторыми трудностями. Дело в том, что источником светового излучения, как правило, является

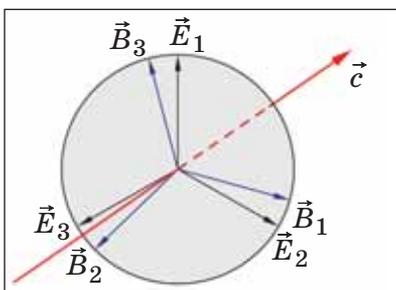


Рис. 117. Модель естественного света

нагретое тело (спираль лампы накаливания, электрическая дуга, Солнце), которые состоят из огромного числа атомов. Каждым атомом свет излучается в «индивидуальном порядке», независимо от других атомов нагретого тела. Поэтому колебания векторов напряжённости \vec{E} и магнитной индукции \vec{B} происходят во всевозможных плоскостях (рис. 117). Такое световое излучение называют *естественным светом*.

Как вам известно, одним из характерных свойств кристаллов является их анизотропия – зависимость физических свойств кристалла от направления. Среди различных видов кристаллов имеются кристаллы, обладающие анизотропией пропускной способности по отношению к свету. Такие кристаллы пропускают только те световые волны, в которых вектор напряжённости \vec{E} электрического поля и вектор магнитной индукции \vec{B} магнитного поля совершают колебания в строго определённой плоскости. Примером такого вида кристаллов является турмалин. Вещества, обладающие свойством «одноплоскостного пропускания» света, называют *поляроидами*.

На практике чаще всего применяют поляроиды на сильно растянутых в одном направлении полимерных плёнках. Ориентированные растяжением молекулярные цепи полимера образуют упорядоченную анизотропную структуру молекул, пропускающих свет со строго определённой плоскостью колебаний векторов напряжённости \vec{E} и магнитной индукции \vec{B} .

Направим пучок естественного света на поляроид (рис. 118). Поляроид выделит из естественного света свет с одной плоскостью колебаний вектора напряжённости \vec{E} и вектора магнитной индукции \vec{B} .

Свет с определённой плоскостью колебаний вектора напряжённости электрического поля и вектора магнитной индукции \vec{B} магнитного поля называют *поляризованным светом*.

Человеческий глаз весьма чувствителен к изменению интенсивности света («яркость» света), длины волны света («окраска» света), но практически не реагирует на изменение поляризации света. Глаз не отличает естественный свет от поляризованного («поляризационная слепота» зрения). Для того чтобы убедиться, что после прохождения через поляроид свет действительно поляризован, воспользуемся вторым поляроидом (рис. 119, а – в).

Если плоскость колебаний вектора напряжённости \vec{E} электрического поля световой волны совпадает с «пропускной плоскостью» поляроида, то поляризованный свет практически полностью проходит через поляроид (рис. 119, а).

Повернём поляроид так, чтобы его «пропускная плоскость» составляла некоторый угол с плоскостью колебаний вектора напряжённости электрического поля световой волны (рис. 119, б). При этом поляризованный свет частично проходит через поляроид, а частично поглощается им. Что произойдёт, если поляроид повернуть на 90° так, чтобы его «пропускная плоскость» была перпендикулярна плоскости колебаний вектора напряжённости \vec{E} ? В этом случае поляризованный свет не проходит через поляроид и полностью поглощается им (рис. 119, в).

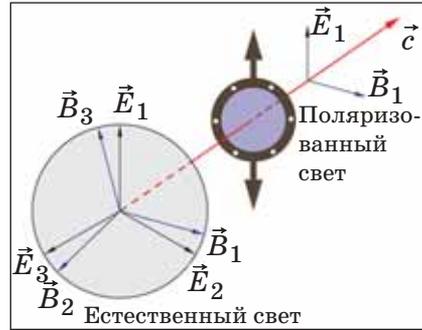


Рис. 118

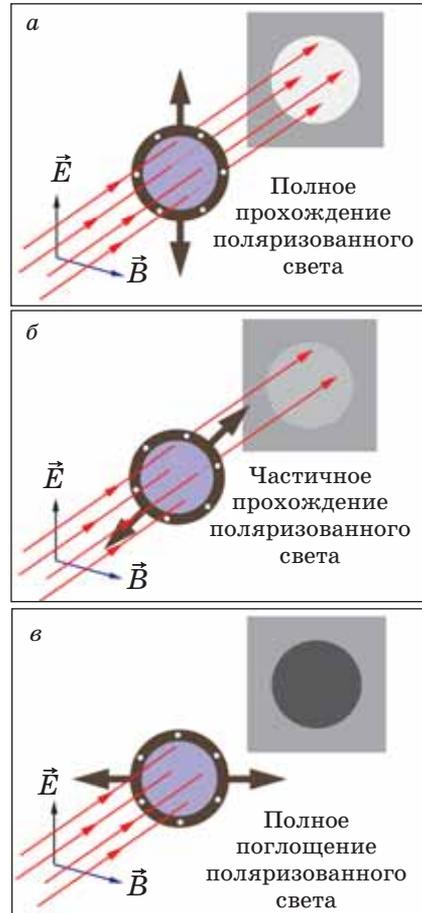


Рис. 119

Опыты, проведённые с поляроидами (рис. 119, *a – в*), полностью подтверждают поперечность световых волн. Если бы световые волны были продольными и колебания вектора напряжённости \vec{E} электрического поля (и вектора магнитной индукции \vec{B} магнитного поля) проходили бы вдоль направления распространения волны, то поворот поляроида не влиял бы на прохождение света через поляроид.



13.1. Чем поляризованный свет отличается от естественного света?



13.2. Какие принципиальные экспериментальные затруднения необходимо преодолеть при доказательстве поперечности световых волн?

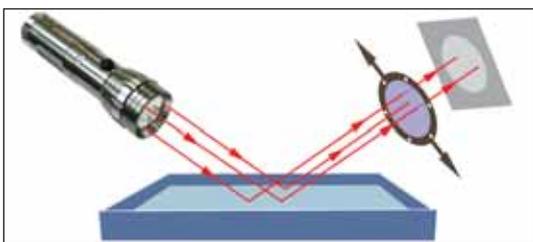


Рис. 120

Поляризация света происходит не только при прохождении света через поляроиды. При отражении, преломлении, рассеянии света он в зависимости от условий, при которых происходит отражение, преломление или рассеяние, частично или практически полностью *поляризуется*. Например, направим свет от осветителя на поверхность воды и получим на потолке или экране «зайчик» при отражении света от поверхности воды (рис. 120). Поместим на пути отражённого пучка света поляроид и будем его медленно поворачивать. По затемнению и просветлению светового «зайчика» легко убедиться в поляризации света, отражённого от поверхности воды.

Естественный свет, поляроиды, поляризованный свет, поперечность световых волн, поляризация света при его отражении, преломлении, рассеянии.

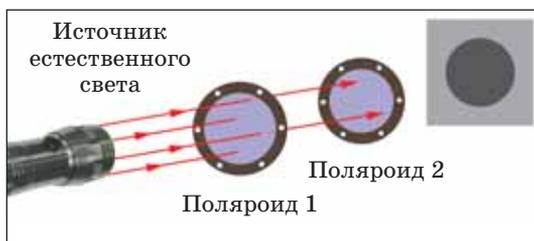


Рис. 121

13.1 ● Естественный свет попадает на два поляроида, которые повернуты относительно друг друга так, что на экране за поляроидами наблюдается тёмное неосвещённое пятно (рис. 121). Какой из поляроидов – 1 или 2 – необходимо повернуть и на какой угол, чтобы на экране за поляроидами наблюдалось максимально освещённое пятно?

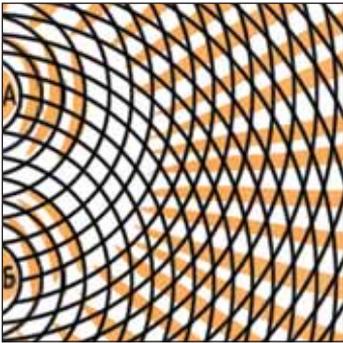


13.2. Каков принцип действия поляризационных очков? поляризационных фильтров фотоаппаратов?



13.3. На опыте установлено, что растворы некоторых так называемых оптически активных веществ обладают свойством поворачивать плоскость поляризации поляризованного света при его прохождении через такие растворы. Опишите примеры практического применения данного явления.

§ 14. ИНТЕРФЕРЕНЦИЯ СВЕТА



Тот факт, что эти явления в течение более чем двадцати веков ежечасно представлялись взорам физиков, не останавливая их внимания, можно объяснить лишь скупостью природы, немногих наделяющей драгоценной способностью изумляться.

Ф. Араго¹. Из истории физики. Томас Юнг. Биография, читанная на публичном заседании Академии наук 26 ноября 1832 г.

Вам уже известно, что явление интерференции – это визитная карточка волнового процесса.

Опыт Юнга. *Явление интерференции*, как вам известно, заключается в установлении в каждой точке пространства неизменной амплитуды результирующего колебания при наложении волн. Интерферировать могут только *когерентные волны* – волны одинаковой частоты с постоянной разностью фаз колебаний.



14.1. Какова должна быть разность хода двух когерентных волн, чтобы при их наложении наблюдался интерференционный максимум?



14.2. При каком условии при наложении двух когерентных волн наблюдается интерференционный минимум?

Классический опыт, позволяющий обнаружить интерференцию света, а значит, и подтверждающий волновую природу света, был проведён в начале XIX века выдающимся английским учёным Томасом Юнгом (1773–1829).

¹ Доминик Франсуа Араго (1786–1853). Французский учёный и политический деятель. Исследовал поляризацию света, открыл намагничивающее действие электрического тока, установил связь полярных сияний с магнитными бурями. Автор трудов по астрономии, истории науки.

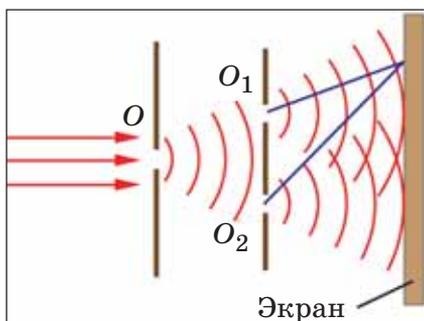


Рис. 122

Солнечный свет, прошедший через малое отверстие O , освещал два небольших отверстия O_1 и O_2 (рис. 122). Световая волна, проходя через отверстие O , испытывает *дифракцию* и достигает и отверстия O_1 , и отверстия O_2 . Волны, исходящие из отверстий O_1 и O_2 , являются когерентными, ведь это части одной и той же световой волны. Волны, испускаемые источниками света – отверстиями O_1 и O_2 , за счёт дифракции идут расширяющимся световым конусом и, накладываясь, интерферируют.



14.3. Интерферировали бы световые волны, если солнечный свет падал бы непосредственно на отверстия O_1 и O_2 (без предварительного прохождения отверстия O)?

В результате на экране Юнг наблюдал чередование светлых (окрашенных) и тёмных полос – интерференционные максимумы и минимумы. Ему удалось определить длину волны красного и фиолетового света.



Покажем, как можно провести подобный расчёт длины волны света. Пусть отверстия – источники O_1 и O_2 , излучающие свет длиной волны λ , находятся на расстоянии d друг от друга, а расстояние от источников до экрана составляет L (рис. 123).

В центре экрана (точка O'), очевидно, будет наблюдаться интерференционный максимум (светлая полоса), так как

$$O_1O' = O_2O'$$

и разность хода световых волн от источников O_1 и O_2 равна нулю.

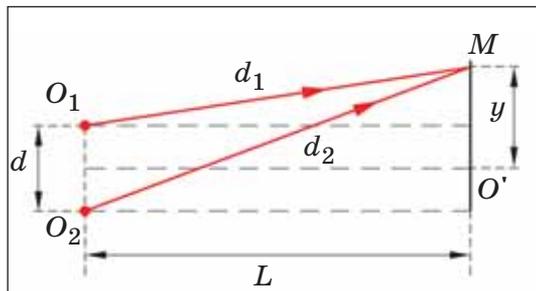


Рис. 123

Пусть на экране в точке M , которая находится на расстоянии y от центра экрана ($O'M = y$), также наблюдается интерференционный максимум. Это возможно, если разность хода волн d_2 и d_1 от источников света O_2 и O_1 будет равна длине волны:

$$d_2 - d_1 = \lambda. \quad (14.1)$$

Выразим ход волны d_2 и ход волны d_1 через известные величины (рис. 123). Используя теорему Пифагора, получим

$$d_2^2 = L^2 + \left(y + \frac{d}{2}\right)^2,$$

$$d_1^2 = L^2 + \left(y - \frac{d}{2}\right)^2.$$

Тогда

$$d_2^2 - d_1^2 = \left(y + \frac{d}{2}\right)^2 - \left(y - \frac{d}{2}\right)^2,$$

$$d_2^2 - d_1^2 = 2yd,$$

$$(d_2 - d_1)(d_2 + d_1) = 2yd.$$

С учётом выражения (14.1) перепишем последнее соотношение в виде

$$\lambda(d_2 + d_1) = 2yd. \quad (14.2)$$

В одном из опытов, проведённых по схеме Юнга, расстояние d между отверстиями O_1 и O_2 составляло 0,5 мм, расстояние $2y$ между первыми максимумами красного цвета было равно 4 мм, а расстояние L от источников света до экрана – 1,5 м. В таком случае

$$d_2 + d_1 \approx 2L,$$

и из соотношения (14.2) получим выражение для расчёта длины волны света.

$$\lambda = \frac{yd}{L}, \quad (14.3)$$

$$\lambda = 6,7 \cdot 10^{-7} \text{ м},$$

$$\lambda = 670 \text{ нм}.$$

Интерференция света в природе и технике. Открытое Юнгом явление интерференции света позволило ему объяснить радужную окраску пятен масла и нефти на воде, крыльев стрекоз, мыльных пузырей и так далее (рис. 124).



Рис. 124

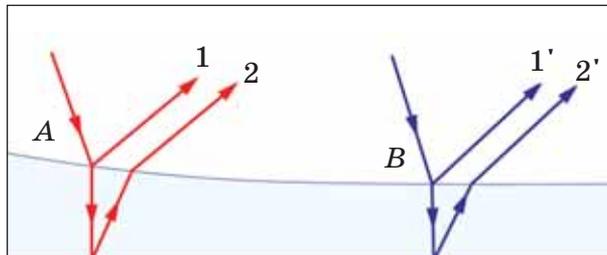


Рис. 125

Пусть, например, свет падает на мыльную плёнку (рис. 125). Свет отражается и от *внешней* и от *внутренней* поверхностей плёнки. Отражённые световые волны (волны 1 и 2, 1' и 2') являются когерентными и интерферируют. Чем определяется разность хода этих волн? Она зависит от толщины плёнки, абсолютного показателя преломления вещества плёнки¹ и угла падения светового луча. В разных точках плёнки эти величины неодинаковы (например, различна толщина плёнки), поэтому условие интерференционного максимума может выполняться для различных длин волн. К примеру, в точке А (рис. 125) происходит усиление красного света, в точке В – фиолетового света и так далее. В итоге при освещении тонкой плёнки мыльного пузыря белым светом мы воспринимаем её как разноцветную.

По этому поводу известный французский учёный Доминик Франсуа Араго писал, что «чтобы окрасить воду, достаточно получить её в виде плёнки, ... тонкое есть, если можно так выразиться, синоним цветного, ... переход от любого цвета к цвету, наиболее резко от него отличающемуся, является необходимым следствием простого изменения толщины слоя жидкости, ... при переходе от красного к зелёному это изменение не составляет тысячной доли толщины волоса».

За много лет до Томаса Юнга цвета тонких плёнок изучались Ньютоном. В своём знаменитом трактате «Оптика», вышедшем в 1704 году, Ньютон писал: «Для более тонкого наблюдения порядка цветов... я взял два объективных стекла: одно плосковыпуклое и другое широкое двояковыпуклое ... наложив на последнее стекло первое плоской его стороной вниз, я слегка сжимал их вместе для того, чтобы заставить цвета последовательно возникать в середине кругов ... тот же опыт я повторял с другим двояковыпуклым стеклом, отшлифованным с обеих сторон по одной и той же сфере ... диаметр сферы был 184 дюйма. Это стекло помещалось на то же самое плоское стекло».

Схема опыта Ньютона и наблюдавшиеся при этом цветные кольца изображены на рисунке 126, а, б. Обратите внимание на значение радиуса кривизны линзы в последнем из описанных опытов: он составлял 92 дюйма. Так как один дюйм равен 25,4 мм, то радиус кривизны линзы около 2,3 м. Таким образом, между плоским стеклом и такой линзой возникал очень тонкий воздушный клин.



14.4. Как объяснить возникновение цветных колец Ньютона, исходя из современных научных представлений о волновой природе света?

¹ Абсолютный показатель преломления вещества n определяет скорость света в веществе: $n = c/v$. Поэтому чем больше абсолютный показатель преломления вещества плёнки, тем меньше скорость света в плёнке, а значит, тем больше «оптическая толщина» плёнки.

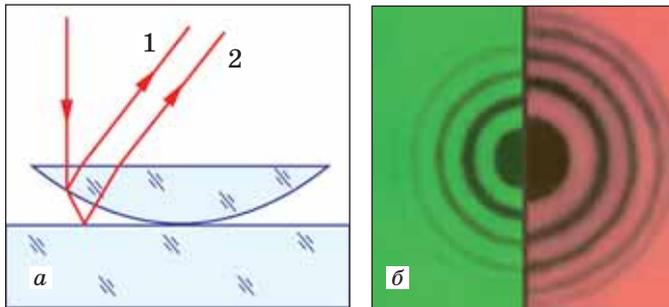


Рис. 126

При падении света на оптическую систему «линза – пластина» световые волны отражаются от выпуклой поверхности линзы (волна 1 на рисунке 126, а) и от поверхности стеклянной пластины (волна 2). Световые волны 1 и 2 когерентны (докажите это). Разность хода этих когерентных волн определяется удвоенной толщиной воздушного клина в точке их отражения. При интерференции световых волн 1 и 2 в зависимости от разности хода возможно усиление или ослабление света (интерференционный максимум или минимум). Но белый свет, как известно, состоит из световых волн с различной длиной волны. Поэтому интерференционные максимумы и минимумы для света с разной длиной волны (а значит, воспринимаемого как различные цвета) будут находиться на различном удалении от центра линзы. Так возникают цветные кольца Ньютона – интерференционные максимумы света различной длины волны (рис. 126, б).

Явление интерференции света широко используется в современных научных исследованиях и в технике. Познакомимся более подробно только с одним из примеров практического применения интерференции – с так называемым *просветлением оптики*.

При падении света на линзу оптического прибора свет не только преломляется, но и отражается от поверхности линзы. Объективы современных фотоаппаратов, видеокамер, микроскопов содержат десятков и более линз. В итоге за счёт отражения от поверхности каждой линзы количество световой энергии, проходящей через сложный объектив оптического прибора, значительно уменьшается.

Для того чтобы уменьшить потери на отражение – просветлить оптику, – на внешнюю поверхность линзы дополнительно наносят ещё один отражающий прозрачный слой, используя вещество, абсолютный показатель преломления которого меньше абсолютного показателя преломления стекла линзы (рис. 127). При этом свет отража-

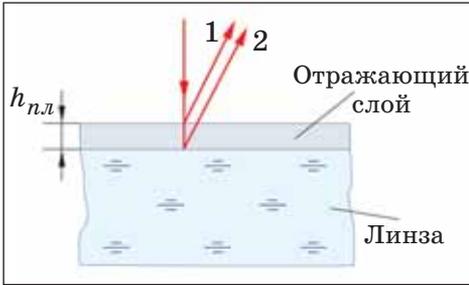


Рис. 127

ется и от внешнего слоя нанесённой на линзу плёнки (световая волна 1 на рисунке 127) и от поверхности самой линзы (световая волна 2). Толщина отражающего слоя подбирается таким образом, чтобы когерентные световые волны 1 и 2, интерферируя, гасили бы друг друга (интерференционный минимум). При этом условие происходит перераспределение световой энергии, и энергия отражённых световых волн будет минимальна, а энергия преломлённой световой волны – максимальной. Именно это необходимо для успешного применения линз.

Для того чтобы отражённые световые волны 1 и 2 (рис. 127) при интерференции полностью гасили бы друг друга, необходимо выполнение двух условий. Во-первых, амплитуды отражённых волн должны быть равны. Амплитуда отражённой волны определяется соотношением между абсолютными показателями преломления соответствующих значения абсолютных показателей преломления отражающего слоя и линзы, можно добиться равенства амплитуд отражённых волн. Во-вторых, обязательно должно выполняться условие интерференционного минимума

$$\Delta d = \frac{\lambda_{n,l}}{2}, \quad (14.4)$$

где Δd – разность хода двух световых волн;

$\lambda_{n,l}$ – длина световой волны света в отражающей плёнке.

Предположим, что свет падает на плёнку практически отвесно. Тогда разность хода Δd отражённых световых волн будет равна удвоенной толщине $h_{n,l}$ отражающей плёнки:

$$\Delta d = 2h_{n,l}. \quad (14.5)$$

Если абсолютный показатель преломления вещества отражающей плёнки равен $n_{n,l}$, то скорость света в плёнке v в $n_{n,l}$ раз меньше, чем скорость света в вакууме c :

$$v = \frac{c}{n_{n,l}}.$$



14.5. Что такое длина волны? Как рассчитать длину волны, если известна скорость распространения волны и период колебаний?

Длина волны света в отражающей плёнке $\lambda_{n,l}$ в $n_{n,l}$ раз меньше, чем длина волны света в вакууме λ :

$$h_{nл} = \frac{\lambda}{n_{nл}} . \quad (14.6)$$

Из соотношений (14.4) – (14.6) окончательно получим выражение, какой должна быть толщина отражающей плёнки, чтобы происходило просветление оптики:

$$h_{nл} = \frac{\lambda}{4n_{nл}} . \quad (14.7)$$

Выражение (14.7) показывает, что толщина отражающей плёнки определяется длиной волны света, для которого необходимо осуществить интерференционное гашение отражённых волн. Но, как правило, на линзу падает белый свет – смесь различных длин волн. Поэтому добиться интерференционного гашения всех отражённых волн не удаётся. Толщину отражающего слоя выбирают так, чтобы произвести гашение тех волн, к которым наиболее чувствителен глаз человека, а это зелёный цвет, длина волны которого 0,55 мкм. По этой причине в отражённом от линз свете сохраняются «края спектра» – фиолетовые и красные волны, благодаря которым объективы с просветлённой оптикой приобретают сиреневый оттенок.

Лабораторная работа «Наблюдение интерференции света».

Оборудование: стакан с мыльным раствором, проволочное кольцо с ручкой, стеклянная или пластиковая трубка, две стеклянные пластины.

Указания к работе:



Задание 1. Используя мыльный раствор и проволочное кольцо с ручкой, получите мыльную плёнку. Расположив мыльную плёнку вертикально, пронаблюдайте её в монохроматическом свете, даваемом красной лампой или через красный светофильтр. Объясните, почему наблюдаются горизонтальные светлые и тёмные полосы, почему ширина полос с течением времени изменяется. Сопроводите объяснение зарисовкой в тетради.

Пронаблюдайте мыльную плёнку в белом свете. Объясните, почему наблюдаются цветные полосы. Объясните наблюдаемое чередование цветов полос и изменение ширины полос с течением времени.



Задание 2. С помощью трубки выдуйте мыльный пузырь. Объясните, почему пузыри имеют радужную окраску и почему она постоянно меняется.



Задание 3. Стеклянные пластины положите одна на другую и сожмите пальцами (рис. 128). Регулируя нажим пальцев на пластинки, пронаблюдайте изменяющуюся по окраске картину. Объясните наблюдаемое явление. Сопроводите объяснение зарисовкой в тетради.



Рис. 128

Опыт Юнга по наблюдению интерференции света, расчёт длины волны света, объяснение цветов тонких плёнок, колец Ньютона, просветление оптики, $h_{nл} = \frac{\lambda}{4n_{nл}}$.



14.1. Поместите лезвие бритвы или острие ножа на время в пламя газовой горелки. Металл в области нагрева окисляется и возникает радужная окраска. Почему?

14.2. Два когерентных источника света O_1 и O_2 , находясь в вакууме, излучают световые волны. При этом на экране в точке O (рис. 129), находящейся на расстоянии 43,88780 см от источника O_1 и на расстоянии 43,88712 см от источника O_2 , наблюдается интерференционный максимум освещённости второго порядка. Определите, какова частота света, излучаемого источником. При расчётах скорость света принять равной $3 \cdot 10^8$ м/с. (Примечание. Разность хода когерентных волн в точке, где наблюдается интерференционный максимум второго порядка, равна двум длинам волн.)



Рис. 129

14.3. Ньютон в своём трактате «Оптика» описывал цветные кольца, наблюдавшиеся им в месте контакта двух стёкол – плосковыпуклого и широкого двояковыпуклого, – перечисляя их следующим образом: «Следующие круги в порядке цветов, непосредственно окружающие предыдущие, были: фиолетовый, синий, зелёный, жёлтый и красный». Объясните, почему наблюдается именно такой порядок чередования цветных колец Ньютона по мере удаления от центра – области контакта стёкол.

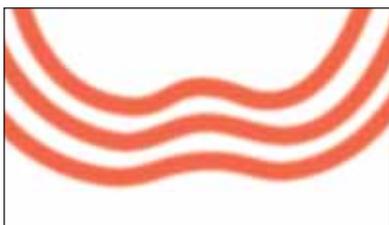


Рис. 130

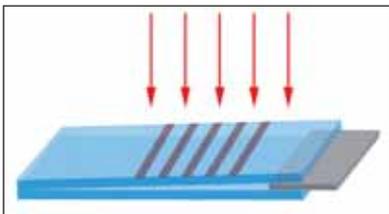


Рис. 131

14.4. На рисунке 130 изображён фрагмент колец Ньютона, даваемых оптической системой «плосковыпуклая линза большого радиуса кривизны – плоская пластина». Выпуклая поверхность линзы отшлифована идеально, а на плоской пластине имеется дефект, что приводит к искажению интерференционных полос. Определите, какого рода дефект – выступ или царапина. Ответ обосновать.

14.5. Между двумя стеклянными пластинами вложен листок фольги (рис. 131). При освещении пластин монохроматическим светом в отражённом свете на поверхности верхней пластины видны интерференционные полосы. Определите длину волны света, если расстояние между соседними светлыми полосами 3,0 мм, толщина фольги 0,015 мм, а длина стеклянной пластины 15 см.

§ 15. ДИФРАКЦИЯ СВЕТА



Ни природа тел, ни масса их, ни толщина краёв не имеют никакого заметного влияния на отклонение световых лучей, проходящих в их соседстве, и в равной мере очевидно, что этот замечательный факт не может совмещаться с теорией испускания. Волновая теория, наоборот, его объясняет и даёт даже средства для вычисления всех явлений дифракции.

Огюстен Жан Френель (1788–1827), французский физик, один из основоположников волновой оптики

Вам уже известно, что явление дифракции – это «визитная карточка» волнового процесса.

Явление дифракции света. Возможно ли изменение направления света, распространяющегося в прозрачной среде с постоянным показателем преломления, если свет не отражается, не преломляется и не рассеивается? Оказывается, да, в случае дифракции света. *Дифракция света – отклонение света от прямолинейного распространения в случае прохождения света мимо края тела или сквозь узкое отверстие.*

Явление дифракции наблюдается для всех типов волн и независимо от их физической причины. Не составляет труда наблюдать дифракцию механических волн, например, волн на поверхности воды или звуковых волн.



15.1. Почему грибки в лесу могут переговариваться, даже не видя друг друга?

Испытывают дифракцию и электромагнитные волны радиодиапазона. Именно благодаря дифракции длинных радиоволн, огибающих выпуклую поверхность Земли, осуществляется радиосвязь на дальние и сверхдальние расстояния.

Наиболее отчётливо дифракция волн наблюдается, если препятствие на пути распространения волн или отверстие, через которое проходит волна, сравнимо по размерам с длиной волны. Но длины волн видимого света весьма малы. Самые длинные волны красного света во столько раз короче вашего указательного пальца, во сколько раз он короче высочайшей вершины мира – Эвереста. По этой причине в обыденных условиях мы, как правило, наблюдаем резкие тени, отбрасываемые непрозрачными препятствиями, резко очерченные края отверстий, через которые проходит свет, и не замечаем явления дифракции. Для заметной дифракции на пути света должно находиться препятствие или отверстие размером в десятые доли миллиметра (рис. 132, а, б).

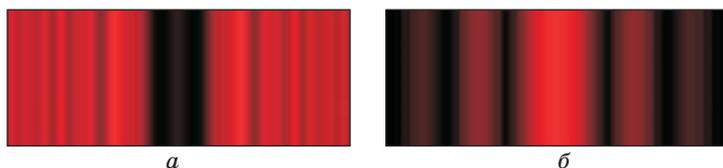


Рис. 132.

a – дифракционная картина, возникающая при освещении проволоки диаметром 0,1 мм;

б – дифракционная картина, возникающая при освещении вертикальной щели шириной 0,15 мм

Как объяснить возникновение картины, видимой на экране, например, при дифракции света на тонкой нити (рис. 132, *a*)? Световые волны, огибая препятствие, попадают в одну и ту же точку на экране, пройдя разные расстояния d_1 и d_2 (рис. 133). Интерферируя, эти волны, в зависимости от разности хода, дают максимум или минимум.

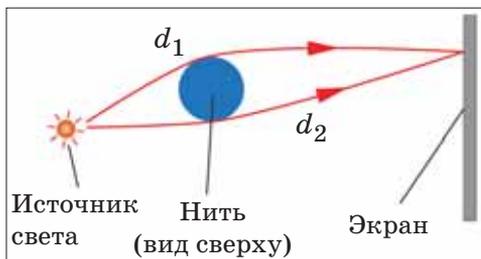


Рис. 133

По этой причине картина, наблюдаемая при дифракции света, – это картина, возникающая за счёт интерференции света. Таким образом, явление дифракции по своей сути – интерференционный эффект¹. Аналогичным образом объясняется возникновение дифракционной картины при прохождении света через узкое отверстие (рис. 132, *б*).

Волновая природа света накладывает определённые ограничения на разрешающую способность оптического прибора. Дело в том, что ввиду дифракции света изображение любой светящейся точки, даваемое оптическим прибором на экране или сетчатке глаза, будет являться не точкой, а системой дифракционных максимумов и минимумов. Пусть, например, в телескоп наблюдают звёзды, расположенные на малом угловом расстоянии φ друг от друга (рис. 134, *a*). Из-за дифракции света на отверстиях – объективе телескопа – дифракционные изображения звёзд могут сливаться. В таком случае невозможно отличить эти звёзды по отдельности. Если же использовать телескоп

¹ В этой связи интересно отметить, что знаменитый опыт Юнга по интерференции света во многих учебниках физики можно обнаружить в параграфе, посвящённом дифракции света.

с большим диаметром объектива, то разрешающая способность телескопа повысится. Тогда это даст возможность различить близко расположенные звёздные объекты (рис. 134, б).

По причине дифракции невозможно получить с помощью оптического микроскопа и изображения крайне мелких предметов – тех, чьи размеры меньше длины волны света.



15.2. Можно ли наблюдать вирусы в оптический телескоп? Размеры вирусов колеблются от 20 до 300 нм.

Картины дифракции, изображённые на рисунке 132, *а–в*, наблюдаются в случае монохроматического света. Если свет не монохроматический, возникает целый набор таких дифракционно-интерференционных картин. Для различных длин волн максимумы и минимумы будут находиться в различных точках пространства, и наблюдатель видит ряд последовательных цветных полос (рис. 135).

Теория дифракции и математический метод расчёта дифракционных картин от различного рода препятствий были разработаны английским учёным Томасом Юнгом (1773–1829) и французским физиком Огюстеном Жаном Френелем (1788–1827).

Волновая оптика позволила не только объяснить явления интерференции и дифракции света, но и дала теоретическое обоснование законам прямолинейного распространения света, законам отражения и преломления света. Волновой оптикой были установлены границы применимости геометрической оптики. Законы геометрической оптики имеют приближённый характер. Например, закон прямолинейного распространения света выполняется с достаточной для практики точностью, если размеры препятствия на пути световой волны существенно больше длины световой волны.

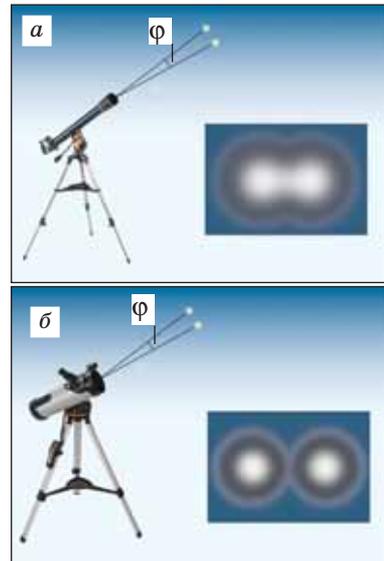


Рис. 134



Рис. 135. Картина дифракции на краю лезвия бритвы при освещении его белым светом



Зоны Френеля. Многие случаи дифракции света могут быть проанализированы с помощью разработанного Френелем метода зон. Проиллюстрируем применение этого метода, рассмотрев прохождение света через малое круглое отверстие. Монохроматический источник света находится в точке O (рис. 136), световые волны проходят через отверстие и попадают в точку A , находящуюся на экране напротив источника света.

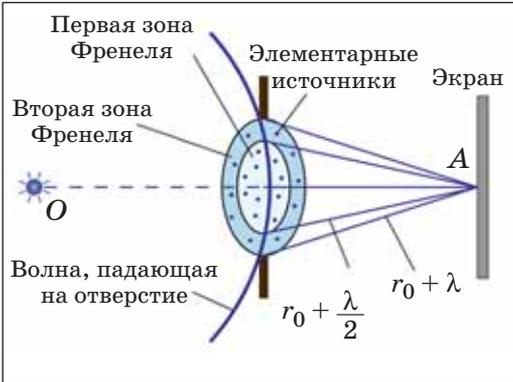


Рис. 136

Для того чтобы определить амплитуду световых колебаний¹ в точке A (рис. 136), необходимо рассчитать, каков будет результат интерференции всех световых волн, излучаемых элементарными источниками. Вот как подобный расчёт предложил проводить Френель. Обозначим расстояние от ближайшего к точке A элементарного источника волн (находящегося на оси OA) через r_0 . Выделим все источники, расстояние r_1 от которых до точки A удовлетворяет условию

$$r_1 \leq r_0 + \frac{\lambda}{2},$$

где λ – длина волны света.

Совокупность этих источников света назовём первой зоной Френеля. Источники, находящиеся в первой зоне Френеля, в результате интерференции не гасят друг друга, так как разность хода между любыми двумя источниками из первой зоны меньше половины длины волны.

Пусть в некоторый момент времени световая волна достигает отверстия. Френель предложил считать, что в каждой точке среды, до которой дошла волна, возбуждаются колебания и вновь возникшие элементарные источники волн излучают когерентные волны. (Когерентность волн обусловлена тем, что источники волн колеблются, очевидно, с одинаковой частотой и с постоянной разностью фаз.)

¹ Более точно следовало бы сказать «амплитуду колебаний напряжённости электрического поля электромагнитной волны». Но во времена Френеля об электромагнитной природе света не было известно, поэтому мы и далее используем термин «амплитуда световых колебаний».

Выделим вторую зону Френеля, границу r_2 которой определим соотношением

$$r_1 \leq r_2 \leq r_1 + \frac{\lambda}{2}$$

или

$$r_0 + \frac{\lambda}{2} \leq r_2 \leq r_0 + \lambda.$$

Источники, находящиеся во второй зоне Френеля, также не гасят друг друга.

Аналогичным образом выделяют третью, четвёртую и так далее зоны Френеля. При таком разбиении источников на отдельные зоны площади зон оказываются равными. Это значит, что для любого источника из первой зоны найдётся источник из второй зоны, отличающийся от него по разности хода на половину длины волны. Следовательно, в результате интерференции таких элементарных источников в точке A они взаимно погасят друг друга.

Таким образом, мы приходим к парадоксальному на первый взгляд выводу о зависимости амплитуды световых колебаний в центральной точке экрана – точке A – от размеров отверстия. До тех пор, пока радиус отверстия меньше радиуса первой зоны Френеля, амплитуда световых колебаний в точке A увеличивается при увеличении радиуса отверстия и достигает максимума при совпадении размера отверстия с размером первой зоны Френеля. При дальнейшем увеличении размеров отверстия открываются источники второй зоны Френеля и это приводит к уменьшению (!) амплитуды световых колебаний в точке A . Когда в отверстии укладывается ровно две зоны Френеля, амплитуда световых колебаний в точке A практически равна нулю. Это значит, что напротив отверстия на экране будет наблюдаться не светлая, а тёмная точка!

Может возникнуть вполне законный вопрос: куда же делась энергия, переносимая волной, проходящей через отверстие. Тем более что через отверстие радиусом не в одну, а в две зоны Френеля и энергии на экран поступает больше. Конечно же, энергия не исчезла – при интерференции волн произошло *перераспределение* энергии. Когда радиус отверстия составляет две зоны Френеля, интерференционный максимум образуется не в центральной точке экрана (точка A), а в других соседних точках экрана.

После того как радиус отверстия будет ещё больше увеличен и будет открыта третья зона Френеля, в точке A вновь возникнет интерференционный максимум и так далее.

Опыт, который можно провести, используя в качестве источника света лазер, подтверждает выводы, сделанные на основе метода зон Френеля (рис. 137, а, б).

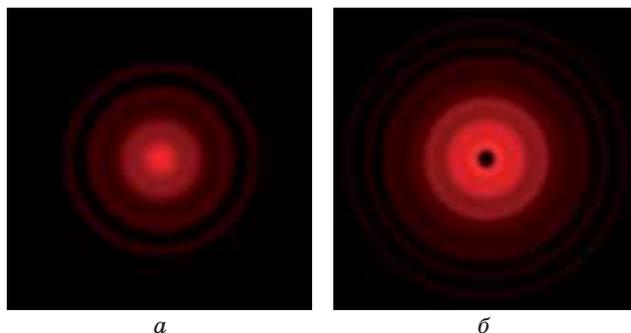


Рис. 137

Дифракционная решётка. Одним из оптических приборов, действие которых основано на явлении дифракции света, является *дифракционная решётка*. Дифракционная решётка – это совокупность большого числа штрихов одинаковой формы, нанесённых на одинаковом расстоянии друг от друга на отражательную или прозрачную поверхность (рис. 138, а, б).

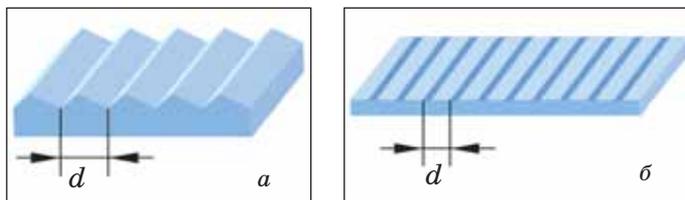


Рис. 138

а – отражательная дифракционная решётка;
б – прозрачная дифракционная решётка

При изготовлении дифракционной решётки штрихи наносят на зеркальную металлическую или стеклянную поверхность с помощью специальной делительной машины с алмазным резцом. Общее число штрихов дифракционной решётки может составлять несколько сотен тысяч, при этом на 1 мм поверхности решётки наносится до 1000–2000 штрихов.

Одним из основных параметров дифракционной решётки является *период решётки* – расстояние между двумя ближайшими её штрихами.



15.3. Дифракционная решётка содержит 500 штрихов на 1 мм. Чему равен период решётки?

Пусть на прозрачную дифракционную решётку с периодом d падает монохроматический свет с длиной волны λ (рис. 139). После прохождения щелей решётки когерентные световые волны благодаря дифракции распространяются в различных направлениях. Рассмотрим световые волны 1 и 2, прошедшие через две ближайшие щели и распространяющиеся под некоторым углом φ к плоскости решётки.

Эти когерентные волны усиливают друг друга, и возникает интерференционный максимум, если разность хода волн Δd равна целому числу волн:

$$\Delta d = k\lambda, \quad (15.1)$$

где $k = 0, 1, 2, \dots$ – целое число, номер максимума.

Рассмотрим прямоугольный треугольник O_1O_2A (рис. 139). В этом треугольнике угол O_2O_1A , очевидно, равен углу φ , гипотенуза треугольника O_1O_2 равна периоду решётки d , а катет, лежащий против угла φ , есть разность хода волн Δd .

Тогда

$$\Delta d = d \sin \varphi. \quad (15.2)$$

Из соотношений (15.1) и (15.2) вытекает условие возникновения интерференционных максимумов, создаваемых дифракционной решёткой:

$$d \sin \varphi = k\lambda. \quad (15.3)$$

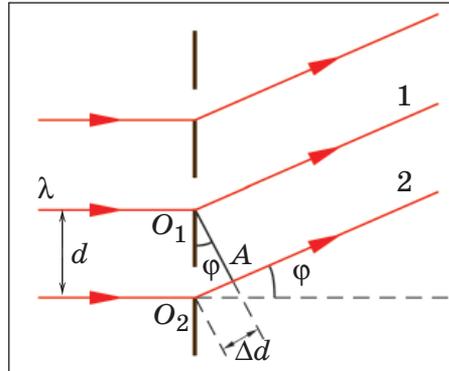


Рис. 139

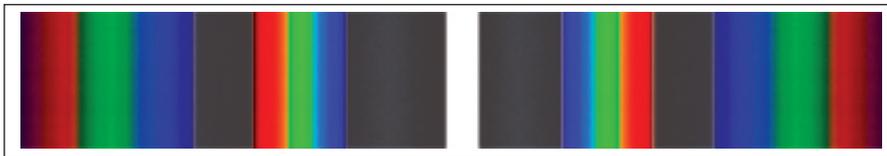


Рис. 140

Какие выводы можно сделать, анализируя выведенную формулу? *Во-первых*, интерференционные максимумы для света различной длины волны будут наблюдаться под различными углами, то есть в разных точках экрана. Значит, если направить на дифракционную решётку белый свет – смесь различных длин волн, – то решётка «рассортирует» волны и на экране возникнет дифракционный спектр (рис. 140). *Во-вторых*, дифракционная решётка, являясь спектральным прибором, создаёт в отличие от дисперсионной призмы не один, а несколько спектров, каждый из которых соответствует определённому номеру спектра k . *В-третьих*, центральный (нулевой) максимум – максимум для всех длин волн. Действительно, при $k = 0$ и угле наблюдения центрального максимума $\varphi = 0$ условие (15.3)

$$d \sin \varphi = k\lambda$$

выполняется при любой длине волны.



15.4. Почему при освещении дифракционной решётки белым светом центральный максимум мы всегда видим белым (рис. 140)?

В настоящее время доступно изготовление дифракционных решёток, содержащих большое число штрихов. Такие решетки создают чёткие дифракционные картины, и это позволяет с большой точностью определять длину волны падающего на решётку света. По этой причине современные спектральные аппараты имеют в своём составе, как правило, не призму, а дифракционную решётку.

Лабораторная работа «Наблюдение дифракции света».

Оборудование: рамка картонная, в которой натянута проволока диаметром 0,1–0,3 мм, штангенциркуль, CD-диск, рамка с капроновой тканью, лампа с прямой нитью накала (одна на весь класс).

Указания к работе:

Задание 1. Пронаблюдайте дифракцию света на тонкой нити. В качестве источника света используйте светящуюся лампу с вертикально расположенной нитью накала. В качестве нити используйте тонкую проволоку, натянутую в картонной рамке. Расположите нить вертикально вплотную к глазу и наблюдайте дифракционную картину. Выполните зарисовку в тетради.

Задание 2. Пронаблюдайте дифракцию света на узкой щели. В качестве источника света используйте светящуюся лампу. В качестве щели используйте зазор между губками штангенциркуля, располагая щель вертикально вплотную к глазу. Регулируя величину щели от 0,2 до 0,8 мм, наблюдайте за изменением дифракционной картины и вида дифракционных спектров. Выполните зарисовки в тетради.

Задание 3. Пронаблюдайте спектры, возникающие при отражении света от CD-диска. Объясните наблюдаемое явление.

Задание 4. Пронаблюдайте спектры, возникающие при наблюдении источника света через капроновую ткань. Объясните наблюдаемое явление. Объясните, почему в центре картины наблюдается максимум белого света.

Явление дифракции света, разрешающая способность оптического прибора, **границы применимости геометрической оптики**, метод зон Френеля, **дифракционная решётка**, **условие возникновения интерференционных максимумов**, **даваемых дифракционной решёткой:**
 $d \sin \varphi = k\lambda$.

15.1 ● Дифракционная решётка содержит 100 штрихов на 1 мм. Определите длину волны монохроматического света, падающего на решётку, если угол между двумя спектрами первого порядка равен 7° .

15.2 ● Почему в спектре, даваемом дифракционной решёткой, фиолетовая линия расположена ближе к центру дифракционной картины, чем красная?

15.3 ● Один из создателей волновой оптики французский физик Огюстен Жан Френель в своём научном труде «О свете» писал: «Если экран представляет собой круг, то вычисления приводят к такому замечательному выводу, что центр проектируемой им тени освещён точно так же, как если бы экрана не было вовсе.

Господин Пуассон указал мне на это следствие моих формул... Господин Араго проверил его в тени экрана, имевшего 2 мм в диаметре... Результат опыта подтвердил заранее предсказанное теорией явление».

О каком физическом явлении идёт речь? Как могут быть объяснены результаты опыта, проведённые академиком Араго?



15.4. Если смотреть, прищурившись, на яркий источник белого света, то можно наблюдать радужные цвета, даваемые источником. Как объяснить наблюдаемое явление?

15.5 ● На дифракционную решётку направлено лазерное излучение с длиной волны света 650 нм. На экране, отстоящем от решётки на 55 см, расстояние между максимумами второго порядка оказалось равным 94 см. Сколько штрихов на 1 мм содержит решётка?

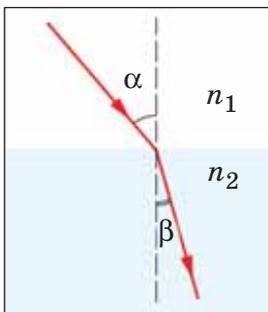
Самое важное в разделе «Геометрическая и волновая оптика»

1. Оптическое (видимое человеком) излучение – электромагнитные волны с длиной волны от 0,40 до 0,76 мкм. Волны разной длины вызывают различные цветовые ощущения.

2. В однородной прозрачной среде свет распространяется *прямолинейно*.

На границе раздела двух сред свет отражается.

3. Скорость света в среде v меньше скорости света в вакууме c .



Абсолютный показатель преломления

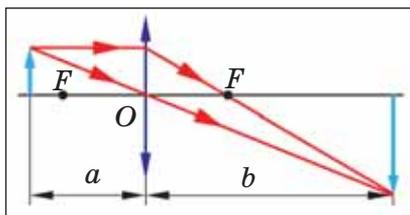
$$n = \frac{c}{v}.$$

При переходе света из одной прозрачной среды в другую свет *преломляется*:

$$n_1 \sin \alpha = n_2 \sin \beta.$$

При переходе из оптически более плотной среды в менее плотную возможно *полное отражение света*.

4. Благодаря преломлению ход световых лучей изменяется при их прохождении через *собирающие и рассеивающие линзы*.



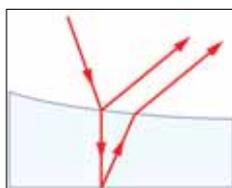
Формула линзы:

$$\frac{1}{a} + \frac{1}{b} = \frac{1}{F}.$$

Оптическая сила линзы:

$$D = \frac{1}{F}, \text{ дп.}$$

Глаз человека – сложнейший природный орган зрения.



5. Изучение прохождения света через кристаллы-поляроиды позволило доказать *поперечность световых волн*.

6. При распространении света возможна *интерференция* когерентных световых волн (опыт Юнга, кольца Ньютона).

Условие интерференционного

максимума: $\Delta d = k\lambda$

минимума: $\Delta d = k\lambda + \frac{\lambda}{2}$

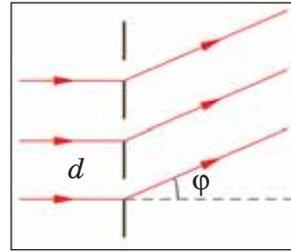
$k = 0, 1, 2, \dots$

7. При распространении света возможна *дифракция* световых волн.

Явление дифракции ограничивает разрешающую способность оптических приборов.

Дифракционная решётка – спектральный прибор.

$$d \sin \varphi = k\lambda.$$



II.1 ● Почему пузырьки воздуха, растворённого в воде, кажутся блестящими?

II.2 ● Используя пластиковую бутылку с водой, монетку, линейку и карандаш, определите абсолютный показатель преломления воды.



II.3. Как возникают миражи?

II.4 ● Почему на транспорте сигнал опасности красного цвета?



II.5. Подготовьте сообщение по теме «Применение явления интерференции света в науке и технике».

P. S.



При изучении раздела были рассмотрены законы геометрической оптики и получены убедительные доказательства волнового характера распространения света.

– Был изучен ход лучей в линзах, установлено, что преломляющие свойства линзы характеризуются её оптической силой. Но не выяснено, как оптическая сила линзы зависит от показателя преломления вещества линзы и кривизны её поверхности.

– Известно, что скорость света различна в различных средах и это приводит к преломлению света при переходе из одной прозрачной среды в другую. Но не рассматривался вопрос о том, как скорость света, а значит, и показатель преломления вещества зависят от частоты излучения света.

– При прохождении света через поляририд происходит превращение естественного света в поляризованный. Пропускная способность двух поляриридов определяется их взаимной ориентацией относительно друг друга. Но математические соотношения, описывающие поляризацию, не изучались.

– Было установлено, что возникновение так называемых «колец Ньютона» обусловлено явлением интерференции света. Но вывод формулы для расчёта радиуса колец не приводился.

– Было изучено явление дифракции света. Но математическая теория дифракции света не рассматривалась.

Раздел 3. Элементы теории относительности и квантовой физики

В этом разделе учебника будут рассмотрены современные физические теории, описывающие природу в экстремальных условиях – при скоростях, близких к скорости света, и в масштабах микромира. Вы выясните, какие частицы претендуют на звание «элементарных», составляя основу нашего мира, и какие типы взаимодействий существуют между ними.



Вспомните, что вам уже известно из курсов физики и химии, и ответьте на следующие вопросы:

- Что такое механическое движение и как формулируются основные законы механики (законы Ньютона)?
- Что такое квант?
- Каково строение атома и атомного ядра?
- Какие физические взаимодействия вам известны?

§ 16. Постулаты специальной теории относительности

Принцип относительности в механике

Принцип относительности

Закон распространения света и принцип относительности

Постулаты СТО и релятивистские эффекты

Релятивистский закон сложения скоростей

§ 17. Основы релятивистской динамики

Импульс в СТО

Энергия в СТО

Релятивистская «теорема Пифагора»

Примеры решения задач

§ 18. Элементы квантовой физики

Энергия и импульс фотона

Линейчатые спектры

Давление света

Явление фотоэффекта

Пример решения задач

Лазеры

§ 19. Ядро атома. Радиоактивность

Строение ядра атома

Явление радиоактивности

Лабораторная работа «Моделирование процесса радиоактивного распада»
Закон радиоактивного распада
Применение радиоактивных изотопов

§ 20. Ядерная энергия и ядерная энергетика

Энергия связи
Ядерные реакции
Ядерный реактор
Термоядерный синтез

§ 21. Детекторы частиц

Трековые приборы
Лабораторная работа «Изучение треков заряженных частиц по готовым фотографиям»
Счётчик Гейгера
Дозиметрия
Современные детекторы частиц

§ 22. Элементарные частицы и фундаментальные взаимодействия

Две с половиной тысячи лет поисков
Классификация элементарных частиц
Фундаментальные взаимодействия и классификация частиц
Стандартная модель: достижения и нерешённые проблемы

Самое важное в разделе «Элементы теории относительности и квантовой физики»

P. S.

§ 16. ПОСТУЛАТЫ СПЕЦИАЛЬНОЙ ТЕОРИИ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ



Трудно пробежать мило за четыре минуты – это требует определённых способностей и тренировки. Теория относительности таких требований не предъявляет, в этом отношении она не сложна. Нужно лишь привлечь скрытые в нас способности.

Из книги С. Лилли
«Теория относительности для всех»

Вам уже известны основные понятия классической механики.

Принцип относительности в механике. Как известно, механика рассматривает наиболее простую форму движения материи – механическое движение. *Механическое движение – это изменение положения тела в пространстве относительно других тел с течением времени.* Основой классической механики являются **законы Ньютона**, сформулированные им в его основном научном труде «Математические начала натуральной философии» (1687 г.). Как и другие фундаментальные законы, лежащие в основе физики, они являются обобщением научных фактов.

Необходимо специально отметить, что законы Ньютона определяют движение различных классов тел. В первом законе Ньютона рассматривается движение *свободного тела*, то есть тела, которое не взаимодействует ни с какими другими телами¹. Напомним формулировку данного закона: *всякое тело продолжает удерживаться в своём состоянии покоя или равномерного и прямолинейного движения, пока и поскольку оно не понуждается приложенными силами изменить это состояние.*

Второй и третий законы Ньютона устанавливают характер движения тела, взаимодействующего с другими телами. Так, по II закону Ньютона, если на тело массой m со стороны других тел действует сила \vec{F} , то тело движется с ускорением \vec{a} .

$$\vec{a} = \frac{\vec{F}}{m}. \quad (16.1)$$

¹ Ввиду существования сил гравитационного взаимодействия с их бесконечным радиусом действия ясно, что понятие свободного тела является определённой физической идеализацией. Но, если представить себе, что внешнее воздействие на тело уменьшается, то мы и приходим в пределе к представлению о свободном теле.

Вспомним, что ускорение – это физическая величина, характеризующая быстроту изменения скорости тела:

$$\vec{a} = \frac{d\vec{v}}{dt}. \quad (16.2)$$

Тогда из соотношений (16.1) и (16.2) имеем

$$m \frac{d\vec{v}}{dt} = \vec{F}$$

или

$$\frac{d(m\vec{v})}{dt} = \vec{F}. \quad (16.3)$$

Произведение массы тела m на его скорость \vec{v} в классической механике определяется как импульс тела \vec{p} :

$$\vec{p} = m\vec{v}. \quad (16.4)$$



16.1. В каких единицах измеряется импульс?

Таким образом, соотношение (16.3), выражающее II закон Ньютона, примет вид

$$\frac{d\vec{p}}{dt} = \vec{F}. \quad (16.5)$$



16.2. Как формулируется III закон Ньютона?

Описание механического движения невозможно провести, не используя понятие «система отсчёта». Система отсчёта включает в себя тело отсчёта, систему координат и прибор для отсчёта времени (часы). Пусть имеется система отсчёта K , относительно которой свободное тело покоится или движется прямолинейно и равномерно (рис. 141).

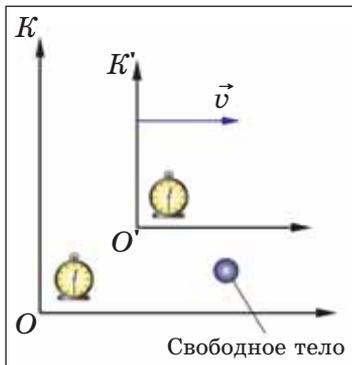


Рис. 141

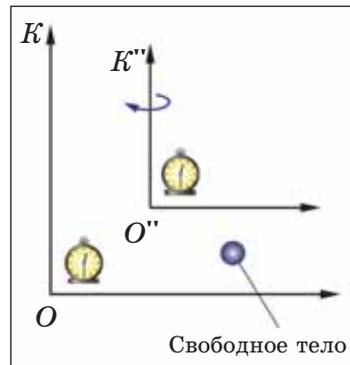


Рис. 142

Выберем дополнительно ещё систему отсчёта K' , которая движется относительно системы отсчёта K прямолинейно и равномерно. Тогда и относительно системы отсчёта K' свободное тело будет двигаться прямолинейно и равномерно.

Возможна и иная ситуация (рис. 142). Можно выбрать систему отсчёта K'' , которая движется ускоренно или вращается относительно системы отсчёта K . Тогда относительно такой системы отсчёта K'' свободное тело будет двигаться неравномерно, например, по криволинейной траектории.



16.3. В чём заключается свойство относительности механического движения?

Рассмотренные примеры (рис. 141 и 142) показывают, что системы отсчёта делятся на два класса:

1. *Инерциальные системы отсчёта.* В инерциальных системах отсчёта выполняется I закон Ньютона.

2. *Неинерциальные системы отсчёта.* В неинерциальных системах отсчёта не выполняется I закон Ньютона.

Используя введённое понятие инерционной системы отсчёта, содержание I закона Ньютона можно изложить следующим образом: *существуют такие системы отсчёта, их называют инерциальными, относительно которых свободное тело либо покоится, либо движется прямолинейно и равномерно.*



16.4. Сколько инерциальных систем отсчёта может быть предложено для описания механического движения свободных или взаимодействующих тел?

Является или нет та или иная система отсчёта инерциальной, можно установить только на основе опыта. Так, например, часто при рассмотрении механического движения в качестве такой системы отсчёта принимают Землю. Но вспомним, что при наблюдении звёздного неба мы обнаруживаем суточное вращение звёзд, поворот небесной сферы. Значит, Земля является инерциальной системой лишь в грубом приближении: далёкие звёзды – практически свободные тела – вращаются, то есть движутся с центростремительным ускорением относительно системы отсчёта «Земля». Намного ближе к инерциальной системе будет система отсчёта, где в качестве тела отсчёта взято Солнце, а систему координат образуют световые лучи, направленные на три далёкие звезды, не лежащие с ним в одной плоскости¹.

¹ Однако если учесть, что Солнечная система вращается относительно центра Галактики, делая один оборот за 200 млн лет, то и такая система является инерциальной лишь с определённым приближением (хотя и очень высоким).

Если имеется хотя бы одна инерциальная система отсчёта (а именно это и утверждает I закон Ньютона), то любая другая система отсчёта, движущаяся относительно неё прямолинейно и равномерно, также будет инерциальной. Таким образом, для описания механического движения может быть использовано множество инерциальных систем отсчёта, и в этой связи естественно возникает вопрос – равноценны ли инерциальные системы между собой. Иными словами, одинаковым ли законам подчиняется механическое движение в различных инерциальных системах отсчёта, не влияет ли прямолинейное равномерное движение на характер протекания механических процессов?

Ответ на этот вопрос был дан выдающимся итальянским учёным, одним из основоположников научного естествознания Галилео Галилеем (1564–1642). Галилеем был выдвинут *принцип относительности*. Он писал: «Уединитесь... в просторное помещение под палубой какого-нибудь корабля... Заставьте теперь корабль двигаться с любой скоростью, и тогда (если только движение будет равномерным и без качки в ту и другую сторону) во всех названных явлениях вы не обнаружите ни малейшего изменения и ни по одному из них не сможете установить, движется ли корабль или стоит неподвижно...» *Принцип относительности Галилея* может быть сформулирован следующим образом: *законы механики одинаковы во всех инерциальных системах отсчёта*.

Принцип относительности. При дальнейшем развитии физической науки трудами великого английского физика Джеймса Клерка Максвелла (1831–1879) была создана теория электромагнитного поля, позволившая дать объяснения целому комплексу явлений в области электричества, магнетизма и оптики. Учёным стало ясно, что все физические процессы, все события природы не могут быть представлены на основе только классической механики. В этой связи возник вопрос о равномерности принципа относительности применительно не только к механическим, но и *любым природным явлениям*. Как образно выразился один из учёных, «речь идёт уже не только о наливании чая, одинаковом как в реактивном самолёте, так и за домашним столом, но и о том, что, поглядев в зеркало в реактивном самолёте, вы увидите то же самое, что вы видите, взглянув в зеркало у себя дома».

Проведём, следуя аргументации Эйнштейна, несколько доводов в пользу «расширения» принципа относительности на все физические явления. *Во-первых*, является маловероятным, чтобы принцип столь большого общего значения, будучи применяем в одной области явле-

ний – механике, оказался бы недействительным в других областях. *Во-вторых*, наша планета Земля, ввиду её орбитального движения вокруг Солнца, движется относительно Солнца со скоростью 30 км/с, постоянно меняя направление скорости. «Следовательно, в случае, если принцип относительности не действителен, надо было бы допустить, что направление движения Земли в данный момент отражается на законах природы. А в силу этого физические системы в своих процессах зависели бы от их пространственного расположения по отношению к Земле... при всей тщательности наблюдений никогда не была отмечена такая анизотропия¹ земного физического пространства, то есть подобная физическая неравноценность различных направлений, – и в этом весьма веский аргумент в пользу принципа относительности».

Сформулируем **принцип относительности: законы физики одинаковы во всех инерциальных системах отсчёта**. Иными словами, прямолинейное равномерное движение не влияет на характер протекания не только механических, но любых без исключения физических процессов!

Закон распространения света и принцип относительности. Напомним известный в механике закон сложения скоростей. Пусть вагон поезда движется относительно земли (полотна дороги) прямолинейно и равномерно со скоростью V (рис. 143). Внутри вагона (инерциальная система отсчёта K') вдоль него и в направлении его движения шагает человек со скоростью v' относительно вагона. С какой скоростью v он будет перемещаться относительно земли (инерциальной системы K)? Ответ на этот вопрос и называют «законом сложения скоростей в классической механике»:

$$v = v' + V. \quad (16.6)$$

Такой закон сложения скоростей вытекает из следующих рассуждений: «Если бы человек в течение секунды оставался стоять спокойно, то он подвинулся бы вперёд по отношению к полотну на расстояние V , равное скорости движения вагона. В действительности же он не стоит, а идёт, а поэтому отмерит в эту секунду в отношении к вагону, а следовательно, и в отношении к полотну ещё расстояние v' , равное скорости его ходьбы. Таким образом в рассматриваемую секунду он по отношению к полотну всего подвинется на расстояние $v = v' + V$ ».

Так мы рассуждаем в рамках классической механики, и эти рассуждения подтверждаются нашим привычным жизненным опытом.

¹ Анизотропия – неодинаковость физических свойства по различным направлениям.

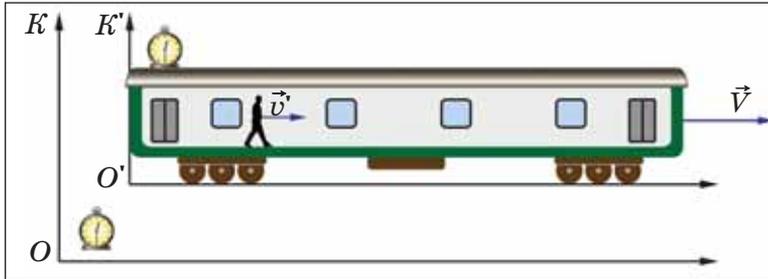


Рис. 143

Попробуем провести подобные рассуждения при рассмотрении следующего мысленного эксперимента. Вообразим, что в космическом пространстве движется относительно Земли ракета со скоростью, практически равной скорости света в вакууме c (рис. 144). В носовой части ракеты включается прожектор, который посылает луч света по ходу движения ракеты. Какова будет скорость этого луча света относительно земного астронома, наблюдающего за полётом ракеты?



Рис. 144

Ответ на этот вопрос звучит совершенно неожиданно с точки зрения классической механики и её закона сложения скоростей (16.6). Оказывается (и это является достоверно установленным фактом), **скорость света не зависит от скорости источника света.**

Так, например, нидерландский астроном Виллем де Ситтер (1872–1934) подтвердил этот вывод результатами наблюдения за двойными звёздами. Вообразим двойную звезду и наблюдателя O , расположенного в плоскости орбиты двойной звезды на огромном расстоянии L от неё (рис. 145). Пусть для простоты одна из звёзд вращается со скоростью v по круговой орбите вокруг массивной звезды – центра двойной системы. Если скорость света не зависит от движения источника света, то и в точке A , и в точке B свет, испускаемый звездой, имеет одну и ту же скорость c . Следовательно, и из точки A , и из точки B свет дойдёт до наблюдателя за одно и то же время, и эти события будут разделены промежутком времени $T/2$, равным половине периода орбитального движения звезды.

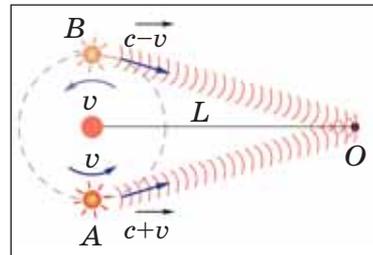


Рис. 145

Если же скорость света зависит от движения источника, то из точки A свет дойдёт до наблюдателя за время

$$t_A = \frac{L}{c + v},$$

где c – скорость света, испускаемого неподвижным источником;
 v – скорость движения звезды по орбите.

Из точки B свет дойдёт до наблюдателя за время

$$t_B = \frac{L}{c - v}.$$

Тогда при движении звезды по орбите из точки A в точку B её полупериод *удлинится* на величину Δt , равную

$$\begin{aligned} \Delta t &= t_B - t_A, \\ \Delta t &= \frac{L}{c - v} - \frac{L}{c + v}, \\ \Delta t &= \frac{2Lv}{c^2 - v^2}, \\ \Delta t &\approx \frac{2Lv}{c^2}. \end{aligned}$$

При движении звезды по орбите из точки B в точку A на такую же величину Δt полупериод орбитального движения звезды должен был бы *укоротиться* (ведь из точки A в этом случае к наблюдателю приходит более «быстрый» свет, чем из точки B).

Однако подобные «колебания полупериодов» для двойных звёзд не наблюдаются, что и служит доказательством независимости скорости света от скорости источника.



Один из ярких экспериментов по прямой демонстрации независимости скорости света от скорости движения источника был проведён российскими физиками в Курчатовском центре синхротронного излучения и нанотехнологий Национального исследовательского центра «Курчатовский институт».

В этом эксперименте в качестве импульсного источника света использовался источник так называемого синхротронного излучения – электромагнитного излучения от инфракрасного до рентгеновского диапазонов, возникающего при движении сгустка электронов по криволинейной траектории. Схема установки изображена на рисунке 146. В вакуумной системе сгусток электронов, разогнанных до скорости, близкой к скорости света c , движется по замкнутой криволинейной траектории. Орбиту электронов формирует магнитная система, состоящая из четырёх магнитов

М1 – М4, которые создают магнитное поле с индукцией 1,5 Тл. На криволинейных участках траектории (их радиус 1 м) электроны движутся с центростремительным ускорением и являются источниками электромагнитного излучения. За один оборот электрон теряет на излучение менее 0,001 % от всей первоначальной энергии, и эти потери восполняются в резонаторе, к ускоряющему промежутку которого приложено переменное напряжение амплитудой 15 кВ и частотой, равной частоте обращения электронного сгустка в вакуумной системе.

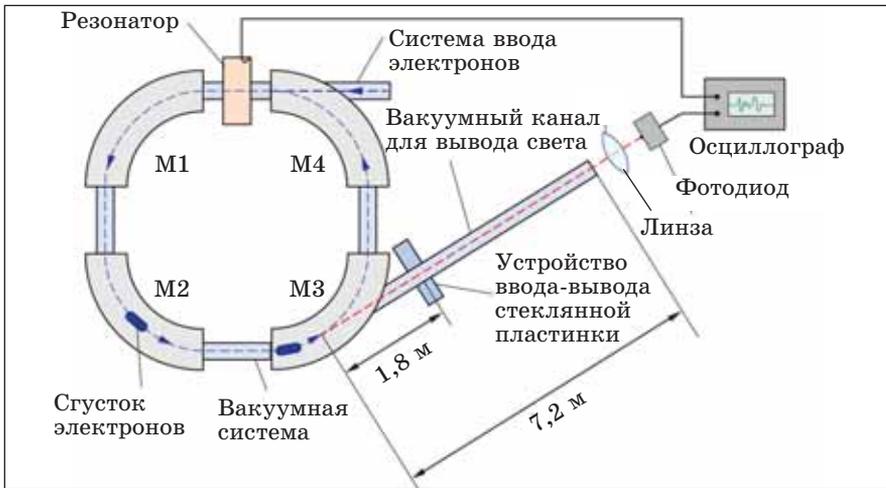


Рис. 146. Схема установки [из статьи Е.В. Александра, П.А. Александрова, В.С. Запасских, В.Н. Корчуганова, А.И. Стирина «Эксперименты по прямой независимости скорости света от скорости движения источника (демонстрация справедливости второго постулата специальной теории относительности Эйнштейна)» // ж. «Успехи физических наук», 2011, т. 181, №12, с. 1345–1351]

В экспериментальной установке в области магнита М3 устроен канал для вывода света длиной 7,2 м. Импульс светового излучения, испущенный релятивистскими электронами, фокусируется линзой на фотодиод, и возникший за счёт света импульс напряжения на фотодиоде формирует сигнал на экране осциллографа. В световом канале расположено специальное устройство ввода-вывода стеклянной пластинки, которую можно поставить на пути света.

Предположим, что скорость света зависит от скорости источника. Электроны излучают свет, двигаясь практически со скоростью, равной скорости света c . В таком случае скорость излучённого электронами света должна была бы быть равной $2c$.



Рис. 147

а – сигнал на экране осциллографа в случае прохождения света по свободному каналу вывода без стеклянной пластинки; *б* – сигнал на экране осциллографа в случае прохождения света по каналу вывода, перегороженному стеклянной пластинкой

лографа, формируемых световыми импульсами, должно быть различным. Однако в опыте это не наблюдалось (рис. 147, *а*, *б*).

Это означает, что *скорость света, излучённого движущимися электронами, и скорость света, излучённого неподвижными атомами вещества, одинакова!* Таким образом, результаты эксперимента безоговорочно подтверждают факт независимости скорости света от скорости источника, излучающего свет.

Если скорости других объектов относительноны и зависят от скорости и направления движения наблюдателя, то **скорость света абсолютна** – она не зависит от движения не только источника, но и наблюдателя.

На первый взгляд этот факт представляется невероятным и противоречит здравому смыслу. Но здравый смысл – это то, что почерпнуто нами из обычного жизненного опыта. Ясно, что мы не обладаем опытом, как должен выглядеть мир при движении со скоростью, близкой к скорости 300 000 км/с. В таких ситуациях необходимо действовать в рамках обычного научного метода, с помощью которого одни научные теории принимаются, а другие – отвергаются.



16.5. Что является критерием истинности научной теории?

Как вы знаете, «право на гражданство» в науке имеет только та теория, что подтверждается результатами экспериментов.

Вывод о независимости скорости света от скорости источника находится в согласии с принципом относительности, который утверждает одинаковость законов природы (в том числе и закона излуче-

Если же на пути светового излучения поставить стеклянную пластинку, то часть пути (длиной 1,8 м, смотрите схему установки на рисунке 146) свет должен пройти со скоростью 2 с. Затем свет поглощается стеклянной пластинкой, и *неподвижные* атомы вещества излучают свет со скоростью *c*. Следовательно, оставшуюся часть пути (7,2 м – 1,8 м) по вакуумному каналу вывода свет пройдёт с меньшей скоростью. В таком случае чередование сигналов на экране осциллографа,

должно быть различным. Однако в опыте это не наблюдалось (рис. 147, *а*, *б*).

Это означает, что *скорость света, излучённого движущимися электронами, и скорость света, излучённого неподвижными атомами вещества, одинакова!* Таким образом, результаты эксперимента безоговорочно подтверждают факт независимости скорости света от скорости источника, излучающего свет.

Если скорости других объектов относительноны и зависят от скорости и направления движения наблюдателя, то **скорость света абсолютна** – она не зависит от движения не только источника, но и наблюдателя.

На первый взгляд этот факт представляется невероятным и противоречит здравому смыслу. Но здравый смысл – это то, что почерпнуто нами из обычного жизненного опыта. Ясно, что мы не обладаем опытом, как должен выглядеть мир при движении со скоростью, близкой к скорости 300 000 км/с. В таких ситуациях необходимо действовать в рамках обычного научного метода, с помощью которого одни научные теории принимаются, а другие – отвергаются.

16.5. Что является критерием истинности научной теории?

Как вы знаете, «право на гражданство» в науке имеет только та теория, что подтверждается результатами экспериментов.

Вывод о независимости скорости света от скорости источника находится в согласии с принципом относительности, который утверждает одинаковость законов природы (в том числе и закона излуче-

ния света) во всех инерциальных системах отсчёта. Однако, с другой стороны, этот вывод противоречит «закону сложения скоростей в классической механике», а представлениям о пространстве и времени, которые отражает классическая механика.

Постулаты СТО и релятивистские эффекты. Анализ возникшего противоречия привёл Альберта Эйнштейна к выводу о необходимости пересмотра системы научных взглядов на пространство и время и создания новой теоретической концепции пространства-времени – специальной теории относительности (СТО). Наряду с Эйнштейном существенный вклад в создание СТО был сделан выдающимся физиком-теоретиком Хендриком Антоном Лоренцем (1853–1928), знаменитым французским математиком и философом Жюлем Анри Пуанкаре (1854–1912), известным немецким математиком и физиком Германом Минковским (1864–1909).

Специальная теория относительности базируется на двух постулатах: принципе относительности и постулате независимости скорости света в вакууме от скорости как источника, так и наблюдателя.

Рассмотрим некоторые явления, описываемые теорией относительности, или, как принято их называть, *релятивистские*¹ *эффекты*.

1. Относительность одновременности. Рассмотрим следующий мысленный эксперимент. Пусть вагон поезда – инерциальная система отсчёта K' – движется прямолинейно и равномерно со скоростью V относительно полотна железной дороги – инерциальной системы отсчёта K (рис. 148). Пусть на противоположных концах вагона расположены двери, при открывании которых вспыхивают лампы A' и B' , и пусть посередине вагона (в точке M') находится фотоприёмник, способный регистрировать приходящее световое излучение. Если фотоприёмник одновременно зарегистрирует свет, приходящий от

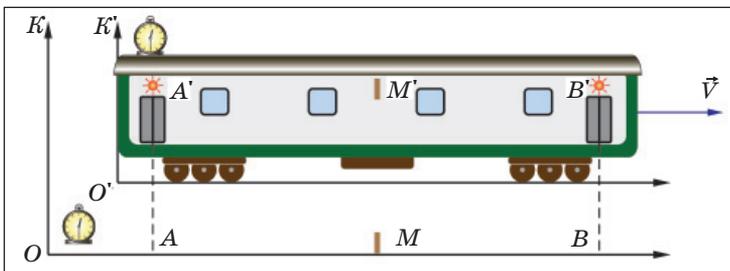


Рис. 148

¹ От латинского *relatives* – относительный. Саму теорию относительности также называют релятивистской теорией.

ламп A' и B' , то значит, двери открылись одновременно. Такой же фотоприёмник поместим в точке M на полотне железной дороги.

Допустим, в тот момент, когда точки M и M' совпадают (если смотреть с полотна дороги) – система отсчёта K , двери вагона открываются и вспыхивают лампы A' и B' . С точки зрения «станционного зрителя», находящегося в инерциальной системе отсчёта K в точке M , двери открылись одновременно – свет из точек A' и B' достигает наблюдателя M , пройдя с одной и той же скоростью c одинаковые расстояния, *одновременно*.

С точки зрения пассажира, находящегося в инерциальной системе отсчёта K' в точке M' , двери открылись *не одновременно*. Ведь «станционный зритель» видит, как наблюдатель, находящийся в точке M' , удаляется от луча света, нагоняющего его из точки A' , и движется навстречу лучу света, идущему из точки B' .

События, которые одновременны в одной инерциальной системе отсчёта K , не одновременны в другой системе K' , и наоборот (относительность одновременности).

Полученный нами вывод об относительности одновременности кажется парадоксальным. Мы «твёрдо» знаем, что если у двух наблюдателей имеются одинаковые часы, которые они сверили друг с другом (синхронизировали), то в дальнейшем независимо от того, как движутся наблюдатели относительно друг друга, часы будут показывать одинаковое время.

Но это «твёрдое знание» сформировалось при движении с малыми скоростями! Распространять его на движение со скоростями, сравнимыми со скоростью света, нет никаких оснований. Как писал Эйнштейн, «до теории относительности физика всегда «молчаливо» принимала, что указания времени обладают абсолютным, то есть независимым от состояния движения тел, значением». Теперь следует привыкнуть к мысли, что время – дело индивидуальное. Время – это то, что измеряется часами, и результаты этих измерений, утверждает теория относительности, различны в разных системах отсчёта, движущихся относительно друг друга.

2. Относительность расстояний. Представим, что нам необходимо сравнить расстояние $A'B'$, измеренное в системе K' , – длину вагона и расстояние AB – длину вагона в системе отсчёта K . Для этого нам необходимо мгновенно зафиксировать точки A и B на «полотне железной дороги» (система отсчёта K), с которыми при движении совпадают обе точки A' и B' в один и тот же момент времени, определяя его с «полотна железной дороги» (система отсчёта K). Но так как нами установлена относительность одновременности, то следует сделать вывод и об относительности расстояний.

Результаты измерений различны в разных инерциальных системах отсчёта, движущихся относительно друг друга. Иными словами, не существует привычного нам понятия абсолютной длины.

Как установил Эйнштейн, результаты измерения длины вагона AB , выполненные «станционным смотрителем» – наблюдателем, находящимся в неподвижной системе отсчёта K , дадут меньшее значение длины, чем результаты измерения длины «пассажиrom» – наблюдателем, находящимся в «движущейся» системе отсчёта K' и измеряющим длину $A'B'$ неподвижного для него вагона:

$$AB < A'B'.$$

Этот эффект называют *релятивистским сокращением размеров движущегося тела*. Он выражен тем сильнее, чем больше скорость «движущейся» системы отсчёта K' . Так, например, если бы наблюдатель находился на Солнце и измерял бы диаметр Земли, движущейся со скоростью 30 км/с, он обнаружил бы его сокращение на 6 см.

Представим, что два космических корабля находятся в состоянии относительного движения. Наблюдатель на первом корабле обнаружит сокращение размеров второго корабля вдоль направления его движения по сравнению с тем, каким был тот корабль в покое. А наблюдатель на втором корабле обнаружит сокращение размеров первого корабля. Иногда возникает вопрос – как это возможно, чтобы каждый корабль был короче другого? Но подобный вопрос неверен в принципе. Теория относительности не говорит, что каждый корабль короче другого. Она утверждает, что космонавт на каждом корабле, проведя измерения, определит, что другой корабль короче. Это совсем разные вещи. Чтобы пояснить эту мысль, вспомним известное образное сравнение. Представьте, что два наблюдателя одного роста находятся по разные стороны огромной двояковогнутой линзы. При этом каждый из них увидит другого меньше себя; но это не то же самое, что сказать, будто каждый из них меньше другого.

3. Относительность промежутков времени. Рассмотрим следующий мысленный эксперимент. Пусть космический корабль – инерциальная система отсчёта K' – пролетает со скоростью V относительно другой инерциальной системы K – Земли (рис. 149). В тот момент, когда космический корабль поравнялся с Землёй, на полу корабля включили лампу, луч света долетел до потолка корабля, отразился от зеркала и вернулся обратно, попав в фотоприёмник.

Сколько времени $\Delta t'$ займёт «путешествие света» с точки зрения космонавта – наблюдателя, находящегося в «движущейся» системе отсчёта K' ?

$$\Delta t' = 2\frac{H}{c},$$

где H – расстояние от лампы до зеркала в космическом корабле.

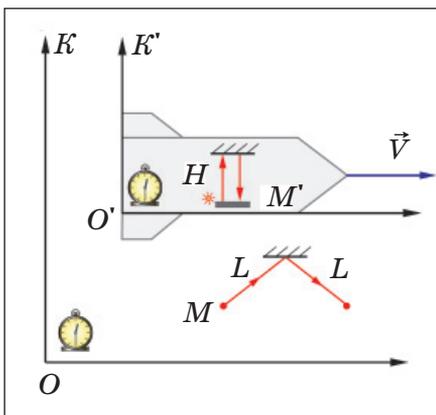


Рис. 149

Подобный эффект многократно проверялся экспериментально. Например, при взаимодействии высокоэнергичных протонов с веществом возникают заряженные частицы пи-мезоны, которые с течением времени распадаются. Среднее время жизни пи-мезона в системе отсчёта, относительно которой частица покоится, равно $2,60 \cdot 10^{-8}$ с. Если же в ускорителе частицы разогнаны до скорости, которая составляет 75 % от скорости света, то время жизни пи-мезонов возрастает в 1,5 раза, в полном соответствии с теорией относительности¹.



Релятивистский закон сложения скоростей. Вспомним, какие рассуждения сопровождали вывод закона сложения скоростей в классической механике. Мы складывали путь пассажира, измеренный в вагоне – движущейся системе отсчёта K' – и пройденный им за одну секунду, с путём вагона, измеренным стационарным смотрителем – наблюдателем неподвижной системы отсчёта K , также пройденный вагоном за одну секунду.

Теперь после анализа релятивистских эффектов нам известно, что секунда пассажира не равна секунде стационарного зрителя – в каждой инерциальной системе отсчёта собственное индивидуальное время! Теперь нам известно, что результаты измерения пространственных промежутков в движущейся и неподвижной

С точки зрения землянина – наблюдателя, находящегося в «неподвижной» системе отсчёта K , луч света движется по ломаной траектории и проходит путь $2L$ (смотрите схему на рисунке 149). С точки зрения «неподвижного» наблюдателя, время Δt «путешествия света» равно

$$\Delta t = 2L/c.$$

Очевидно, что

$$\Delta t > \Delta t'.$$

Этот эффект называют *релятивистским замедлением времени в движущейся системе отсчёта*.

¹ Отметим, что такой «экзотический» релятивистский эффект, как замедление времени в движущейся системе отсчёта, практически учитывается, например, в спутниковых системах навигации (GPS, ГЛОНАСС и другие). Необходимость введения поправок, составляющих несколько десятков микросекунд в день, обусловлена, в частности, движением спутников вокруг Земли.

системах отсчёта различны. Эти факты позволяют осознать, что релятивистский закон сложения скоростей должен, безусловно, отличаться от закона сложения скоростей в классической механике, где он имеет вид [формула (16.6)]

$$v = v' + V.$$

Релятивистский закон сложения скоростей был выведен Эйнштейном и записан им в виде

$$v = \frac{v' + V}{1 + \frac{v'V}{c^2}}, \quad (16.7)$$

где v – скорость тела относительно «неподвижной» системы отсчёта;
 v' – скорость тела относительно «движущейся» системы отсчёта;
 V – скорость движущейся системы отсчёта относительно неподвижной.

Формула (16.7) записана для случая, когда все три вектора \vec{v} , \vec{v}' и \vec{V} сонаправлены.

Проверим, что релятивистский закон сложения скоростей не противоречит второму постулату специальной теории относительности. Пусть космический корабль движется со скоростью V относительно Земли. В носовой части корабля включается прожектор, и луч света движется относительно корабля со скоростью c :

$$v' = c.$$

Проверим, что скорость луча света относительно Земли также равна c .

$$v = \frac{v' + V}{1 + \frac{v'V}{c^2}}.$$

Так как

$$v' = c,$$

то

$$v = \frac{c + V}{1 + \frac{cV}{c^2}},$$

$$v = \frac{c + V}{1 + \frac{V}{c}},$$

$$v = \frac{c + V}{\frac{c + V}{c}},$$

$$v = c.$$

Что и требовалось проверить.



16.6. Как определить скорость света в прозрачной среде, если известен абсолютный показатель преломления среды?

Релятивистский закон сложения скоростей был также успешно проверен экспериментально. Один из таких опытов заключался в измерении скорости света в движущейся воде. Трубку заполнили протекающей по ней с некоторой скоростью V водой и измерили скорость света v относительно трубки. Скорость света относительно воды v' была известна по результатам измерения абсолютного показателя преломления воды. (В этом опыте скорость света v' относительно воды – это «скорость пассажира, идущего по вагону», скорость воды V , протекающей по трубке, – это «скорость вагона относительно железнодорожного полотна», а скорость света v относительно трубки – это «скорость пассажира относительно железнодорожного полотна».)

В заключение применим релятивистский закон сложения скоростей

$$v = \frac{v' + V}{1 + \frac{v'V}{c^2}}$$

для случая медленных движений.

Если $v' \ll c$ и $v \ll c$, то слагаемым $\frac{v'V}{c^2}$ в сравнении с 1 в знаменателе данного выражения можно пренебречь, и мы видим, что

$$v = v' + V.$$

В полученном результате нет ничего неожиданного. Ведь специальная теория относительности не «отменяет» законы классической механики, а лишь ограничивает их применение случаями медленного (в сравнении со скоростью света c) движения. По этой причине все выражения релятивистской теории при малых скоростях «в обязательном порядке» переходят в выражения, которые мы получаем в рамках классической механики.

Законы Ньютона, инерциальная система отсчёта, принцип относительности в классической механике, закон сложения скоростей в классической механике, независимость скорости света в вакууме от скорости движения источника света, постулаты специальной теории относительности, релятивистские эффекты: относительность одновременности, относительность расстояний, относительность промежутков времени, релятивистский закон сложения скоростей, переход релятивистских соотношений в соотношения классической механики в случае медленных скоростей.

16.1 ● Почему в большинстве случаев словосочетания «движущаяся система отсчёта», «неподвижная система отсчёта» в тексте параграфа взяты в кавычки?

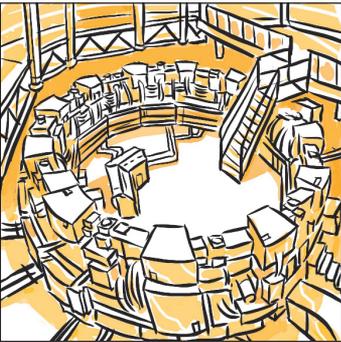
16.2 ● В 1881 году американским физиком Альбертом Абрахамом Майкельсоном (1852–1931) был поставлен опыт с целью измерения влияния движения Земли на скорость света. В 1887 году опыт был им проведён с большей точностью совместно с американским учёным Эдвардом Уильямсоном Морли (1838–1923). В 1964 году американские физики повторили опыт Майкельсона, используя в качестве источников света гелий-неоновые лазеры. Во всех случаях результат опыта Майкельсона был отрицательный – скорость света никак не зависела от скорости движения Земли и направления измеряемой скорости. Почему отрицательный результат опыта Майкельсона противоречит классической физике?

16.3 ● На космическом корабле, движущемся относительно Земли со скоростью, равной половине скорости света (фантастика), включён линейный ускоритель электронов, ускоряющий частицы вдоль направления движения космического корабля до скорости, равной половине скорости света. Чему равна скорость потока электронов относительно Земли?

16.4 ● По наблюдению земного астронома, два звёздных скопления симметрично удаляются друг от друга так, что расстояние между ними возрастает со скоростью $c/4$. Какова была бы скорость одного звёздного скопления, если её измеряли бы из другого?

16.5 ● Используя релятивистский закон сложения скоростей, докажите, что скорость света в вакууме c является максимально возможной скоростью в природе.

§ 17. ОСНОВЫ РЕЛЯТИВИСТСКОЙ ДИНАМИКИ



Теория относительности проста и красива. Просты её основные идеи, прекрасно согласующиеся с опытом, просты способы, с помощью которых можно разобраться в её удивительных результатах.

*Из книги «Теория относительности в задачах»
преподавателя Новосибирской физматшколы
И. И. Воробьёва*

Вам уже известны постулаты СТО и основные релятивистские эффекты.

Импульс в СТО. В специальной теории относительности установлено, что выражение для импульса тела p , удовлетворяющее постулатам теории относительности, имеет вид

$$p = \frac{mv}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}, \quad (17.1)$$

где m – масса тела;

v – его скорость относительно некоторой инерциальной системы отсчёта.



17.1. Соответствует ли релятивистское соотношение для импульса (17.1) в случае малой скорости ($v \ll c$) выражению для импульса в классической механике (16.4)?



При таком определении импульса соотношение (16.5), выражающее II закон Ньютона,

$$\frac{d\vec{p}}{dt} = \vec{F}$$

оказывается справедливым и в специальной теории относительности.

Пусть на первоначально покоящееся тело массой m действует постоянная сила F , под действием которой тело приходит в движение. Выясним, как в этом случае изменяется скорость тела с течением времени.

Запишем формулу II закона Ньютона:

$$\frac{dp}{dt} = F.$$

Отсюда

$$dp = F dt.$$

Интегрируя, имеем

$$\int_0^t dp = \int_0^t F dt,$$

$$p - p_0 = Ft.$$

Так как первоначально тело покоилось, то

$$p_0 = 0$$

и окончательно имеем

$$p = Ft. \quad (17.2)$$

С учётом выражения (17.1) формула (17.2) примет вид

$$\frac{mv}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = Ft. \quad (17.3)$$

Из соотношения (17.3) выразим скорость:

$$\frac{m^2 v^2}{1 - \frac{v^2}{c^2}} = F^2 t^2$$

и

$$v = \frac{\frac{F}{m} t}{\sqrt{1 + \frac{F^2 t^2}{m^2 c^2}}}. \quad (17.4)$$

Проанализируем выражение (17.4).

1. Если сила F действует на тело в течение достаточно продолжительного времени, чтобы в знаменателе выражения (17.4) можно было пренебречь единицей в сравнении со слагаемым $\frac{F^2 t^2}{m^2 c^2}$, тогда

$$v \rightarrow \frac{\frac{Ft}{m}}{\frac{Ft}{mc}},$$

$$v \rightarrow c.$$

Таким образом, скорость света в вакууме является максимально возможной скоростью физического объекта.

2. При малых скоростях, когда $Ft \ll mc$, имеем приближённое равенство

$$v = \frac{F}{m}t,$$

то есть движение является равноускоренным.

График зависимости скорости от времени показан на рисунке 150.

Энергия в СТО. Полная энергия E свободного релятивистского тела определяется выражением

$$E = \frac{mc^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}. \quad (17.5)$$

Релятивистское выражение для энергии позволяет ввести понятие, которого не существует в классической механике, — понятие *энергии покоя*. Оказывается, даже если тело не движется, оно всё равно обладает энергией, называемой энергией покоя.

Чему равна энергия покоя E_0 ? Пусть тело не движется ($v = 0$), тогда из выражения (17.5) следует, что энергия покоя E_0 равна

$$E_0 = mc^2. \quad (17.6)$$

Ниже в таблице 2 приведены значения массы и энергии покоя некоторых частиц.

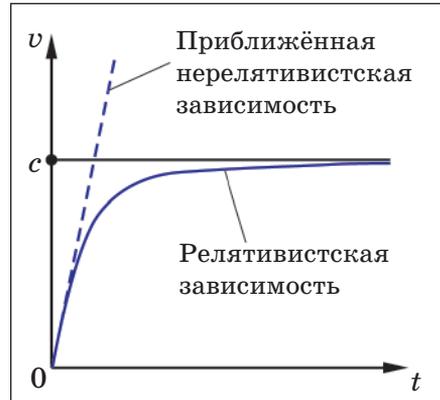


Рис. 150

Таблица 2. Масса и энергия покоя некоторых частиц

Частица	Масса частицы, кг	Энергия покоя частицы, МэВ
Нейтрон	$1,67493 \cdot 10^{-27}$	939,6
Протон	$1,67262 \cdot 10^{-27}$	938,3
Электрон	$9,10938 \cdot 10^{-31}$	0,511

Энергия покоя частиц в таблице 2 указана в мегаэлектронвольтах. Напомним, что

$$1 \text{ эВ} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ Дж},$$

$$1 \text{ МэВ} = 1,602 \cdot 10^{-13} \text{ Дж}.$$



17.2. На сколько джоулей увеличивается кинетическая энергия электрона, прошедшего ускоряющую разность потенциалов 1В?

На первый взгляд энергия покоя одной частицы невелика. Но вспомните, что число частиц в макроскопическом теле определяется постоянной Авогадро ($N_A = 6,02 \cdot 10^{23}$ 1/моль). Перемножив энергию покоя одной частицы на число частиц в одном моле, вы увидите, что энергия покоя – это колоссальный резервуар энергии.

В наше время существование энергии покоя не вызывает сомнения – ведь именно благодаря энергии покоя «работает» ядерная энергетика. При делении, например, ядра изотопа урана на два ядра-«осколка» общая масса всех продуктов реакции *меньше* массы ядра урана. Уменьшение массы означает уменьшение энергии покоя, а значит, при делении ядра урана происходит *выделение энергии* (ещё один релятивистский эффект).

Если тело движется, то его энергия E больше энергии покоя E_0 на величину кинетической энергии E_k . Таким образом, в специальной теории относительности кинетическая энергия E_k вычисляется по формуле

$$E_k = E - E_0. \quad (17.7)$$

Или с учётом выражений (17.5) и (17.6)

$$E_k = \frac{mc^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} - mc^2. \quad (17.8)$$



17.3. Как вычисляется кинетическая энергия в классической механике?



Докажем, что при медленных движениях, когда скорость движения тела v намного меньше скорости света в вакууме c , выражение (17.8) переходит в известную формулу для расчёта кинетической энергии в классической механике.

Для доказательства проведём преобразование выражения

$$\frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

с учётом того, что $v \ll c$ или $\frac{v}{c} \ll 1$.

Например, первая космическая скорость равна 8 км/с, средняя скорость орбитального движения Земли вокруг Солнца – 30 км/с.

Если $v = 30$ км/с, $c = 300\,000$ км/с, то $\frac{v}{c} = 10^{-4}$, $\frac{v^2}{c^2} = 10^{-8}$.

Итак,

$$\frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \frac{\sqrt{1 + \frac{v^2}{c^2}}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \sqrt{1 + \frac{v^2}{c^2}}} = \frac{\sqrt{1 + \frac{v^2}{c^2}}}{\sqrt{1 - \frac{v^4}{c^4}}}.$$

Если $\frac{v}{c} \ll 1$, то $\frac{v^4}{c^4}$ пренебрежимо мало и

$$\frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \sqrt{1 + \frac{v^2}{c^2}}.$$

Продолжим преобразование:

$$\sqrt{1 + \frac{v^2}{c^2}} = \sqrt{\left(1 + \frac{v^2}{2c^2}\right)^2 - \frac{v^4}{4c^4}}$$

или, вновь пренебрегая $\frac{v^4}{c^4}$,

$$\sqrt{1 + \frac{v^2}{c^2}} = \sqrt{\left(1 + \frac{v^2}{2c^2}\right)^2} = 1 + \frac{v^2}{2c^2}.$$

Подставим полученный результат в соотношение (17.8):

$$E_{\kappa} = mc^2 \left(1 + \frac{v^2}{2c^2}\right) - mc^2,$$

$$E_{\kappa} = \frac{mv^2}{2}.$$

Что требовалось доказать.

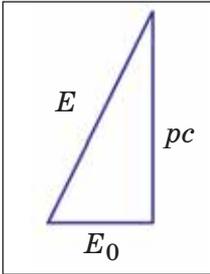


Рис. 151

Релятивистская «теорема Пифагора». Запишем одно из основных соотношений релятивистской механики, которое определяет связь между энергией E , энергией покоя E_0 и импульсом p движущегося тела (рис. 151):

$$E^2 = E_0^2 + p^2 c^2. \quad (17.9)$$

Для того чтобы убедиться в справедливости соотношения (17.9), достаточно поставить непосредственно в него выражения (17.1), (17.5) и (17.6), определяющие импульс, энергию и энергию покоя тела в релятивистской теории. Прделайте необходимые математические выкладки самостоятельно.

Примеры решения задач.

Задача 1. При какой скорости кинетическая энергия частицы будет равна её энергии покоя?

Решение:

По условию задачи,

$$E_k = E_0, \quad (17.10)$$

где E_k – кинетическая энергия частицы;
 E_0 – её энергия покоя.

Выразим кинетическую энергию частицы E_k через энергию частицы E и энергию покоя E_0 :

$$E_k = E - E_0. \quad (17.11)$$

Из соотношений (17.10) и (17.11) имеем

$$E = 2E_0.$$

Воспользуемся выражениями (17.5) и (17.6) и получим, что

$$\frac{mc^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = 2mc^2.$$

(Дальнейшие действия по решению задачи выполните самостоятельно.)

Ответ: $v = \frac{\sqrt{3}}{2} c.$

Задача 2. Какую ускоряющую разность потенциалов должен пройти протон, чтобы приобрести скорость, равную 0,6 с? Начальную скорость протона считать равной нулю.

Решение:

При прохождении протоном ускоряющей разности потенциалов U электрическое поле совершает работу A , равную

$$A = U \cdot |e|, \quad (17.12)$$

где $|e|$ – заряд протона.

Совершение работы электрическим полем приводит к увеличению кинетической энергии протона:

$$A = \Delta E_{\kappa},$$

где ΔE_{κ} – изменение кинетической энергии протона.

$$\Delta E_{\kappa} = E_{\kappa} - E_{\kappa 0},$$

E_{κ} – здесь конечная кинетическая энергия протона;

$E_{\kappa 0}$ – начальная кинетическая энергия протона (по условию задачи она равна нулю).

Таким образом,

$$A = E_{\kappa}. \quad (17.13)$$

С учётом выражений (17.8) и (17.12) соотношение (17.13) примет вид

$$U \cdot |e| = \frac{mc^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} - mc^2. \quad (17.14)$$

Вспомним, что энергия покоя E_0 рассчитывается по известной формуле (17.6):

$$E_0 = mc^2.$$

Тогда соотношение (17.14) примет вид

$$U \cdot |e| = \frac{E_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} - E_0. \quad (17.15)$$

По условию задачи, скорость протона после прохождения ускоряющего электрического поля равна

$$v = 0,6 c.$$

Подставив это значение скорости в выражение (17.15), получим

$$U \cdot |e| = \frac{1}{4} E_0.$$

Дальнейший расчёт можно упростить, если воспользоваться значением энергии покоя протона, выраженным в электронвольтах:

$$E_0 = 938,3 \text{ МэВ}.$$

Следовательно, протон должен пройти ускоряющую разность потенциалов U , равную

$$U = \frac{938,3 \cdot 10^6 \text{ В}}{4}.$$

$$U = 234,6 \cdot 10^6 \text{ В}.$$

$$U = 234,6 \text{ МВ}.$$

Ответ: $U=234,6 \text{ МВ}$.

Сравним, какой был бы получен результат, если бы расчёт проводился по формулам классической механики, где кинетическая энергия рассчитывается по формуле

$$E_k = \frac{mv^2}{2}.$$

Так как $v = 0,6 c$,
то

$$E_k = 0,18 mc^2,$$

$$E_k = 0,18E_0$$

и

$$U \cdot |e| = 0,18E_0.$$

$$U = 0,18 \cdot 938,3 \cdot 10^6 \text{ (В)}.$$

$$U = 168,9 \text{ МВ}.$$

Как видим, расхождение составляет

$$\frac{234,6 - 168,9}{234,6} \cdot 100\% = 28\%!$$

Легко убедиться, что если необходимо ускорить частицы до более высоких скоростей, то расхождение в результатах, даваемых релятивистской теорией и классической механикой, будет ещё более разительным.

Этот пример показывает, что фраза «Специальная теория относительности является инженерной наукой» не гипербола, а констатация объективного факта. Действительно, любые расчёты современных ускорителей заряженных частиц проводят исключительно по формулам специальной теории относительности Эйнштейна.



Задача 3. Покоящееся ядро массой M самопроизвольно распадается на два ядра-«осколка» массами m_1 и m_2 . Определите энергии ядер-«осколков».

Решение:

Воспользуемся законами сохранения энергии и импульса.

Запишем закон сохранения энергии:

$$E_1 + E_2 = E, \quad (17.16)$$

где E_1 и E_2 – энергии образовавшихся ядер-«осколков»;

E – энергия исходного ядра.

Так как исходное ядро покоилось, то его энергия E , очевидно, равна энергии покоя ядра E_0 :

$$E = E_0,$$

где

$$E_0 = Mc^2. \quad (17.17)$$

Это соображение позволяет конкретизировать выражение (17.16):

$$E_1 + E_2 = E_0. \quad (17.18)$$

После распада ядра-«осколки» движутся, и энергия каждого из них больше, чем соответствующая энергия покоя.

Воспользуемся релятивистской «теоремой Пифагора»:

$$E_1^2 = E_{01}^2 + p_1^2 c^2 \quad (17.19)$$

и

$$E_2^2 = E_{02}^2 + p_2^2 c^2, \quad (17.20)$$

где

$$E_{01} = m_1 c^2, \quad (17.21)$$

$$E_{02} = m_2 c^2 \quad (17.22)$$

– это энергии покоя ядер-«осколков», а p_1 и p_2 – их импульсы.



17.4. Чему равен импульс исходного ядра?

Запишем закон сохранения импульса:

$$0 = \vec{p}_1 + \vec{p}_2.$$

(При записи закона сохранения импульса учтено, что исходное ядро покоилось и его импульс равен нулю.)

Таким образом,

$$\vec{p}_1 = -\vec{p}_2$$

и

$$p_1 = p_2.$$

Последнее соотношение позволяет преобразовать уравнения (17.19) и (17.20) следующим образом: вычтем из уравнения (17.19) уравнение (17.20) и учтём, что импульсы ядер-«осколков» p_1 и p_2 равны.

Тогда

$$E_1^2 - E_2^2 = E_{01}^2 - E_{02}^2 \quad (17.23)$$

или

$$(E_1 + E_2) \cdot (E_1 - E_2) = E_{01}^2 - E_{02}^2.$$

С учётом соотношения (17.18) имеем

$$E_0 \cdot (E_1 - E_2) = E_{01}^2 - E_{02}^2,$$

$$E_1 - E_2 = \frac{E_{01}^2 - E_{02}^2}{E_0}. \quad (17.24)$$

Объединим уравнения (17.18) и (17.24) в систему:

$$\begin{cases} E_1 + E_2 = E_0, \\ E_1 - E_2 = \frac{E_{01}^2 - E_{02}^2}{E_0} \end{cases}$$

и решим данную систему уравнений:

$$E_1 = \frac{E_0^2 + E_{01}^2 - E_{02}^2}{2E_0},$$

$$E_2 = \frac{E_0^2 + E_{02}^2 - E_{01}^2}{2E_0}.$$

Осталось воспользоваться соотношениями (17.17), (17.21), (17.22) и получить ответ задачи:

$$E_1 = \frac{M^2 + m_1^2 - m_2^2}{2M} \cdot c^2,$$

$$E_2 = \frac{M^2 + m_2^2 - m_1^2}{2M} \cdot c^2.$$

Дополнительно обсудим ещё один вопрос – каково *необходимое условие*, при котором возможен распад ядра (или частицы) на два (или более) «осколка».

Из соотношений (17.19) и (17.20) имеем

$$E_1 = \sqrt{E_{10}^2 + p_1^2 c^2},$$

$$E_2 = \sqrt{E_{20}^2 + p_2^2 c^2}.$$

Тогда закон сохранения энергии [уравнение (17.16)] запишется в виде

$$E = \sqrt{E_{10}^2 + p_1^2 c^2} + \sqrt{E_{20}^2 + p_2^2 c^2}.$$

Так как

$$p_1^2 c^2 > 0,$$

$$p_2^2 c^2 > 0,$$

то

$$E > \sqrt{E_{10}^2} + \sqrt{E_{20}^2}.$$

$$E > E_{10} + E_{20}. \quad (17.25)$$

Таким образом, распад ядра (или частицы) возможен, если энергия исходного ядра (или частицы) больше суммарной энергии покоя продуктов распада.

Если исходное ядро (или частица) покоится, то соотношение (17.25), очевидно, приобретает ещё более конкретный вид

$$M > m_1 + m_2.$$

Распад неподвижного ядра (или частицы) возможен только в том случае, если масса ядра (или частицы) больше суммарной массы продуктов распада.



17.5. Имеется ли принципиальная возможность распада нейтрона на протон и другие частицы?

Имеется ли принципиальная возможность распада протона на нейтрон и другие частицы?

Импульс $p = \frac{mv}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$, скорость света в вакууме c является макси-

мально возможной скоростью физического объекта, энергия

$E = \frac{mc^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$, энергия покоя $E_0 = mc^2$, кинетическая энергия

$E_k = E - E_0$, связь между энергией, энергией покоя и импульсом в

СТО: $E^2 = E_0^2 + p^2 c^2$, неподвижная частица может распадаться на две

частицы, только если её масса больше суммарной массы образовавшихся

частиц.

17.1 ● Чему равен импульс протона, движущегося со скоростью $0,6 c$? Во сколько раз увеличится импульс частицы при увеличении её скорости до $0,8 c$?

17.2 ● При какой скорости энергия частицы будет больше её энергии покоя в 3 раза?

17.3 ● Измерение энергии и импульса частицы, образовавшейся в результате ядерной реакции, дало следующие результаты: энергия частицы $1000,85$ МэВ, импульс – $6,686 \cdot 10^{-19}$ кг·м. Определите энергию покоя и массу частицы.

17.4 ● Определите импульс электрона, прошедшего ускоряющую разность потенциалов 1 МВ.

17.5 ● Частица массой M , двигавшаяся со скоростью $0,3 c$, распадается на две частицы одинаковой массы, которые разлетаются с одинаковыми скоростями, направленными под прямым углом друг к другу. Определите массы m и скорости v частиц.

§ 18. ЭЛЕМЕНТЫ КВАНТОВОЙ ФИЗИКИ



Наука – это драма, драма идей.
Альберт Эйнштейн

При изучении физики вы уже встречались с понятием кванта.

Энергия и импульс фотона. Конец XIX – начало XX веков был ознаменован значительными успехами физики и в области теоретических воззрений, и в области практического применения физических знаний. За два века, прошедших с 1687 года, когда были опубликованы «Математические начала натуральной философии» Ньютона, посвящённые изложению классической механики, физики довели до блеска математический аппарат классической механики. Это позволяло учёным решать сложнейшие задачи, посвящённые анализу механического движения, в том числе и в области астрономии.

Разработанная Максвеллом во второй половине XIX века теория электромагнетизма предсказывала, как вы знаете, существование электромагнитных волн. Они были экспериментально обнаружены

Генрихом Герцем и затем нашли самое широкое практическое применение (радиосвязь, телевидение, радиолокация).

Однако, несмотря на выдающиеся успехи теоретической физики того времени, существовал ряд проблем, которые не находили объяснения. Теория электромагнетизма позволяла вести расчёты любого радиотехнического устройства для излучения и приёма радиоволн. Но попытки применить те же уравнения электромагнетизма для описания процессов излучения электромагнитных волн, порождаемых *атомами вещества* (тепловое излучение, видимый свет, ультрафиолетовое излучение), приводили к совершенно неприемлемым и противоречащим экспериментам результатам. Этот «бунт уравнений» в области коротковолнового излучения был так удивителен для физиков-теоретиков, что получил название «ультрафиолетовой катастрофы». Учёные убедились, что применение классической физики для описания процессов на атомарном уровне недопустимо. Оказывается, макромир (крупный масштаб) и микромир (мелкий масштаб) «живут» по разным законам природы¹.

Первый шаг в построении теории физики микромира был сделан выдающимся немецким физиком-теоретиком Максом Планком (1858–1947). Планк высказал в 1900 году основополагающую гипотезу, в дальнейшем получившую полное экспериментальное подтверждение: нагретое вещество излучает свет не непрерывно, а отдельными порциями – квантами (от латинского *quantum* – сколько). Проанализировав процесс теплового излучения, Макс Планк установил, что энергия кванта E определяется частотой излучения ν :

$$E = h\nu, \quad (18.1)$$

где h – постоянная Планка, $h = 6,626 \cdot 10^{-34}$ Дж·с.

Проведём некоторое образное сравнение. Представьте, что вы ударяете в колокол. Колеблющаяся стенка колокола толкает окружающий воздух, и возникает звуковая волна, непрерывно распространяющаяся от источника колебаний – стенки колокола – и несущая определённую энергию. В «допланковские» времена аналогичным образом представляли и процесс излучения электромагнитных волн

¹ Вероятно, после знакомства с основами специальной теории относительности, в которой утверждается непохожесть мира релятивистских скоростей и мира медленных скоростей, это утверждение нами воспринимается психологически более легко, чем научным сообществом конца XIX – начала XX веков (когда постулаты СТО ещё не были сформулированы Эйнштейном).

(теплового излучения, видимого света) нагретым телом: колеблющиеся в атоме заряженные частицы – электроны – «толкают» окружающее их электромагнитное поле и возникает электромагнитная волна, непрерывно распространяющаяся от источника колебаний – нагретого тела. По Планку же, энергия излучается дискретно (отдельными энергетическими порциями) – квантами.

В 1905 году гипотеза Макса Планка была развита Альбертом Эйнштейном, который ввёл в физику **представление о кванте электромагнитного излучения – фотоне – как реальной частице**. По Эйнштейну, квантование энергии – не удачный математический приём, позволяющий согласовать теоретические расчёты излучаемой нагретым телом энергии с экспериментальными данными, а физическая реальность. Энергия не только излучается, но и поглощается телом дискретно – квантами, фотонами.

Каковы же основные характеристики этой частицы фотона? Скорость фотона всегда равна скорости света в вакууме c . Фотон является электрически нейтральной частицей.



18.1. Как рассчитываются энергия E и импульс частицы p массой m , движущейся со скоростью v ?

Так как фотон существует только в движении, то его энергия покоя E_0 и масса m равны нулю. В отличие от известных нам частиц электрона, протона, нейтрона, чьи энергия и масса покоя отличны от нуля, *фотон относится к безмассовым частицам*.

Энергия фотона E рассчитывается по формуле (18.1), предложенной Максом Планком, а импульс фотона можно определить, если воспользоваться релятивистской «теоремой Пифагора» – формулой (17.9):

$$E^2 = E_0^2 + p^2 c^2.$$

Так как для фотона $E_0 = 0$,
то

$$p = \frac{E}{c}. \quad (18.2)$$

Вспомним, что скорость света c , частота излучения ν и длина волны излучения λ связаны известным соотношением

$$c = \lambda \nu. \quad (18.3)$$

С учётом соотношений (18.1) и (18.3) формула (18.2) примет вид

$$p = \frac{h}{\lambda}. \quad (18.4)$$



Представления о свете как потоке частиц, обладающих определённой энергией и импульсом и сохраняющих свою «индивидуальность», целостность в процессе взаимодействия с веществом, получили название *корпускулярных* представлений. (От латинского *corpusculum* – частица, тельце. Корпускулами в физике называют малые частицы материи.) Ещё Исаак Ньютон, размышляя о природе света, писал: «Не являются ли лучи света очень малыми телами, испускаемыми светящимся веществом?»

Но ньютоновские световые корпускулы не тождественны эйнштейновским фотонам. Понятие фотона существенно многограннее. Ранее при изучении таких физических явлений, как интерференция, дифракция, поляризация света, мы убедились, что свет обладает волновыми свойствами! Теперь же представлены (и число подобных примеров будет расширено) не менее убедительные доказательства корпускулярных свойств света! В одних природных условиях физик-экспериментатор обнаруживает у света волновые свойства, в других условиях – квантовые свойства. Такая парадоксальная ситуация получила в физике название корпускулярно-волнового дуализма (двойственности).

Вероятно, сейчас у вас возник «требовательный» вопрос: «Так что же такое свет – волна или частица?» Ответ на такой вопрос звучит достаточно непривычно: свет – это не волна, свет – это не частица и даже не гибрид первого и второго. Свет – это объект микромира, который в зависимости от условий, при которых он излучается, проявляет или свойства волны или свойства частицы. Свет – это объект микромира, который *нельзя представить наглядно*, но это обстоятельство не мешает учёным-физикам его изучать. Учёные осознали, что наглядные представления макромира частица – сгусток вещества, волна – колебание, распространяющееся в пространстве, не применимы (или ограниченно применимы) в микромире. (Наверное, в этом обстоятельстве – необходимости изучать наглядно непредставимые объекты и получать в результате весомые практически важные научные результаты – и заключается основная прелесть современной физики. Хотя, если быть совершенно честным перед собой, а насколько наглядны, например, наши представления ударов молекул газа об стенку баллона, когда мы анализируем причины газового давления или представления электрического тока – движения электронов по металлическому проводнику и беспрестанных «столкновений» электронов с кристаллической решёткой проводника? Вероятно, мы просто в большей мере привыкли к этим физическим ситуациям, чем к рассматриваемым квантовым явлениям.)

Нам известно, что свет – особый физический объект. Ведь только свет, в соответствии со II постулатом специальной (частной) теории относительности, вне зависимости от скорости источника света имеет в вакууме одну и ту же скорость c . Не является ли корпускулярно-волновой дуализм ещё одним уникальным свойством света, присущим только ему?

Ответ на этот вопрос оказался удивительным. Оказывается, *корпускулярно-волновой дуализм присущ всем микрообъектам* – не только фотонам, но и электронам, протонам, нейтронам, ядрам атомов и другим частицам. Для электронов, так же как и для света, как это ни парадоксально, наблюдается, например, явление дифракции (рис. 152).

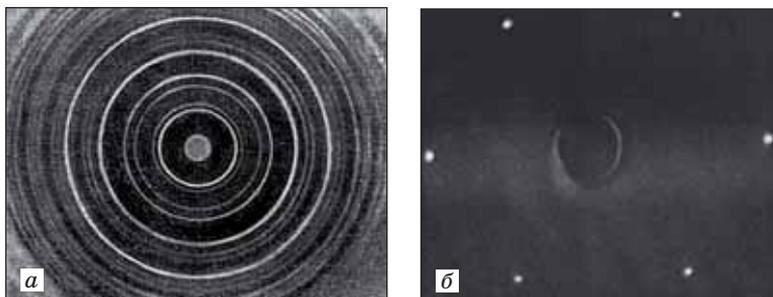


Рис. 152. Дифракция электронов:

а – дифракционная картина, получающаяся при прохождении электронов через тонкий слой серебра, состоящий из микроскопических кристалликов (из книги С. И. Вавилова «Глаз и Солнце»);

б – дифракционная картина, получающаяся при отражении медленных электронов от чистой поверхности монокристалла вольфрама (из статьи Д. В. Вялых, А. М. Шикина, Г. В. Прудниковой, А. Ю. Стародубова, В. К. Адамчука «Квантовые электронные состояния и резонансы в тонких монокристаллических слоях благородных металлов на подложке W (110)» // ж. «Физика твёрдого тела», 2002, том 44, вып. 1, с. 157–164)

То есть электрон, который мы чаще всего мыслим как частицу – маленький заряженный шарик, так же как и фотон проявляет волновые свойства.

В первой трети XX века применительно к микромиру учёными были дополнительно выработаны новые понятия физики, были осознаны новые подходы к его изучению. В результате были установлены законы микромира – возникла квантовая механика, квантовая электродинамика и другие разделы квантовой физики.

Линейчатые спектры. Идея квантования энергии позволила объяснить причину возникновения и особенности *линейчатых спектров*. Нагретое тело, например спираль лампы накаливания, излучает свет, соответствующий всем длинам волн. Если узкий пучок такого света направить на призму, то, как установил ещё Ньютон, мы увидим непрерывную цветную полоску – сплошной спектр (рис. 153).

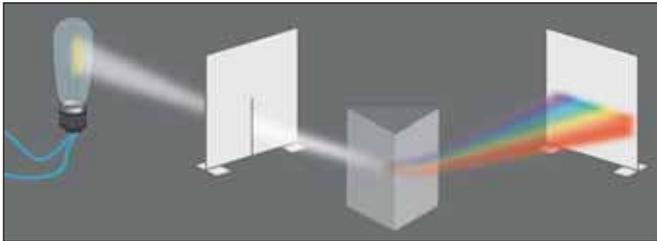


Рис. 153

Иным образом обстоит дело, если источником света будет газонаполненная трубка (рис. 154). Трубки наполнены газом – водородом, гелием, неон, криптоном – при пониженном давлении. Если на трубку подать напряжение несколько тысяч вольт, то через трубку будет протекать электрический ток – происходит газовый разряд. Электроны, движущиеся в газовой трубке, ускоряясь электрическим полем, приобретают кинетическую энергию и, сталкиваясь с атомами газа, передают им часть этой энергии. Атомы, получившие избыток энергии, излучают её – газ светится. Так как вещество в трубке находится в газообразном состоянии (это не твёрдотельная спираль лампы накаливания), то атомы газа излучают энергию независимо от других атомов вещества. Световое излучение, возникающее при газовом разряде, – это индивидуальное излучение *отдельных* атомов.

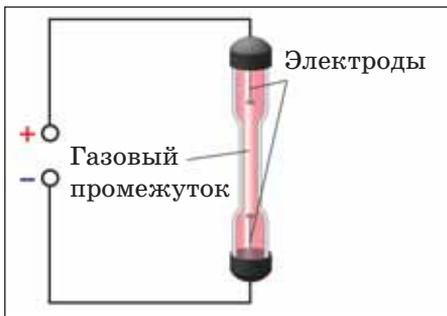


Рис. 154

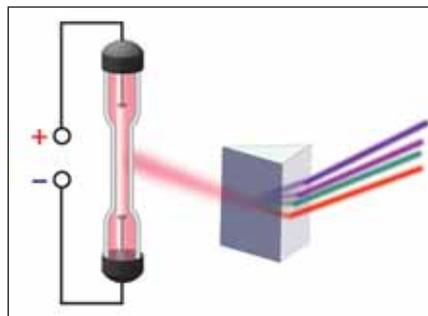


Рис. 155

Направим атомарное излучение на призму и наблюдаем возникающий при этом спектр (рис. 155). Спектр атомарного излучения – отдельные яркие линии, разделённые тёмными промежутками. Именно спектры такого вида называют линейчатыми спектрами излучения.

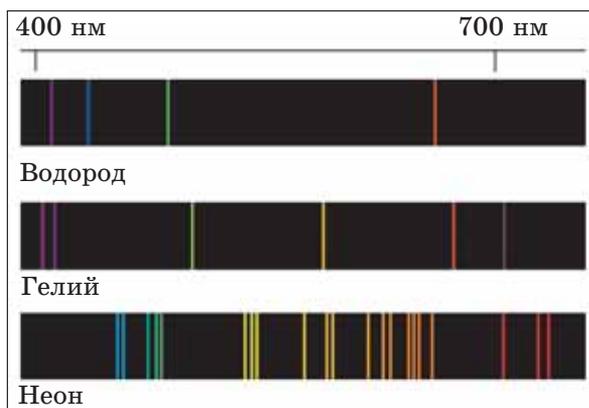


Рис. 156

Пронаблюдав линейчатые спектры различных газов – водорода, гелия, неона, криптона, – легко убедиться в том, что эти спектры различны (рис. 156). Этот факт лежит в основе *метода спектрального анализа* – определения химического состава вещества по его спектру.



18.2. Какие примеры применения метода спектрального анализа вам известны?

Первая квантовая теория строения для случая простейшего атома – атома водорода – была разработана, как вы знаете, великим датским учёным Нильсом Бором в 1913 году. Она базировалась на двух постулатах, сформулированных Бором:

– Энергия электрона в атоме не может быть произвольной. Электрон в атоме находится только в определённых неизменных со временем (стационарных) энергетических состояниях. Находясь в стационарном состоянии, атом не излучает энергию.

– Атом излучает (или поглощает) квант энергии только при переходе из одного энергетического состояния в другое. При этом энергия излучённого или поглощённого фотона равна разности энергий состояний атома, между которыми совершается переход электрона:

$$E = E_n - E_m,$$

где E_n и E_m – энергии состояний с номерами n и m соответственно.



18.3. Не противоречат ли постулаты Нильса Бора классической физике? Если да, то в чём эти противоречия заключаются?

На основе квантовых представлений Бору удалось вычислить энергии стационарных состояний для атома водорода (рис. 157). Полученная энергетическая диаграмма позволила определить, что наблюдаемые в видимом диапазоне спектральные линии водорода красного, голубого, синего, фиолетового цветов с длинами волн 656, 486, 434, 410 нм соответствуют переходам с третьего ($n = 3$), четвёртого ($n = 4$), пятого ($n = 5$), шестого ($n = 6$) энергетического уровня на второй энергетический уровень ($m = 2$).

Переходы электрона на основной энергетический уровень ($m = 1$) сопровождаются излучением фотона с большей энергией, что соответствует ультрафиолетовому диапазону.



18.4. Излучение какого диапазона возникает при переходе электрона в атоме водорода на третий энергетический уровень ($m = 3$) с более высоких энергетических уровней ($n = 4, 5, 6$ и так далее)?

Давление света. Ещё знаменитый немецкий астроном Иоганн Кеплер (1571–1630), наблюдая за формами кометных хвостов, возникающих в процессе орбитального движения кометы при её сближении с Солнцем, высказал предположение, что кометные хвосты – это потоки частиц, «сдуваемые» солнечным светом с головы кометы (рис. 158).

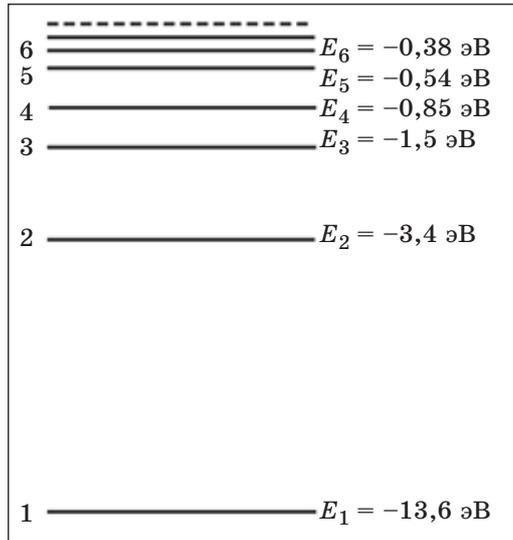


Рис. 157. Энергетическая диаграмма атома водорода. Отдельные стационарные состояния атома условно изображены определённой горизонтальной чертой – энергетическим уровнем

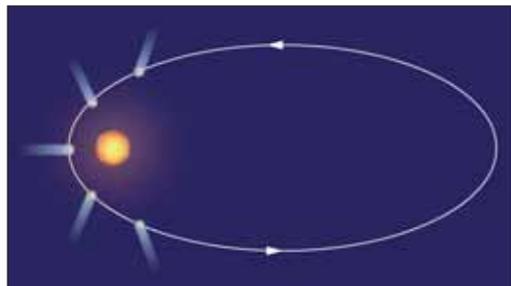


Рис. 158



Пётр Николаевич Лебедев (1866–1912). Известный русский физик-экспериментатор. Впервые измерил давление света на твёрдые тела и газы.

Уделял много времени и сил созданию научной школы, воспитанниками которой являлись многие выдающиеся учёные-физики. Имя Лебедева носит Физический институт Российской академии наук (ФИАН) – один из крупнейших научно-исследовательских центров России.

Впервые давление света было экспериментально измерено русским физиком-экспериментатором Петром Николаевичем Лебедевым (1866–1912). В ходе выполнения своих филигранных по технике исполнения экспериментов ему удалось измерить вначале давление света на поверхность твёрдого тела (1899 г.), а в дальнейшем и на газы (1907 г.). Это исследование явилось блестящим подтверждением теории электромагнетизма Максвелла, в которой было сделано теоретическое предсказание существования светового давления.

Давление света естественным образом объясняется в рамках квантовой теории света. Если свет – поток фотонов, обладающих определённым импульсом, то при взаимодействии фотонов с веществом происходит либо поглощение, либо отражение фотона. И в том, и в другом случае фотонами передаётся веществу определённый импульс, что и приводит к возникновению силового воздействия света на поверхность вещества – возникает световое давление.

Явление фотоэффекта. Одним из ярких проявлений квантовых свойств света является явление фотоэффекта. **Внутренний фотоэффект** – появление свободных носителей заряда в полупроводниках (или диэлектриках) под действием поглощённых квантов света. Если энергия кванта превышает величину «энергетического барьера» – ширину запрещённой зоны, то электрон, поглотивший квант, переходит из валентной зоны в зону проводимости. В результате возникает дополнительная пара свободных носителей заряда – электрон в зоне проводимости и дырка в валентной зоне. Если полупроводник содержит примесь, то в этом случае также возможен переход электрона с примесного уровня в зону проводимости или переход электрона из валентной зоны на примесный уровень (рис. 159). Увеличение свободных носителей заряда за счёт внутреннего фотоэффекта приводит к уменьшению электрического сопротивления вещества.

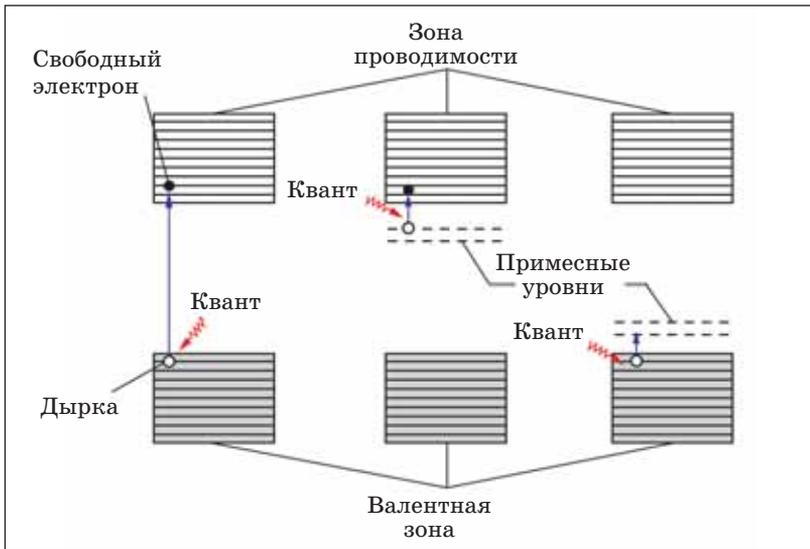


Рис. 159. Схема внутреннего фотоэффекта

Внешний фотоэффект – вырывание электронов с поверхности вещества под действием света, падающего на вещество. Явление фотоэффекта было обнаружено знаменитым немецким физиком Генрихом Герцем (1857–1894) в 1886–87 годах.

Закрепим цинковую пластинку на стержне электрометра и сообщим ей положительный заряд. Направим на пластинку поток света от оптического осветителя (рис. 160, а), а затем от источника ультрафиолетового излучения (рис. 160, б). Заряд пластины в обоих случаях не изменится.

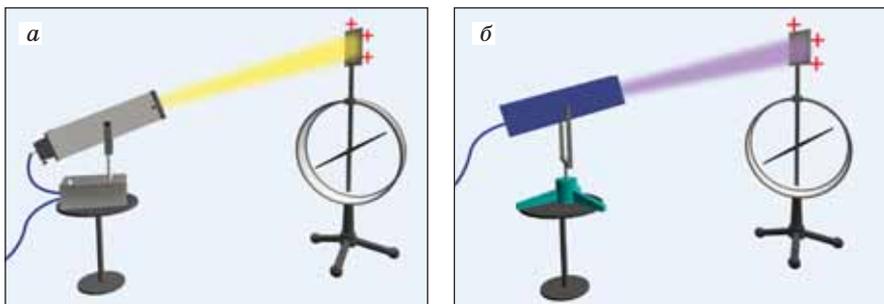


Рис. 160

Изменим условия опыта и сообщим металлической пластинке отрицательный заряд. В этом случае при освещении пластинки видимым светом заряд пластинки также не изменяется (рис. 161, а). Но если на отрицательно заряженную цинковую пластинку направить ультрафиолетовое излучение, то пластинка и электрометр быстро разряжаются, теряя заряд (рис. 161, б). Наблюдается фотоэффект: ультрафиолетовое излучение выбивает электроны с поверхности цинковой пластинки.

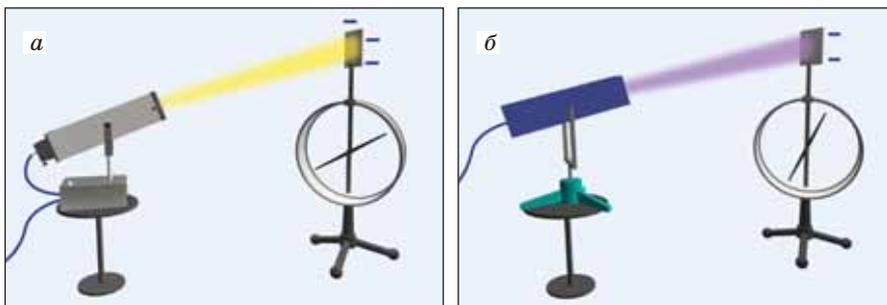


Рис. 161



18.5. Если цинковая пластинка имеет положительный заряд, то под действием ультрафиолетового излучения фотоэффект не наблюдается. Почему?

Явление фотоэффекта было исследовано рядом учёных, в том числе русским физиком Александром Григорьевичем Столетовым (1839–1896). Одна из важных особенностей фотоэффекта, установленных Столетовым, заключается в том, что для каждого из металлов существует определённая минимальная частота светового излучения, ниже которой фотоэффект не происходит. Он писал: «Разряжающим действием обладают – если не исключительно, то с громадным превосходством перед прочими – лучи самой высокой преломляемости, недостающие в солнечном спектре... Чем спектр обильнее такими лучами, тем сильнее действие». Говоря о лучах «самой высокой преломляемости», Столетов имел в виду ультрафиолетовое излучение, которого не достаёт в солнечном излучении (оно в значительной мере поглощается атмосферой), но которое в достаточном количестве имеется в свете электрической дуги. Именно электрическая дуга являлась источником света в опытах Столетова.

*Минимальная частота светового излучения, при которой прекращается фотоэффект, получила название **красной границы фотоэффекта**.*



Александр Григорьевич Столетов (1839–1896). Основные работы в области электромагнетизма, оптики, молекулярной физики. Экспериментально получил кривую намагничивания железа. Провёл систематическое исследование внешнего фотоэффекта. Основал физическую лабораторию в Московском университете.

Его брат, генерал Николай Григорьевич Столетов (1831–1912) – русский военачальник, командующий болгарским ополчением в русско-турецкой войне 1877–78 годов.

Существование красной границы фотоэффекта не находит своего объяснения с точки зрения классической физики. Ведь если свет – электромагнитная волна, то под действием электрического поля падающей на поверхность металла световой волны электрон в металле будет совершать вынужденные колебания. Тогда при значительной амплитуде электрического поля (то есть при большой интенсивности падающего света) электрон будет вырван из металла при любой частоте колебаний электромагнитного излучения. Но этого не наблюдается – красная граница фотоэффекта существует.

Все закономерности фотоэффекта нашли своё объяснение в рамках *квантовой теории фотоэффекта*, разработанной Эйнштейном. По Эйнштейну, при фотоэффекте происходит «индивидуальное» взаимодействие единичного кванта электромагнитного излучения – фотона – с единичным электроном в металле. На что при этом расходуется энергия фотона, переданная им электрону?

Во-первых, электрону необходимо, затратив энергию, совершить определённую работу, чтобы «вырваться из оков» кристаллической решётки за пределы металла. *Энергию, которую необходимо затратить для удаления электрона из металла в вакуум, называют работой выхода.* Значения работы выхода $A_{\text{вых}}$ для ряда металлов приведены в таблице 3.

Таблица 3. Работа выхода для некоторых металлов, эВ

Алюминий	4,06 – 4,26	Платина	5,12 – 5,93
Вольфрам	4,32 – 5,22	Серебро	4,52 – 4,74
Калий	2,29	Цезий	2,14
Литий	2,93	Цинк	3,63 – 4,9

Во-вторых, оставшаяся после совершения работы выхода энергия – это его кинетическая энергия E_k .

Таким образом, в соответствии с законом сохранения энергии

$$E = A_{\text{вых}} + E_k. \quad (18.5)$$

С учётом соотношения (18.1), определяющего энергию кванта,

$$E = h\nu,$$

где ν – частота излучения, вызывающего фотоэффект, и известной формулы для расчёта кинетической энергии нерелятивистской частицы

$$E_k = \frac{mv^2}{2},$$

где m – масса электрона;

v – его скорость,

формула (18.5) примет вид

$$h\nu = A_{\text{вых}} + \frac{mv^2}{2}. \quad (18.6)$$

Уравнение (18.6) получило название *уравнение Эйнштейна для фотоэффекта*.

При уменьшении частоты излучения, падающего на вещество, как следует из уравнения фотоэффекта (18.6), кинетическая энергия вырванного из металла электрона $E_k = \frac{mv^2}{2}$ уменьшается. В предельном случае, при минимальной частоте излучения, энергии кванта будет хватать только на работу выхода:

$$E = A_{\text{вых}}, \quad E_k = 0. \quad (18.7)$$

При дальнейшем понижении частоты излучения энергии кванта будет недостаточно для вырывания электрона из металла. Фотоэффект происходить не будет, сколько бы квантов ни попадало на металл. Это и есть красная граница фотоэффекта.

Рассмотренную ситуацию часто иллюстрируют следующим образом сравнением. Представьте, что армия, осаждающая крепость, должна разрушить каменные бастионы крепости. Если нападающие воспользуются рогатками и будут обстреливать крепостные укрепления горошинами или мелкими камешками, то они не достигнут успеха, даже произведя множество выстрелов. Но если в их распоряжении будет мощное орудие, то достаточно и одного выстрела, чтобы снаряд орудия выбил бы камень из стены крепости.

Как определить красную границу фотоэффекта – минимальную частоту излучения $\nu_{\text{мин}}$, при которой прекращается фотоэффект? Это несложно сделать, воспользовавшись соотношениями (18.7) и (18.1):

$$h\nu_{\text{мин}} = A_{\text{вых}}. \quad (18.8)$$

Следовательно,

$$\nu_{\text{мин}} = \frac{A_{\text{вых}}}{h}. \quad (18.9)$$

Из теории фотоэффекта Эйнштейна вытекает линейная зависимость кинетической энергии электрона, вырванного из металла при фотоэффекте, от частоты излучения, вызывающего фотоэффект. Действительно, выразим из уравнения (18.5) кинетическую энергию электрона

$$E_{\text{к}} = E - A_{\text{вых}}$$

и вновь воспользуемся соотношением (18.1).

Тогда

$$E_{\text{к}} = h\nu - A_{\text{вых}}.$$

График данной зависимости изображён на рисунке 162.

Эта теоретическая зависимость нашла полное экспериментальное подтверждение – *кинетическая энергия электрона при фотоэффекте определяется частотой излучения и не зависит от интенсивности светового излучения*. Этот результат находит своё объяснение только в рамках квантовой теории и противоречит волновым представлениям.

Пример решения задачи.

В стеклянный баллон, из которого выкачан воздух, помещены два металлических электрода (рис. 163). Через кварцевое «окошко», прозрачное не только для видимого, но и для ультрафиолетового излучения, свет падает на один из металлических электродов и вызывает фотоэффект.

Выбитые светом электроны движутся к противоположному электроду, и в цепи возникает электрический ток, который фиксируется гальванометром. Если с помощью батареи аккумуляторов между электродами создать электрическое поле, тормозящее электроны, то при некотором значении напряжения между электродами ток в цепи прекратится.

Определите значение запирающего напряжения, при котором прекратится ток в цепи, если электрод освещается монохроматическим излучением с длиной волны 254 нм. Красная граница для металла электрода составляет 270 нм.

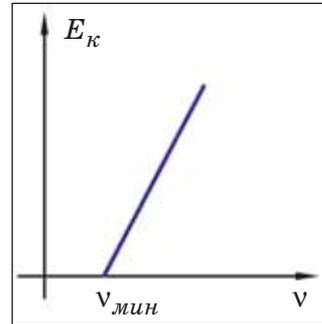


Рис. 162

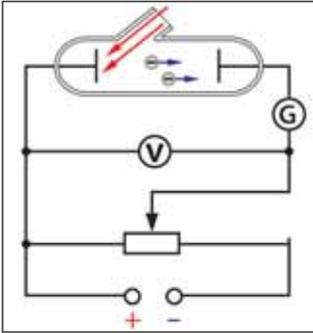


Рис. 163

Решение:

Пусть между электродами (рис. 163) создано такое электрическое поле, тормозящее движение электронов, что электрон, выбитый квантом света из электрода, практически достигает противоположного электрода. Если напряжение между электродами составляет U_3 , то тогда электрическим полем будет совершаться отрицательная работа A , равная

$$A = U_3 \cdot e,$$

где e – заряд электрона, $e = -1,602 \cdot 10^{-19}$ Кл.

$$A = -U_3 |e|. \quad (18.10)$$

За счёт работы электрического поля кинетическая энергия электрона уменьшается до нуля:

$$A = 0 - E_k, \quad (18.11)$$

где E_k – кинетическая энергия электрона, выбитого квантом света из электрода.

Из соотношений (18.10) и (18.11) получим, что

$$E_k = U_3 |e|.$$

Тогда уравнение (18.5) запишется в виде

$$E = A_{\text{вых}} + U_3 |e|.$$

С учётом соотношений (18.1) и (18.8) последнее выражение примет вид

$$h\nu = h\nu_{\text{мин}} + U_3 |e|.$$

Из известного соотношения, определяющего связь между скоростью света в вакууме c , длиной волны и частотой излучения, легко выразить частоту излучения ν , вызывающего фотоэффект, и минимальную частоту $\nu_{\text{мин}}$, при которой прекращается фотоэффект:

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

где λ – длина волны излучения, вызывающего фотоэффект, $\lambda = 254$ нм;

$$\nu_{\text{мин}} = \frac{c}{\lambda_{\text{макс}}},$$

где $\lambda_{\text{макс}}$ – длина волны излучения, при которой прекращается фотоэффект (красная граница фотоэффекта), $\lambda_{\text{макс}} = 270$ нм.

(Дальнейшие действия по решению задачи выполните самостоятельно.)

Ответ: $U_3 = 0,29$ В.

Лазеры. Чтобы атом вещества смог стать источником света (источником электромагнитного излучения), ему необходимо сообщить избыток энергии. С квантовой точки зрения это означает, что электрон в атоме перешёл из основного энергетического состояния в состояние с большей энергией. Избыток энергии атом может получить при столкновении с другим атомом или частицей (например, электроном, ускоренным электрическим полем), при поглощении атомом кванта электромагнитного излучения. В возбуждённом состоянии атом находится непродолжительное время (10^{-8} с) и возвращается в основное энергетическое состояние, излучив фотон (рис. 164, *a* – *в*, для простоты из всех энергетических уровней отдельных атомов изображены только два уровня).

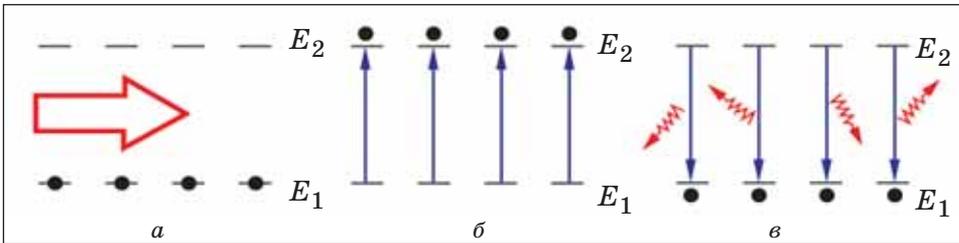


Рис. 164. Схема возбуждения и самопроизвольного излучения атомами:
a – поступление энергии к атомам;
б – возбуждение атомов, переход электрона в атоме на более высокий энергетический уровень;
в – самопроизвольное излучение атомами энергии

При этом каждый из атомов, избавляясь от избытка энергии, излучает энергию независимо от других атомов. Такой механизм излучения энергии атомами называют *самопроизвольным излучением*.

В 1916 году Эйнштейн теоретически обосновал возможность и иного механизма излучения – *индуцированного (вынужденного) излучения*. Представим, что атомы возбуждены и обладают избытком энергии (рис. 165, *a*).

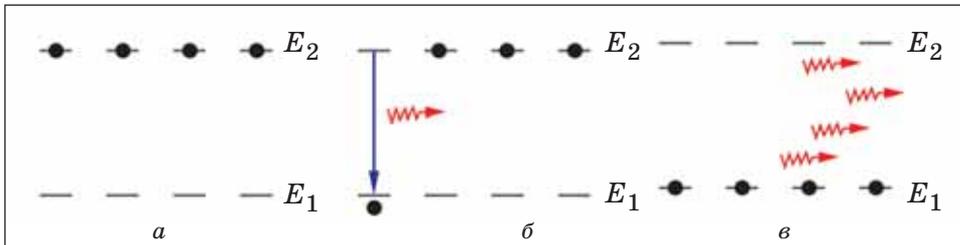


Рис. 165. Схема индуцированного излучения атомами

При переходе одного из атомов в основное энергетическое состояние излучается квант с энергией

$$E = E_2 - E_1.$$

Этот квант (рис. 165, б), двигаясь в среде возбуждённых атомов, вынуждает второй, третий, четвёртый и так далее атомы избавляться от избытка энергии, излучая точно такие же кванты, как квант – инициатор процесса (рис. 165, в). Возникающее при этом индуцированное излучение имеет высокое качество: *очень узкий пучок мощного монохроматического излучения с высокой степенью когерентности и поляризации.*

В 1954 году русские физики Николай Геннадьевич Басов (1922–2001) и Александр Михайлович Прохоров (1916–2002), а также независимо от них американский физик Чарльз Хард Таунс (род. 1915) использовали явление индуцированного излучения для создания генератора радиоволн сантиметрового диапазона. В дальнейшем эта работа учёных была удостоена Нобелевской премии (1964 г.)

Через несколько лет механизм индуцированного излучения был реализован и в оптическом квантовом генераторе электромагнитных волн (в видимом диапазоне) – *лазере*. В наше время лазеры используются так широко и повсеместно, что невозможно перечислить все сферы науки, отрасли промышленности, различные технические устройства, где применяется лазерное излучение!

Во всех лазерных устройствах использован один и тот же физический принцип их действия – создание вынужденного (индуцированного) электромагнитного излучения. Но с технической точки зрения это может осуществляться совершенно различными способами; в качестве активной среды, в которую «накачивается» энергия, трансформируемая затем в лазерное излучение, могут использоваться и газы, и жидкости, и твёрдые тела.

Так, в настоящее время широко применяются *полупроводниковые лазеры*, основой которых являются структуры, состоящие из различных полупроводников, различающихся шириной запрещённой зоны. В большинстве полупроводниковых приборов *p–n*-переходы создаются в кристаллах *одного* полупроводника за счёт внедрения соответствующих примесей, что приводит к образованию областей с электронной и дырочной проводимостью. В полупроводниковых же лазерах полупроводник с более узкой запрещённой зоной располагается между двумя полупроводниками с более широкой запрещённой зоной. Ясно, что создание такого *двойного* полупроводника является очень сложной технологической задачей. Создать

устойчивый кристалл из двух разных полупроводниковых материалов – задача посложнее, чем, перефразируя Пушкина, «в одну телегу впрячь коня и трепетную лань». Впервые эта задача была успешно решена российским физиком Жоресом Ивановичем Алфёровым (1930–2019), удостоенным за свои научные достижения Нобелевской премии 2010 г. Разработанные Алфёровым полупроводниковые структуры имеют в настоящее время самое широкое применение: источники света в волоконно-оптических линиях связи, лазерные дальномеры, лазерные указки, устройства для считывания штрих-кодов, лазеры в устройствах для записи и проигрывания CD- и DVD-дисков и так далее.

Ультрафиолетовая «катастрофа», **квантовый характер излучения и поглощения света, квант электромагнитного излучения (фотон), $E = h\nu$**
 $p = \frac{E}{c}$, $p = \frac{h}{\lambda}$, **постоянная Планка $h = 6,626 \cdot 10^{-34}$ Дж·с**, корпускулярно-волновой дуализм, дифракция электронов, **линейчатые спектры, квантовая теория Нильса Бора, спектральный анализ, давление света, явление фотоэффекта, уравнение Эйнштейна для фотоэффекта, $h\nu = A_{\text{вых}} + \frac{mv^2}{2}$, красная граница фотоэффекта, $\nu_{\text{мин}} = \frac{A_{\text{вых}}}{h}$** , зависимость кинетической энергии электрона, вырванного из металла при фотоэффекте, от частоты излучения, вызывающего фотоэффект, **лазеры**, механизмы самопроизвольного и индуцированного (вынужденного) излучения света.

18.1 ● Цинковой пластинке, закреплённой на стержне электрометра, сообщили отрицательный электрический заряд. Если пластинку осветить светом, излучаемым электрической дугой, то пластинка теряет заряд и показание электрометра уменьшается (рис. 166, а). Если же на пути света поставить прозрачное стекло, то разряда электрометра прекращается (рис. 166, б). Почему?

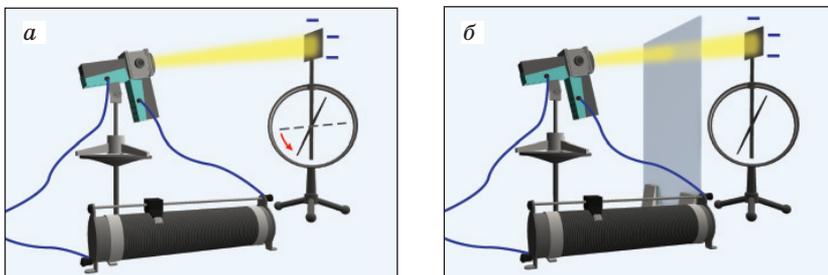


Рис. 166



18.2. Подготовьте сообщение по теме «Применение явления фотоэффекта в технике».

18.3 ● Определите, какова максимальная кинетическая энергия электронов, вырванных при фотоэффекте с поверхности цинковой пластины фотонами, обладающими импульсом $2,6 \cdot 10^{-27}$ кг·м/с. Работу выхода для цинка принять равной 4,2 эВ.

18.4 ● При какой скорости электрона его импульс будет равен импульсу γ -кванта излучения с длиной волны 1,46 пм?

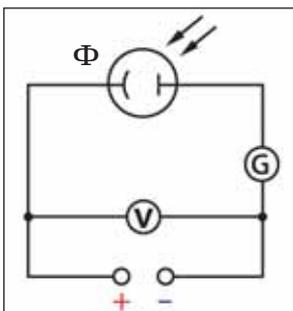


Рис. 167

18.5 ● Для определения постоянной Планка опытным путём был использован вакуумный фотоэлемент Φ , включённый в электрическую цепь согласно схеме, изображённой на рисунке 167. Фотоэлемент освещают светом, пропущенным через синий светофильтр (максимальная частота излучения, пропускаемая светофильтром, 710 ТГц). Регулируя запирающее напряжение, подаваемое на фотоэлемент, замечают, что сила тока через гальванометр G становится равной нулю при напряжении 0,99 В. Какое значение постоянной Планка было получено в эксперименте? Красная граница фотоэффекта для данного фотоэлемента составляет 650 нм.

§ 19. ЯДРО АТОМА. РАДИОАКТИВНОСТЬ



Объяснение радиоактивности, впервые данное Резерфордом, как распад до того незыблемой материи, сразу дало ключ к пониманию этого явления и направление по верному пути дальнейшие изыскания.

Из доклада Петра Леонидовича Капицы «Мои воспоминания о Резерфорде» на заседании в Лондонском Королевском обществе 17 мая 1966 г.

В общих чертах вам уже известно, каково строение атома и атомного ядра.

Строение ядра атома. Великим английским физиком Эрнестом Резерфордом выдающийся вклад (вспомните планетарную модель атома) был сделан не только в атомную, но и в ядерную физику.

Большинство научных исследований было выполнено Резерфордом с использованием α -частиц. Напомним, что α -частицы – это

ядра атомов гелия, испускаемые некоторыми химическими элементами. Скорость α -частиц приблизительно 15 000 000 м/с, что составляет 5 % от скорости света. В атомно-ядерных масштабах импульс и кинетическая энергия α -частиц представляют собой заметную величину. При попадании α -частицы в экран, покрытый сернистым цинком, возникает световая вспышка, которую можно наблюдать в микроскоп.

В 1919 г. Резерфорд изучал прохождение α -частиц через слой газа азота. Он обнаружил, что из ядер атомов азота α -частицы выбивают некоторую положительно заряженную частицу. Заряд частицы оказался численно равен заряду электрона, масса частицы равна массе ядра атома водорода. Эту положительно заряженную частицу назвали *протоном*.

В 1932 г. была открыта первая нейтральная (не имеющая электрического заряда) частица – нейтрон. Это открытие было сделано английским физиком Джеймсом Чедвиком (1891–1974). Вероятно, есть определённая историческая справедливость (если так можно выразиться о научном открытии), что нейтрон был открыт именно Чедвиком – учеником Резерфорда, которым ещё в 1920 г. было высказано предположение о существовании нейтральной частицы.

Измеренные учёными массы частиц – протона (p) и нейтрона (n) – оказались равны:

$$m_p = 1,672622 \cdot 10^{-27} \text{ кг,}$$

$$m_n = 1,674927 \cdot 10^{-27} \text{ кг.}$$

Как видно, нейтрон немного массивнее протона. Массы протона и нейтрона различаются незначительно – на 0,14 %. Но, с другой стороны, это различие в массе больше 2,5 масс электрона (e):

$$m_e = 9,109383 \cdot 10^{-31} \text{ кг.}$$

В атомной и ядерной физике в качестве единицы измерения массы принято использовать не макроскопические единицы измерения килограмм и грамм, а атомную единицу массы (а.е.м.). 1 а.е.м. равна, как вы знаете, 1/12 массы атома углерода.

$$1 \text{ а.е.м.} = 1,660540 \cdot 10^{-27} \text{ кг.}$$

Тогда

$$m_p = 1,00728 \text{ а.е.м.,}$$

$$m_n = 1,00866 \text{ а.е.м.,}$$

$$m_e = 0,0005486 \text{ а.е.м.}$$

По современным научным представлениям протон и электрон являются стабильными частицами. Свободный же нейтрон – частица нестабильная. Оказавшись «на воле», нейтрон через непродолжительное время распадается на три частицы: протон, электрон и частицу, называемую электронное антинейтрино. Физическая возможность такого распада обусловлена тем, что масса нейтрона (а значит, и его энергия покоя) больше массы протона и электрона вместе взятых.



19.1. Учёными не обнаружены свободные нейтроны ни в воздухе, ни в воде, ни в земных породах. Почему?

После открытия нейтрона физиками была выдвинута идея о *протонно-нейтронном строении ядра атома*. Число протонов в ядре, как было доказано экспериментально, численно равно порядковому номеру химического элемента в периодической системе Д. И. Менделеева.

При этом заряд ядра q равен

$$q = Z |e|,$$

где Z – число протонов в ядре.



19.2. Чему равно число электронов в электронной оболочке атома? (Учитите, что атом в целом электронейтрален.)

Обозначим число нейтронов в ядре как N . Общее число протонов и нейтронов в ядре атома химического элемента называют *массовым числом* (обозначается A).

$$A = Z + N.$$

Такое название обусловлено тем, что масса нейтрона и масса протона приблизительно равны 1 а.е.м. Следовательно, масса ядра $M_{яд}$ приблизительно равна

$$M_{яд} = A \text{ а.е.м.}$$

Пусть масса ядра некоторого химического элемента X с номером Z в периодической системе равна A . Тогда ядро такого химического элемента обозначают

$${}^A_Z X.$$

Например, ядро атома калия обозначено

$${}^{39}_{19} \text{K}.$$

Значит, число протонов в ядре равно 19,

$$Z = 19,$$

а число нейтронов в ядре равно 20 ($39 - 19$),

$$N = 20.$$

Учёными установлено, что протоны и нейтроны в составе ядра не могут удерживаться гравитационными и тем более электромагнитными силами. Взаимодействие протонов и нейтронов происходит потому, что оказывается, для такого рода частиц существует ещё один вид взаимодействия, называемый *сильным взаимодействием*.

Для случая взаимодействия протонов и нейтронов в ядре атома это сильное взаимодействие проявляет себя как *ядерные силы*. Ядерные силы обладают рядом характерных свойств. *Во-первых*, они действуют на расстоянии порядка 10^{-15} м (*короткодействующие силы*). При таком расстоянии ядерные силы так велики, что электромагнитным взаимодействием протонов в ядре можно пренебречь. *Во-вторых*, ядерные силы не зависят от электрического заряда, то есть с точки зрения сильного взаимодействия нет принципиальной разницы между свойствами протона и нейтрона. *В-третьих*, ядерные силы обладают свойством насыщения, что выражается в том, что частица в ядре взаимодействует только с ограниченным числом частиц-соседей.

Предположение о протонно-нейтронном составе атомного ядра естественным образом объясняет факт существования изотопов. **Изотопы – разновидности химического элемента, различающиеся по массе ядра.**

Ядра-изотопы обладают одинаковым зарядом, содержат *одинаковое число протонов*. По этой причине ядра-изотопы имеют одинаковые химические оболочки и вследствие этого они обладают одинаковыми химическими свойствами. Всем изотопам данного химического элемента отводится одно и то же место, одна клетка периодической системы. Различаются изотопы *числом нейтронов в ядре*, что приводит к различию масс ядер-изотопов. Так, например, у химического элемента калия встречаются следующие изотопы:



а также ещё более двух десятков других изотопов с массой от 32 до 55 а.е.м.

Среди изотопов водорода помимо лёгкого водорода ${}_{1}^1\text{H}$ наиболее известен тяжёлый изотоп ${}_{1}^2\text{H}$ – *дейтерий* и сверхтяжёлый изотоп ${}_{1}^3\text{H}$ – *тритий*.

Различия в массе ядер приводят к различию физических свойств изотопов одного и того же химического элемента. Это позволяет провести *разделение изотопов*, что неосуществимо химическими методами.



Один из методов разделения изотопов основан на движении заряженных частиц в магнитном поле.



19.3. Как устроен прибор масс-спектрограф?



Рис. 168

Пусть ядро изотопа массой $M_{яд}$, имеющее заряд q , влетело со скоростью v в однородное магнитное поле, вектор магнитной индукции которого равен B (рис. 168). Если направление скорости заряженной частицы \vec{v} перпендикулярно направлению вектора магнитной индукции \vec{B} ,

то магнитное поле действует на частицу силой Лоренца F_l , равной

$$F_l = qBv. \quad (19.1)$$

Под действием этой силы частица, как известно, изменяет направление скорости своего движения, двигаясь с центростремительным ускорением a_c по дуге окружности радиусом R .

При этом

$$a_c = \frac{v^2}{R}. \quad (19.2)$$

В соответствии со II законом Ньютона

$$F_l = M_{яд} \cdot a_c. \quad (19.3)$$

Из соотношений (19.1) – (19.3) имеем

$$R = \frac{M_{яд} v}{qB}. \quad (19.4)$$

Как следует из выражения (19.4), радиус движения частицы при заданном значении её скорости v и величине индукции магнитного поля B определяется зарядом и массой частицы. Экспериментально определив радиус движения частицы, мы тем самым сможем установить отношение заряда ядра q к его массе $M_{яд}$.

$$\frac{q}{M_{яд}} = \frac{v}{BR}.$$

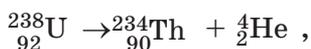
Таким образом, изотопы, имеющие одинаковый заряд ядра, но отличающиеся по массе, в магнитном поле движутся по окружностям разного радиуса, что и позволяет провести разделение изотопов.

Явление радиоактивности. Если ядро изотопа содержит значительное число протонов, то будет велика энергия кулоновского взаимодействия. Если в ядре значительна доля нейтронов, то масса такого ядра, а значит и энергия, также будут больше. В таких случаях возможно самопроизвольное превращение ядра, при котором оно избавляется от избытка энергии, становясь источником излучения. *Радиоактивность – самопроизвольное превращение изотопов одного химического элемента в изотопы другого элемента, сопровождающееся испусканием элементарных частиц или ядер гелия.*

Явление радиоактивности было открыто французским физиком Антуаном Анри Беккерелем (1852–1908) в 1896 году. Выдающийся вклад в изучение этого явления был сделан такими исследователями, как Эрнест Резерфорд, Мария Склодовская-Кюри, Пьер Кюри.

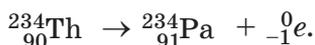
Основными случаями явления радиоактивности является α - и β -распады.

При α -распаде от ядра радиоактивного изотопа «откалывается» ядро изотопа гелия ${}^4_2\text{He}$ (α -частица). Примером α -распада является превращение изотопа урана-238:



продуктом которого является ядро изотопа тория-234.

При электронном β -распаде в ядре радиоактивного изотопа происходит превращение нейтрона в протон, и ядро покидает релятивистский (высокоскоростной) электрон. Например, изотоп тория-234 β -радиоактивен:



Продуктом β -распада («дочерним» ядром) является изотоп протактиния.



19.4. При записи уравнения β -распада у электрона (${}^0_{-1}e$) указана масса, равная нулю, хотя таковой она не является. Почему?



19.5. На сколько атомных единиц массы изменяется масса ядра радиоактивного изотопа при β -распаде? Как изменяется заряд ядра изотопа?

β -излучение в сравнении с α -излучением имеет большую проникающую способность. Пробег в воздухе составляет несколько метров, в биологической ткани – до нескольких сантиметров. Алюминиевая пластина только при толщине в несколько миллиметров способна полностью поглотить β -излучение.

Наибольшей проникающей способностью обладает ещё один компонент радиоактивного излучения – γ -излучение. Так, например, Резерфорд, сравнивая проникающую способность α -, β -, γ -излучений,

писал: «Радий испускает излучение трёх различных видов... Все эти лучи сильно различаются между собой по своей способности проходить через вещество. Приведённые ниже примерные значения толщины слоя алюминия, при прохождении которого интенсивность излучения уменьшается вдвое, наглядно иллюстрируют эти различия:

Излучение	Толщина алюминия, см
α -лучи	0,0005
β -лучи	0,05
γ -лучи	8

Гамма-излучение – это коротковолновое электромагнитное излучение с длиной волны примерно от 10^{-10} до 10^{-13} м. Гамма-излучение сопровождает процессы α - и β -распадов и является следствием перехода атомного ядра из одного энергетического состояния в другое. Оно происходит без изменения заряда ядра Z и его массового числа A .

Гамма-излучение может возникать не только при радиоактивных распадах ядер, но и при других физических процессах. Поэтому в общем случае термин « γ -излучение» применяется для обозначения электромагнитного излучения любого происхождения, если энергия кванта излучения больше примерно 100 кэВ.

Лабораторная работа «Моделирование процесса радиоактивного распада».

Оборудование: 40 квадратиков картона небольшого размера, на одной стороне которого сделана метка, стакан калориметра.

Задание 1. Сложите на дно стакана калориметра квадратики картона меткой вниз. Несколько раз встряхните стакан и высыпьте картонные квадратики из стакана на стол.

Квадратики картона в нашем опыте моделируют ядра радиоактивного изотопа, которые могут самопроизвольно распадаться. Те из квадратиков-«ядер», у которых после высыпания из стакана на стол метка оказалась сверху, будем считать «распавшимися» и отложим их в сторону.

Подсчитайте, сколько «радиоактивных ядер» имелось в начальный момент времени (нулевой опыт), сколько нераспавшихся «радиоактивных ядер» осталось после первого опыта. В таблицу для записи результатов опытов заносите общие (итоговые) данные, которые будут получены после суммирования результатов всех участников эксперимента (по всему классу).

Номер опыта n	0	1	2	3	4	5	6
Число «нераспавшихся радиоактивных ядер» N							

Повторите эксперимент, всякий раз отделяя «распавшиеся ядра».

Начертите график зависимости числа «нераспавшихся ядер» N от номера опыта n . В результате проведения лабораторной работы вы получите график, подобный тому, что изображён на рисунке 169.

При каждом опыте у вас «распадается» около 50 % от числа первоначальных «ядер». Если вначале их было, допустим, 440, после первого опыта «распадётся» половина и останется 220 «ядер». После второго опыта «распадётся» половина и останется примерно 110 «ядер» и так далее. В этом нет ничего удивительного, ведь переворачивание квадратиков картона – это *вероятностный процесс*. В половине случаев (как говорят, вероятность равна 0,5) квадратик картона «приземлится» на одну сторону и в половине случаев – на другую.

Осталось выяснить, какое отношение имеет проведённая нами лабораторная работа к явлению радиоактивности.

Осталось выяснить, какое отношение имеет проведённая нами лабораторная работа к явлению радиоактивности.

Закон радиоактивного распада. В начале XX века Эрнест Резерфорд и Фредерик Содди (1877–1956) исследовали радиоактивное газообразное вещество, названное впоследствии радоном (инертный газ). При измерении активности радиоактивного препарата (то есть числа распадов атомных ядер, происходящих в препарате за единицу времени) учёными были получены следующие результаты:

Время t , ч	0	20,8	187,6	354,9	521,9	786,9
Относительная активность A , условн. ед.	100	85,7	24,0	6,9	1,5	0,19

График зависимости активности радиоактивного препарата от времени представлен на рисунке 170. Аналогичные результаты были получены и для других радиоактивных элементов.

О чём свидетельствуют результаты эксперимента? Ясно, что активность радиоактивного препарата зависит от числа радиоактивных атомов в препарате. Примерно через 90 ч активность уменьшилась наполовину – со 100 до 50 услов-

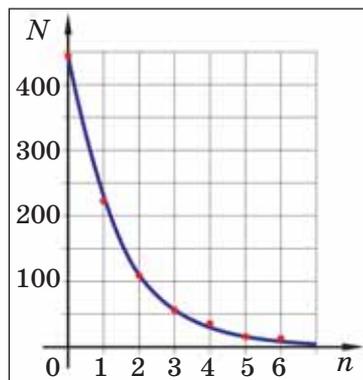


Рис. 169



Рис. 170

ных единиц. Значит, за 90 ч распалась половина радиоактивных ядер радона.

Ещё через 90 ч активность уменьшается ещё наполовину – с 50 до 25 условных единиц. Значит, опять распалась половина от первоначального числа радиоактивных ядер радона.

Проверим, сколько времени потребуется, чтобы активность вновь уменьшилась наполовину – с 25 до 12,5 условных единиц. Из графика видно, что вновь потребовалось 90 ч.

Полученные экспериментальные результаты позволили Резерфорду и Содди сформулировать закон радиоактивного распада.

Относительное количество радиоактивного вещества, превращающегося в единицу времени, есть величина постоянная.

Иными словами, скорость радиоактивного распада с течением времени не изменяется – в течение всего процесса радиоактивного распада за равные промежутки времени распадается одна и та же доля ядер радиоактивного изотопа.

Сравним реальный закон радиоактивного распада (рис. 170) с результатами, полученными нами при выполнении модельной лабораторной работы (рис. 169). При выполнении лабораторной работы мы обнаружили, что скорость «распада ядер» была неизменной – на каждом этапе опыта «распадалась» (переворачивалась меткой вверх) половина «ядер» (квадратиков картона). Это объясняется вероятностным характером процесса «распада» – переворачивания квадратиков картона.

При изучении реального процесса радиоактивного распада Резерфордом и Содди получен аналогичный результат – распад половины от первоначального числа ядер радона на каждом этапе опыта (продолжительностью около 90 ч). Таким образом, мы вправе сделать вывод, что *закон радиоактивного распада имеет вероятностный характер*. В ядре радиоактивного изотопа не накапливаются постепенно «старческие изменения», приводящие к убыстрению процесса его распада.

Какие именно ядра радиоактивного изотопа распадутся предсказать нельзя – это дело случая. Радиоактивные свойства изотопов, как правило, характеризуют периодом полураспада. **Период полураспада – это промежуток времени, в течение которого распадается половина исходного числа ядер радиоактивного изотопа.** Природные радиоактивные изотопы, в основном возникающие в цепочках распада урана и тория, имеют значения периодов полураспада от долей микросекунды до десятка миллиардов лет.

Обозначим период полураспада T . Пусть в начальный момент времени исходное число ядер радиоактивного изотопа составляло N_0 . Через промежуток времени, равный периоду полураспада, число нераспавшихся ядер N_1 будет равно $\frac{N_0}{2}$:

$$t_1 = T, \quad N_1 = \frac{N_0}{2}.$$

Ещё через промежуток времени, равный периоду полураспада T , число ядер N_2 будет равно $\frac{N_1}{2}$:

$$t_2 = 2T, \quad N_2 = \frac{N_1}{2} \text{ или } N_2 = \frac{N_0}{2^2}.$$

Аналогичным образом

$$t_3 = 3T, \quad N_3 = \frac{N_0}{2^3}, \quad N_3 = N_0 2^{-3}.$$

$$t_n = nT, \quad N = \frac{N_0}{2^n}, \quad N = N_0 2^{-n}.$$

где

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

Таким образом, математическое выражение закона радиоактивного распада имеет вид

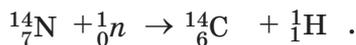
$$N = N_0 2^{-\frac{t}{T}}, \quad (19.5)$$

где N_0 – число ядер радиоактивного изотопа в начальный момент времени;

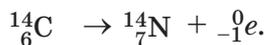
N – число оставшихся ядер изотопа (не испытавших распад) к моменту времени t .



Применение радиоактивных изотопов. Радиоактивные изотопы находят самое широкое применение в различных областях науки, техники, медицины. Например, при исторических изысканиях крайне важным является определение возраста археологических находок. Датировка событий последних ста тысяч лет производится *радиоуглеродным методом*. Причиной образования радиоактивного изотопа углерода ^{14}C является космическое излучение. В верхних слоях атмосферы первичное космическое излучение (в основном это протоны) выбивает из ядер атомов, встретившихся на его пути, нейтроны. Нейтроны бомбардируют ядра азота:



Образовавшийся радиоактивный изотоп углерода ^{14}C β -активен с периодом полураспада 5700 лет:



Атомы радиоактивного углерода в соединении с атомами кислорода образуют радиоактивный углекислый газ ${}^{14}\text{CO}_2$. Углекислый газ поглощается растениями, а оттуда радиоактивный изотоп углерода ${}^{14}\text{C}$ попадает в живые организмы. За счёт радиоактивного распада количество углерода-14 уменьшается, но если происходит обмен веществ (поглощение пищи живым организмом, углекислого газа растением), то потери изотопа ${}^{14}\text{C}$ компенсируются и в итоге за час в каждом на каждый грамм углерода органического происхождения регистрируется около 1000 β -распадов.

Как только обмен веществ прекращается (животное или растение погибло) и отсутствует поступление «свежего» радиоактивного изотопа ${}^{14}\text{C}$, активность органических остатков (числа β -распадов в единицу времени), естественно, уменьшается. Через 5700 лет (период полураспада изотопа углерода ${}^{14}\text{C}$) активность уменьшается вдвое, ещё через 5700 лет – вчетверо от первоначальной и так далее. Таким образом, измерив активность углей из костра на стоянке первобытного человека, дерева из гробницы египетских фараонов, костей мамонта, учёные могут определить их возраст.



Рис. 171. Следы человекоподобных существ, ходивших вертикально, на вулканическом пепле. Обнаружены в Танзании в 1977 г. Самая длинная цепочка следов насчитывает 22 отпечатка ног. Толщина слоя пепла составляет 15 см. Поверх слоя с отпечатками находилась пятиметровая толща крупнозернистого пепла, который завалил уже остывшие следы и тем самым сохранил их. По результатам калий-аргонового датирования возраст следов не менее 3 млн 600 тыс. лет

При необходимости определения более «солидного» возраста применяются датировки по другим радиоактивным изотопам, имеющим более продолжительный период полураспада, например *калий-аргоновое датирование* (рис. 171).

Радиоактивные изотопы помогают историкам устанавливать и отдельные события, связанные с жизнью известных личностей. Так, например, в 1692 году Ньютон в возрасте 50 лет тяжело заболел. Болезнь длилась больше года, подорвала физические и духовные силы великого учёного. В дальнейшем болезнь прошла, Ньютон прожил ещё более 33 лет, но ни он сам, ни в дальнейшем исследователи его жизни и научного творчества не определили причину этого заболевания.

Уже в восьмидесятых годах XX века было выдвинуто предположение, что болезнь Ньютона была обусловлена отравлением ртутью при проведении им химических опытов. Чтобы проверить это предположение, сохранившуюся прядь волос Ньютона подвергли так называемому *нейтронно-активационному анализу*. Каждый из 15 волосков подвергся в отдельности воздействию интенсивного потока нейтронов, что привело к возникновению радиоактивных изотопов. Анализ возникшего радиоактивного излучения позволил определить, какие химические элементы и в какой концентрации присутствуют в прядях волос. Результаты анализа показали, что средняя концентрация ртути в волосах Ньютона превосходит норму в 15 раз, что подтвердило предположение о том, что болезнь великого учёного была обусловлена сильным ртутным отравлением.

Технически важным применением радиоактивных изотопов являются *радиоизотопные источники энергии* – устройства, преобразующие энергию, выделяющуюся при радиоактивном распаде, в электроэнергию. Основная область применения таких источников энергии – автоматические межпланетные зонды. При удалении от Солнца мощность, вырабатываемая солнечными батареями, становится всё меньше и меньше, и источником энергии для обеспечения работоспособности космических аппаратов служат радиоизотопные генераторы.

Широкое применение находят радиоактивные изотопы в так называемом *методе «меченых атомов»*. Этот метод заключается в том, что часть атомов какого-либо химического элемента заменяется их аналогами – атомами радиоактивного изотопа. При этом излучение радиоактивного изотопа является той меткой, которая позволяет проследить дальнейший путь атомов данного химического элемента в химических и биологических процессах.

Использование изотопной метки позволило определить, что, например, свободный кислород, выделяющийся при фотосинтезе, первоначально входил в состав воды, а не углекислого газа. С помощью «меченых атомов» был исследован обмен веществ в организмах. Было установлено, что за непродолжительное время организм подвергается почти полному обновлению. С помощью микродоз радиоактивного изотопа натрия¹, вводимого в кровь, определяют скорость кровотока, исследуют обменные процессы между кровью и тканями.

Следует также отметить, что γ -излучение, даваемое радиоактивными изотопами, используется при лечении различных онкологических заболеваний. Чаще всего для этих целей используются γ -кванты с энергией 1,17 и 1,33 МэВ, возникающие в процессе β -распада изотопа кобальта ⁶⁰Co (период полураспада 5,3 года).

Протон, нейтрон, протонно-нейтронная модель ядра атома, ядерные силы, изотопы, разделение изотопов при их движении в магнитном поле, явление радиоактивности, α -, β -, γ -излучения, закон радиоактивного распада, вероятностный характер радиоактивного распада, период полураспада, $N = N_0 2^{-\frac{t}{T}}$, применение радиоактивных изотопов.

19.1 ● Сколько протонов и нейтронов содержится в ядрах изотопов лития-7 и бериллия-7? Какой вывод о ядерных силах, действующих в данных ядрах, можно сделать, исходя из известных вам свойств ядерных сил?

19.2 ● Запишите реакцию α -распада изотопа радона-222 (содержится среди других 60 канцерогенов в составе сигаретного дыма). Образующийся при α -распаде полония-218 свинец-214 является β -активным (электронный β -распад). Запишите реакцию β -распада изотопа свинца-214.



19.3. Подготовьте сообщение по теме «Применение радиоактивных изотопов».

19.4 ● Сверхтяжёлый изотоп водорода – тритий – β -активен с периодом полураспада 12,32 года. За какое время распадётся 75 % от исходного количества трития?

19.5 ● Природный уран состоит из двух изотопов – ${}_{92}^{235}\text{U}$ и ${}_{92}^{238}\text{U}$. Изотоп ${}_{92}^{235}\text{U}$, применяемый в ядерных реакторах, составляет всего 0,7 % от более распространённого изотопа ${}_{92}^{238}\text{U}$.

Для увеличения концентрации ${}_{92}^{235}\text{U}$ (обогащения урана) используется истечение газообразного соединения UF_6 (гексафторид урана) через маленькие отверстия (рис. 172). Газ пропускается через трубку Тр с пористыми стенками. Прошедший через

¹ Изотоп натрия ²⁴Na имеет период полураспада 15 ч. При β -распаде помимо электронов также излучаются два γ -кванта с энергией 1,38 и 2,76 МэВ.

стенки трубы газ откачивается из сосуда С. Концентрация изотопа урана-235 в молекулах UF_6 в газе, откачиваемом из сосуда С, выше, чем в исходном гексофториде урана, пропущенном через трубу Тр. Почему?

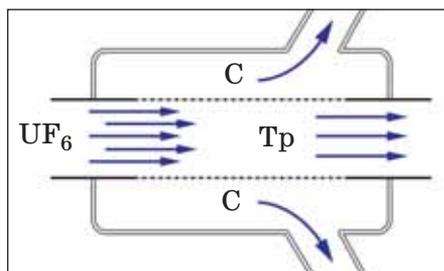


Рис. 172

§ 20. ЯДЕРНАЯ ЭНЕРГИЯ И ЯДЕРНАЯ ЭНЕРГЕТИКА



АЭС – это атомная бомба, дающая электричество.
*Высказывание, приписываемое
Петру Леонидовичу Капице*

Вам уже известно, что протоны и нейтроны в атомном ядре взаимодействуют ядерными силами.

Энергия связи. Представим себе ядро атома как капельку ядерной жидкости. Для «испарения» ядерной жидкости, для того, чтобы разделить ядро на отдельные частицы, необходимо затратить энергию, которую называют энергией связи. *Энергия связи – это энергия, которую необходимо затратить, чтобы разделить ядро атома на отдельные протоны и нейтроны.* При обратном процессе, при «конденсации» ядерной жидкости, когда ядро атома образуется из отдельных частиц, наоборот, происходит выделение энергии. По этой причине мы можем дать иное определение энергии связи. *Энергия связи – это энергия, которая выделяется при образовании ядра атома из отдельных протонов и нейтронов.*

В соответствии со знаменитым соотношением Эйнштейна между энергией покоящегося тела E_0 и его массой m

$$E_0 = mc^2 \quad (20.1)$$

мы вправе сделать достаточно неожиданный вывод.

Если образование атомного ядра из отдельных протонов и нейтронов сопровождается выделением энергии – энергии связи, то масса «ядерного строения» должна быть меньше суммарной массы «ядерных кирпичиков», пошедших на «постройку» ядра.

$$M_{яд} < Z m_p + N m_n,$$

где $M_{яд}$ – масса ядра атома;

Z – число протонов в ядре;

N – число нейтронов в ядре.

Этот вывод действительно нашёл своё подтверждение при масс-спектрометрических исследованиях изотопов. **Масса ядра атома всегда меньше суммарной массы всех протонов и нейтронов, составляющих ядро.** Значения массы атомов некоторых изотопов приведены в таблице 4.

Таблица 4. Масса атомов некоторых изотопов, а.е.м.

Изотоп	Масса нейтрального атома	Изотоп	Масса нейтрального атома
${}^1_1\text{H}$ (водород)	1,00783	${}^{11}_5\text{B}$ (бор)	11,00931
${}^2_1\text{H}$ (дейтерий)	2,01400	${}^{12}_6\text{C}$ (углерод)	12,00000
${}^3_1\text{H}$ (тритий)	3,01605	${}^{14}_7\text{N}$ (азот)	14,00307
${}^3_2\text{He}$ (гелий)	3,01602	${}^{15}_7\text{N}$ (азот)	15,00011
${}^4_2\text{He}$ (гелий)	4,00260	${}^{16}_8\text{O}$ (кислород)	15,99491
${}^6_3\text{Li}$ (литий)	6,01513	${}^{17}_8\text{O}$ (кислород)	16,99913
${}^7_3\text{Li}$ (литий)	7,01601	${}^{27}_{13}\text{Al}$ (алюминий)	26,98146
${}^8_4\text{Be}$ (бериллий)	8,00531	${}^{23}_{11}\text{Na}$ (натрий)	22,98977
${}^{10}_5\text{B}$ (бор)	10,01294	${}^{24}_{11}\text{Na}$ (натрий)	23,99096

Уменьшение массы ядра атома Δm , или, как принято говорить в ядерной физике, *дефект массы* равен

$$\Delta m = Z m_p + N m_n - M_{яд}, \quad (20.2)$$

где $M_{яд}$ определяется разностью между массой $M_{ат}$ и суммарной массой всех электронов, входящих в состав атома,

$$M_{яд} = M_{ат} - Z m_e. \quad (20.3)$$

Используя соотношение Эйнштейна (20.1), запишем формулу, позволяющую провести расчёт энергии связи $E_{св}$:

$$E_{св} = \Delta m \cdot c^2, \quad (20.4)$$

где дефект массы Δm рассчитывается по формулам (20.2) и (20.3).

Пример решения задачи.

Вычислите энергию связи лёгкого изотопа гелия ${}^3_2\text{He}$.

Решение:

Определим число протонов Z и нейтронов N в ядре изотопа гелия ${}^3_2\text{He}$:

$$Z = 2, N = 1.$$

Используя таблицу 4 и формулы (20.2), (20.3), вычислим дефект массы ядра изотопа гелия.

$$M_{яд} = 3,01602 \text{ а.е.м.} - 2 \cdot 0,0005486 \text{ а.е.м.},$$

$$M_{яд} = 3,01492 \text{ а.е.м.}$$

$$\Delta m = 2 \cdot 1,0728 \text{ а.е.м.} + 1 \cdot 1,00861 \text{ а.е.м.} - 3,01492 \text{ а.е.м.},$$

$$\Delta m = 0,00830 \text{ а.е.м.}$$

Дальнейший расчёт энергии связи можно провести непосредственно по формуле (20.4), предварительно переведя значение дефекта массы Δm из атомных единиц массы в килограммы. В результате вычислений мы получим значение энергии связи в джоулях. Но, как вам известно, в атомной и ядерной физике энергию, как правило, измеряют не в джоулях, а в электронвольтах (или в мегаэлектронвольтах).

$$1 \text{ эВ} = 1,60219 \cdot 10^{-19} \text{ Дж},$$

$$1 \text{ МэВ} = 1,60219 \cdot 10^{-13} \text{ Дж}. \quad (20.5)$$

По этой причине для упрощения дальнейших расчётов выясним, чему равна энергия E_1 (в МэВ) одной атомной единицы массы m_1 .

$$m_1 = 1 \text{ а.е.м.}$$

$$1 \text{ а.е.м.} = 1,660540 \cdot 10^{-27} \text{ кг.}$$

$$E_1 = m_1 c^2,$$

$$E_1 = 1,660540 \cdot 10^{-27} \text{ кг} \cdot (2,9979 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}})^2,$$

$$E_1 = 14,924 \cdot 10^{-11} \text{ Дж.}$$

Из соотношения (20.5) имеем

$$1 \text{ Дж} = \frac{1 \text{ МэВ}}{1,60219 \cdot 10^{-13}}.$$

Тогда

$$E_1 = 14,924 \cdot 10^{-11} \cdot \frac{1 \text{ МэВ}}{1,60219 \cdot 10^{-13}},$$

$$E_1 = 931,5 \text{ МэВ.}$$

Полученный результат мы будем в дальнейшем применять для расчёта энергии связи, составляя следующую пропорцию:

$$\frac{E_{св} - \Delta m}{E_1 - 1 \text{ а.е.м.}}$$

Так, при решении данной задачи

$$E_{св} = \frac{931,5 \text{ МэВ} \cdot 0,00830 \text{ а.е.м.}}{1 \text{ а.е.м.}},$$

$$E_{св} = 7,731 \text{ МэВ.}$$

Ответ: $E_{св} = 7,731 \text{ МэВ.}$

Помимо энергии связи $E_{св}$ для характеристики «прочности» атомного ядра используют ещё и такое понятие, как удельная энергия связи $E_{удельн}$. Удельная энергия связи показывает, какая энергия связи приходится в атомном ядре на одну частицу ядра.

$$E_{удельн} = \frac{E_{св}}{A}.$$

График зависимости удельной энергии связи $E_{удельн}$ от массового числа A (числа протонов и нейтронов в ядре) изображён на рисунке 173.



20.1. Чему равна удельная энергия связи лёгкого изотопа гелия ${}^3_2\text{He}$ (рис. 173)? Согласуется ли это с результатом, полученным при решении задачи?



20.2. Ядра каких химических элементов являются наиболее устойчивыми?

Атомные ядра, обладающие большим зарядом, для «компенсации» электростатического отталкивания протонов должны обладать повышенным числом нейтронов. В результате образуются тяжёлые ядра значительного размера (рис. 174). Это приводит к уменьшению удельной энергии связи таких ядер ввиду короткодействия ядерных сил.

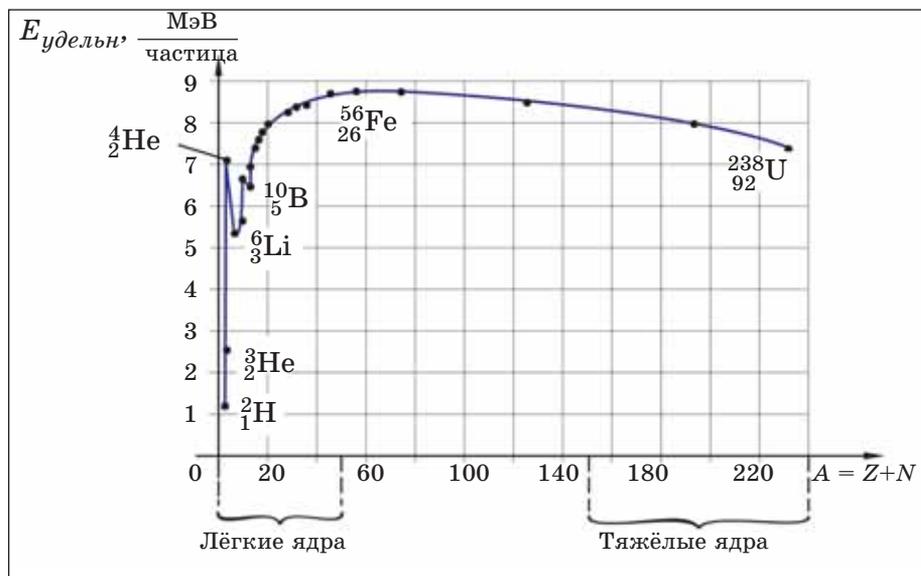


Рис. 173

Для наиболее лёгких элементов удельная энергия связи также невелика, что связано с малым количеством частиц в ядре и невозможностью «реализовать» весь потенциал их ядерного взаимодействия.

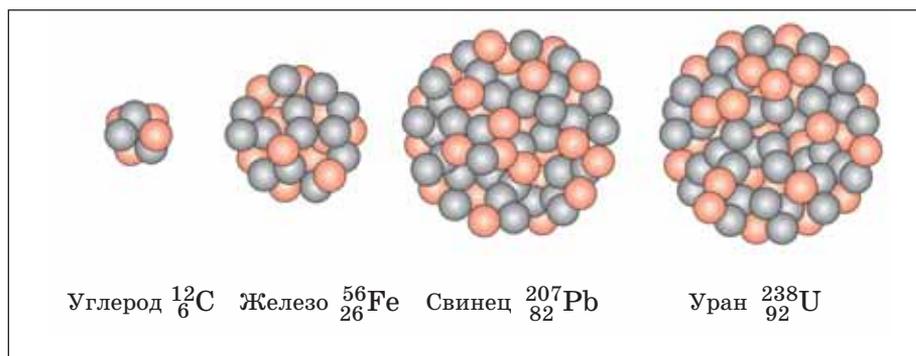


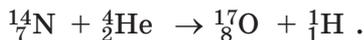
Рис. 174. Сравнительные размеры ядер изотопов

Ядерные реакции. Ядерными реакциями называют *превращения атомных ядер*, происходящих при их взаимодействии с частицами или другими ядрами.

В случае малой энергии (менее 100 МэВ) налетающей частицы основным механизмом ядерной реакции является *механизм образования составного ядра*. При этом налетающая частица поглощается ядром-мишенью, и поступившая энергия перераспределяется между протонами и нейтронами, составляющими ядро. Через продолжительное (по ядерным масштабам) время $10^{-15} - 10^{-16}$ с в возбуждённом ядре-мишени энергия случайным образом концентрируется на отдельной частице (или группе частиц) и она вылетает из возбуждённого ядра. Подтверждением реальности такого механизма является, в частности, то, что частицы вылетают из возбуждённых ядер симметрично по всем направлениям. (Возбуждённое ядро «успело забыть», каким именно образом оно получило избыток энергии.)

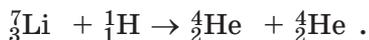
При так называемых *прямых ядерных реакциях* налетающая частица передаёт энергию не всему ядру целиком, а отдельной ядерной частице (или группе частиц), находящейся на периферии ядра. Ядерная частица, получив энергию, сразу же (через время $10^{-22} - 10^{-23}$ с) вылетает из ядра в направлении, которое зависит от направления движения частицы, «ударившей» в ядро.

Первая ядерная реакция была осуществлена в 1919 году Эрнестом Резерфордом:



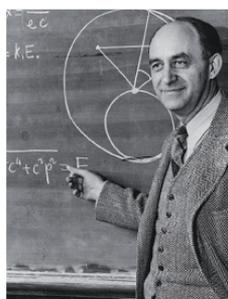
В результате бомбардировки ядер азота α -частицами физики добились их превращения в ядра изотопа кислорода.

В 1932 году сотрудниками Резерфорда был построен ускоритель заряженных частиц. Протоны, ускоренные электрическим полем, бомбардировали ядра лития, при этом происходило их превращение в две α -частицы:



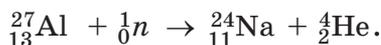
В письме к Нильсу Бору Резерфорд прозорливо заметил, что «силы и средства, затраченные на получение высоких напряжений, вознаграждены определёнными и интересными результатами. Вы легко оцените, какой широкий путь открывают эти результаты для исследований в области ядерных превращений вообще». Действительно, в наше время применение заряженных частиц, разогнанных в ускорителе, один из самых эффективных методов изучения микромира.

После открытия нейтрона физики-ядерщики расширили свой «арсенал» воздействия на атомное ядро. Для нейтрона при его взаимодействии с ядром отсутствует кулоновский (электрический) барьер. По этой причине нейтрон свободно проникает в ядро, передаёт ему энергию и вызывает ядерную реакцию.



Энрико Ферми (1901–1954). Великий итальянский физик, внёсший значительный вклад в теоретическую и экспериментальную физику XX века. Лауреат Нобелевской премии. В 1938 г. эмигрировал в США. Разработал так называемую квантовую статистику Ферми – Дирака, теорию β -распада. Открыл совместно с сотрудниками искусственную радиоактивность, вызванную нейтронами, замедление нейтронов в веществе. Под его руководством был построен первый ядерный реактор.

Впервые ядерные реакции, происходящие под действием нейтронов, были осуществлены итальянским физиком Энрико Ферми. Например, при облучении нейтронами (1_0n) алюминиевой фольги образуется радиоактивный изотоп и наблюдается искусственная радиоактивность:



Для того чтобы определить, выделяется или поглощается энергия в ядерной реакции, необходимо сравнить массы ядер и частиц до и после реакции. Так, например, в последней ядерной реакции масса до реакции составляла (смотрите таблицу 4)

$$26,98146 \text{ а.е.м.} + 1,00866 \text{ а.е.м.} = 27,99012 \text{ а.е.м.}$$

Масса после реакции

$$23,99096 \text{ а.е.м.} + 4,00260 \text{ а.е.м.} = 27,99356 \text{ а.е.м.}$$

Увеличение массы свидетельствует о поглощении энергии.



20.3. Как рассчитать величину поглощённой энергии?

Ядерный реактор. Обратимся к графику зависимости удельной энергии связи от массового числа (рис. 173). Для тяжёлого элемента, например изотопа урана ${}^{238}_{92}\text{U}$, энергия связи составляет 7,5 МэВ/частица, а для элементов средней тяжести – 8,5 МэВ/частица. Какой вывод можно сделать из этого? Если бы удалось разделить ядро урана на две части примерно равной массы, то ядра-осколки имели бы большую удельную энергию связи в сравнении с исходным ядром. Следовательно, при такой реакции происходило бы выделение около 200 МэВ при делении одного ядра урана. Велика ли эта энергия? Вспомните, что горение (реакция окисления) топлива – это реакция, связанная с «перестройкой» электронных обо-

лочек атомов, для которых характерной энергией будет энергия порядка 10 эВ. Поэтому немудрено, что «калорийность» уранового топлива в несколько миллионов раз больше «калорийности» каменного угля.



20.4. Каким образом может быть передана энергия ядрам урана для их возбуждения и осуществления реакции деления ядер урана?

В декабре 1938 года немецкие учёные Отто Ган (1879–1968) и Фриц Штрассман (1902–1980) обнаружили, что в результате облучения урана нейтронами возникают элементы средней части таблицы Менделеева, например барий. Австрийским физиком Лизе Мейтнер (1878–1968) и английским физиком Отто Робертом Фришем (1904–1979) уже в феврале 1939 года результаты опытов были верно интерпретированы как *деление урана, проходящее под действием нейтронов* (и введён сам термин «деление ядра»). Типичным примером такой реакции является следующая ядерная реакция:



Нейтрон, не имеющий электрического заряда, беспрепятственно проникает в атомное ядро. Возбуждённое ядро начинает совершать колебания, деформируется, приобретает вытянутую форму. Размер ядра увеличивается, и электрические силы отталкивания, действующие между протонами, «побеждают» короткодействующие ядерные силы. Ядро урана разрывается на два осколка, которые разлетаются, имея кинетическую энергию около 200 МэВ.

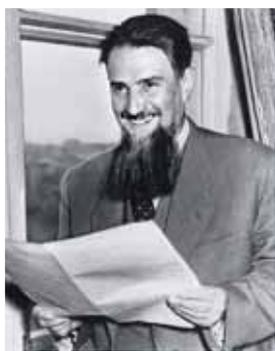
Одновременно ядрами-осколками испускаются 2–3 нейтрона. Эти нейтроны могут вызвать деление других ядер урана, в результате чего возникают нейтроны следующего поколения, которые вновь могут вызвать деление урана. Таким образом развивается цепная реакция деления урана, сопровождающаяся выделением колоссальной энергии.

Природный уран практически полностью состоит из двух изотопов ${}_{92}^{235}\text{U}$ и ${}_{92}^{238}\text{U}$, причём на изотоп ${}_{92}^{235}\text{U}$ приходится всего 0,7 % от общего количества урана. По отношению к процессу деления свойства этих изотопов сильно различаются. Ядра изотопа ${}_{92}^{235}\text{U}$ делятся под действием как быстрых, так и медленных (их называют тепловыми) нейтронов. Ядра изотопа ${}_{92}^{238}\text{U}$ делятся только под действием быстрых нейтронов (с энергией, большей 1 МэВ). При этом только в одном случае из пяти при попадании нейтрона в ядро ${}_{92}^{238}\text{U}$ происходит деление урана, а в остальных – нейтрон поглощается ядром без деления.

Большинство нейтронов, возникающих в процессе деления ядер урана, имеют энергию 1–2 МэВ (быстрые нейтроны). Так как природный уран большей частью состоит из изотопа $^{238}_{92}\text{U}$, то ядра этого изотопа, захватив нейтроны без последующего деления, делают невозможным осуществление цепной реакции деления на быстрых нейтронах.

Физики-ядерщики догадались, что для осуществления самоподдерживающейся цепной реакции на природном уране необходимо, *во-первых*, разделить ядерное топливо на отдельные топливные блоки, а *во-вторых*, расположить между топливными блоками *замедлитель* нейтронов. В качестве замедлителя нейтронов, в котором при столкновениях с ядрами вещества-замедлителя скорость нейтронов уменьшается до скорости теплового движения (2–3 км/с), использовался чистый графит. При таком конструктивном распределении урана быстрые нейтроны, образовавшиеся при делении изотопа урана $^{235}_{92}\text{U}$, вылетают из топливного бака (не успев, как правило, встретить на коротком пути ядра-поглотители изотопа $^{238}_{92}\text{U}$). Потеряв скорость в замедлителе и превратившись в тепловые нейтроны, такие нейтроны, «не представляя интереса» для урана-238, имеют возможность встретиться с ядром изотопа $^{235}_{92}\text{U}$ и вызвать его деление.

Впервые цепная реакция деления урана была осуществлена 2 декабря 1942 г. в ураново-графитовом ядерном реакторе, сооружённом в США под руководством Энрико Ферми. В нашей стране ядерный реактор заработал 25 декабря 1946 года, научный руководитель проекта – академик Игорь Васильевич Курчатов.



Игорь Васильевич Курчатов (1903–1960).

Организатор научно-технических исследований в области ядерной энергии. Под его руководством был создан первый советский атомный реактор (1946 г.), проведены испытания первой советской атомной бомбы (1949 г.), запущена первая в мире АЭС (г. Обнинск), испытана водородная бомба (1953 г.).

В 1956 г. он с группой советских учёных посетил Британский ядерный центр и высказал предложение о налаживании международного сотрудничества по решениям проблемы управляемого термоядерного синтеза.

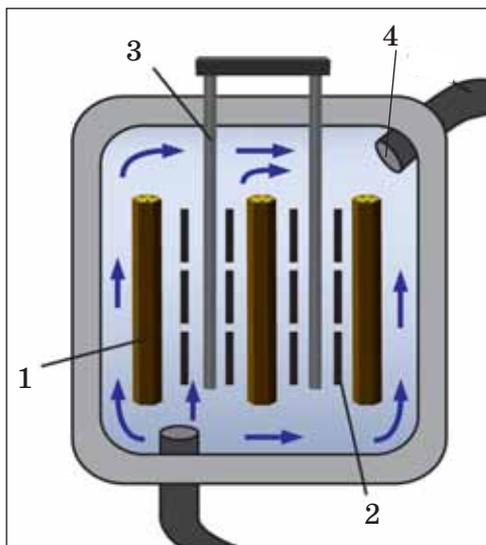


Рис. 175

Основными элементами реактора на медленных нейтронах (рис. 175) являются:

– ядерное топливо 1. Обычно ядерным топливом являются изотопы урана;

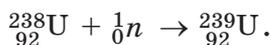
– замедлитель нейтронов 2. В качестве замедлителей используют воду, графит;

– регулирующие стержни 3. Регулирующие стержни содержат вещества, хорошо поглощающие нейтроны (кадмий, бор). С их помощью управляют ходом цепной реакции и при необходимости прерывают цепную реакцию, вводя стержни в зону ядерной реакции;

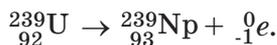
– теплоноситель 4. Используется вода, другие жидкости. С помощью теплоносителя отводят энергию, выделяющуюся при делении урана, которая в дальнейшем используется для выработки электроэнергии.

В настоящее время более чем в тридцати странах мира эксплуатируются сотни ядерных реакторов, на которых вырабатывается около 20 % электроэнергии, получаемой в мире.

Среди различных типов реакторов особый интерес представляют реакторы на быстрых нейтронах. Такие реакторы работают не на природном уране, а на обогащённой смеси изотопов, в которой содержание урана-235 составляет не менее 15 %. Замедление нейтронов не производят, но благодаря повышенному содержанию изотопа урана ${}^{235}_{92}\text{U}$ возможно протекание цепной реакции. При этом часть быстрых нейтронов поглощается изотопом урана ${}^{238}_{92}\text{U}$ и превращается в изотоп урана ${}^{239}_{92}\text{U}$:



Этот изотоп урана β -активен (с периодом полураспада 23 мин):



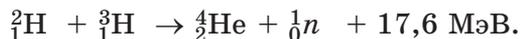
Образовавшийся изотоп нептуния, в свою очередь, также β -активен (с периодом полураспада 2,3 сут):



Плутоний-239 является относительно стабильным элементом (период его полураспада составляет 24 400 лет), но главное его достоинство заключается в том, что он, как и уран-235, способен к поддержанию цепной реакции. После поглощения нейтрона ядро ${}_{94}^{239}\text{Pu}$ делится на два осколка и испускаются 2–3 нейтрона, что позволяет продолжить процесс деления.

Таким образом, реакторы на быстрых нейтронах являются не только источником энергии, но и источником нового ядерного топлива, что станет особо актуальным после того, как имеющиеся запасы урана будут израсходованы.

Термоядерный синтез. «Спад» значения удельной энергии связи (рис. 173) наблюдается не только для самых тяжёлых элементов, но и для самых лёгких. Так удельная энергия связи изотопов водорода дейтерия ${}^2_1\text{H}$ и ${}^3_1\text{H}$ равна соответственно 1,1 и 2,8 МэВ/частица, тогда как удельная энергия изотопа гелия ${}^4_2\text{He}$ – 7,1 МэВ/частица. Следовательно, слияние ядер лёгких элементов в ядро более тяжёлого элемента должно сопровождаться выделением энергии. Например,



Такие реакции энергетически ещё более выгодны, чем реакции деления урана. Если при делении урана-235 выделяется около 1 МэВ на каждую атомную единицу массы вещества, задействованного в ядерной реакции, то в этой реакции – около 3,5 МэВ.

Под действием каких сил может происходить объединение двух ядер лёгких элементов в одно ядро более тяжёлого элемента? Ясно, что это может происходить только под действием ядерных сил. Но ядерные силы – силы короткодействующие, радиус их действия порядка 10^{-15} м. При каком же условии возможно сближение одноимённо заряженных ядер дейтерия и трития на столь малое расстояние? Такое сближение возможно только в том случае, если они обладают большой кинетической энергией.

Но средняя кинетическая энергия теплового движения частиц вещества \bar{E} , как известно из молекулярно-кинетической теории, определяет абсолютную температуру вещества:

$$\bar{E} = \frac{3}{2}kT,$$

где k – постоянная Больцмана.

Большая кинетическая энергия ядер дейтерия и трития означает, что вещество находится при огромной температуре (десятки милли-

онов кельвин). Поэтому реакции слияния лёгких ядер, происходящие при сверхвысоких температурах, называют термоядерным синтезом.

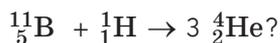
Как вы знаете, именно термоядерные реакции различного типа являются источником энергии звёзд. В земных условиях термоядерные реакции впервые были осуществлены в процессе испытаний термоядерного оружия. Необходимые для протекания термоядерной реакции температурные условия достигались путём взрыва ядерного (плутониевого) заряда. О чудовищной мощи термоядерного взрыва свидетельствует, например, тот факт, что мощность взорванной в октябре 1961 г. над полигоном архипелага Новая Земля термоядерной бомбы составляла 50 000 000 т «обычной» взрывчатки! После взрыва бомбы на высоте 4000 м ударная волна трижды обогнула земной шар.

В настоящее время усилия физиков многих стран мира сосредоточены над решением проблемы управляемого термоядерного синтеза. Сейчас признано наиболее перспективным и практически реализуемым такая конструкция термоядерных реакторов, как *токамак*. В токамаках удержание дейтериево-тритиевой смеси, разогретой протекающим в ней электрическим током до температуры в десятки миллионов кельвин, осуществляется магнитным полем особой конфигурации. Можно надеяться, что в недалёком будущем управляемый термоядерный синтез станет новым источником энергии, лишённым многих недостатков традиционной тепловой энергетики и энергетики, основанной на делении урана.

Энергия связи, дефект массы, $\Delta m = Z m_p + N m_n - M_{яд}$, $E_{св} = \Delta m \cdot c^2$, энергия, соответствующая 1 а.е.м., составляет 931,5 МэВ, удельная энергия связи $E_{удельн} = \frac{E_{св}}{A}$, $A = Z + N$, ядерные реакции, деление урана, изотопы урана ${}_{92}^{235}\text{U}$ и ${}_{92}^{238}\text{U}$, реактор на медленных нейтронах, реактор на быстрых нейтронах, термоядерный синтез, управляемый термоядерный синтез.

- 20.1 Определите удельную энергию связи изотопа азота ${}^1_7\text{N}$.

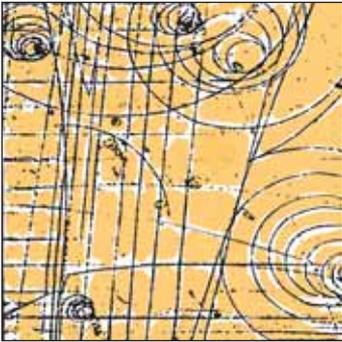
20.2 Выделяется или поглощается энергия в реакции



- 20.3 Подготовьте сообщение по теме «АЭС – аргументы за и против».

- 20.4 ● В качестве замедлителя в ядерном реакторе могут быть использованы углерод или тяжёлая вода. (Тяжёлая вода – соединение, в котором место лёгкого изотопа водорода ${}^1_1\text{H}$ в молекуле воды занимает тяжёлый изотоп водорода – дейтерий ${}^2_1\text{H}$). В каком из этих замедлителей быстрому нейтрону потребуется испытать меньше столкновений, чтобы понизить свою скорость до скорости теплового движения?
- 20.5 ● Оцените, какая масса дейтерия и трития должна была бы быть использована в установках управляемого термоядерного синтеза для того, чтобы обеспечить годовые энергетические потребности всего человечества?

§ 21. ДЕТЕКТОРЫ ЧАСТИЦ



С непривычки трудно разобраться в паутине линий, но это только потому, что вы не видели 49 999 предыдущих снимков, а если бы вам удалось их пересмотреть, вы сразу увидели бы то, что заметили поставившие опыт 33 американских физика. Вы бы увидели новую, ранее невиданную частицу.

*Из книги «Всего лишь кинематика»
(автор Г. И. Копылов)*

Вам уже известно, что в распоряжении учёных имеются приборы, позволяющие регистрировать отдельные частицы, атомные ядра и кванты излучения.

Трековые приборы. В начале XX века на заре атомной и ядерной физики приборы, с помощью которых осуществлялась регистрация частиц, было принято подразделять на *трековые приборы* и *приборы-счётчики*. В трековых приборах частица оставляла при движении видимый след, который можно было сфотографировать. Счётчик фиксировал сам факт пролёта частицы через прибор. В настоящее время *детекторы частиц* – это сложнейшие многофункциональные измерительные комплексы и подобное разделение приборов на два отдельных класса применяется только в историческом плане.

Первый трековый прибор был изобретён в 1910–1912 годах английским физиком Чарльзом Томсоном Рисом Вильсоном (1869–1959). *Камера Вильсона* – прибор для наблюдения и фотографирования следов, «авторами» которых являются движущиеся с большой скоростью заряженные частицы, пролетающие через рабочий объём прибора (рис. 176).

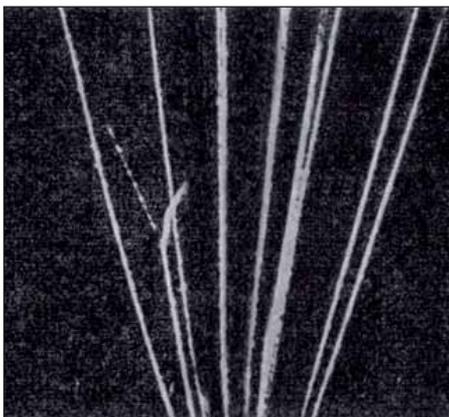


Рис. 176.

Треки α -частиц в камере Вильсона. При попадании одной из α -частиц в ядро азота из ядра был выбит протон, который оставил более тонкий след

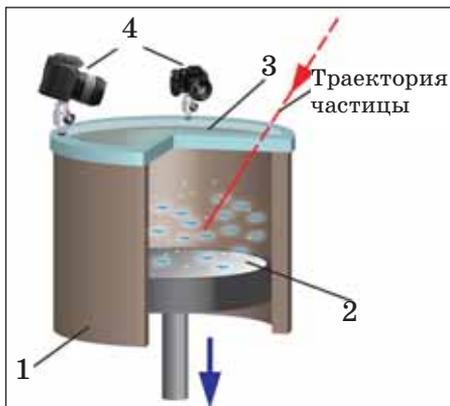


Рис. 177

момент опускания поршня (рис. 177).

При прохождении заряженной частицы через вещество она взаимодействует кулоновскими силами с электронами вещества. Электроны приобретают скорость, импульс, кинетическую энергию, при этом энергия самой частицы постепенно уменьшается.

Оценим, от чего зависят ионизационные потери энергии частицей на единицу длины её траектории в веществе. Пусть частица проходит слой вещества толщиной Δx со скоростью v , а некоторый электрон находится на расстоянии r от траектории частицы (рис. 178).

Камера (рис. 177) представляет собой герметически закрытый сосуд 1, заполненный неконденсирующимся газом (гелием, азотом, аргоном) и насыщенными парами жидкостей (воды, этилового спирта). При резком опускании поршня 2 газ и пары адиабатно расширяются, ими совершается работа, и температура в рабочем объеме прибора понижается.

Пар становится *пересыщенным* и начинается его конденсация. Центрами конденсации являются ионы, которые возникают в веществе на пути следования частицы, влетевшей в прибор. Заряженная частица, пролетая через камеру Вильсона, вызывает ионизацию атомов вещества, находящихся вблизи траектории частицы. Так на пути следования частицы возникает невидимый «ионный след». Ионы, «обрастая» молекулами, «запускают» процесс конденсации и образования мельчайших капелек жидкости. След-трек частицы, состоящий из множества капелек жидкости, становится видимым, его наблюдают через смотровое окно 3 прибора и фиксируют автоматическим фотографическим устройством 4, срабатывающим в

На электрон будет действовать со стороны частицы кулоновская сила F , равная (приблизённо)

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{eq}{r^2}, \quad (21.1)$$

где e – заряд электрона;
 q – заряд частицы;
 ϵ_0 – электрическая постоянная.

Ускорение, приобретаемое частицей, равно

$$a = \frac{F}{m_e}, \quad (21.2)$$

где m_e – масса электрона.

С другой стороны,

$$a = \frac{v_e}{t}, \quad (21.3)$$

где v_e – скорость электрона;

t – время действия кулоновской силы на электрон.

Из (21.2) и (21.3) имеем

$$v_e = \frac{F}{m_e} \cdot t. \quad (21.4)$$

Кинетическая энергия электрона E_{κ} будет равна

$$E_{\kappa} = \frac{m_e v_e^2}{2}. \quad (21.5)$$

Сила кулоновского взаимодействия F зависит от заряда частицы q :

$$F \sim q. \quad (21.6)$$

Время взаимодействия «частица – электрон» определяется временем прохождения частицей слоя вещества толщиной Δx со скоростью v .

$$t = \frac{\Delta x}{v}. \quad (21.7)$$

Таким образом, приобретаемая электроном кинетическая энергия E_{κ} определяется квадратом заряда частицы q^2 и квадратом её скорости v^2 :

$$E_{\kappa} = \frac{q^2}{v^2}.$$

Но кинетическая энергия приобретается электроном за счёт уменьшения энергии частицы. Следовательно, и уменьшение энергии частицы ΔE на единицу пути прямо пропорционально квадрату заряда частицы и обратно пропорционально квадрату её скорости.

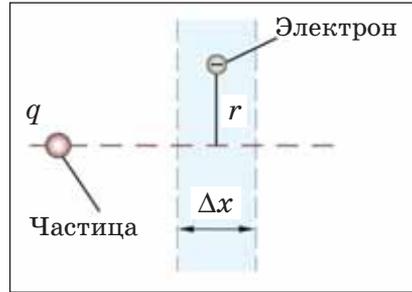


Рис. 178

$$\Delta E \sim \frac{q^2}{v^2}.$$

Но чем значительнее ионизационные потери частицы, тем больше атомов вещества ионизирует частица и тем больше ионов образуется на единицу длины траектории частицы. Следовательно, тем более толстый трек будет оставлен частицей.



21.1. Почему на рисунке 176 трек протона тоньше, чем трек α -частицы?

Одним из существенных недостатков камеры Вильсона является то, что рабочий объём камеры заполнен веществом в газообразном состоянии. Поэтому высокоэнергичные частицы, пронизывая неплотное вещество, покидают пределы камеры и учёные лишены возможности зафиксировать дальнейшие события в «жизни» частиц. В 1952 году была изобретена *пузырьковая камера* – трековый прибор, в котором использовано состояние неустойчивого равновесия перегретой жидкости. Пузырьковая камера наполнена водородом, дейтерием или пропаном, находящимися в жидком состоянии при таком высоком давлении, что жидкость лишена возможности кипеть. Быстро (за сотые доли секунды) понизив давление, переводят жидкость в перегретое состояние. В жидкости возникают центры кипения – ионы, образовавшиеся там, где пролетевшей частицей из молекул жидкости были выбиты электроны. Именно на этих центрах кипения образуются и растут пузырьки пара. Как и в случае камеры Вильсона, треки частиц фотографируют.

При изучении треков заряженных частиц камеру Вильсона и пузырьковую камеру помещали в магнитное поле. Это позволило по направлению отклонения частицы определять знаки её заряда. Измерив кривизну траектории, можно определить, каков был импульс частицы. (На рисунке-заставке рядом с эпиграфом к параграфу изображены треки частиц в пузырьковой камере, помещённой в магнитное поле.)

Лабораторная работа «Изучение треков заряженных частиц по готовым фотографиям».

Оборудование: фотография трека частиц в камере Вильсона (указан масштаб).

Указания к работе:

На снимке (рис. 179, точка *a*) видны треки частиц, которые возникли при попадании нейтрона в ядро атома газа, заполняющего камеру Вильсона. Камера помещена в магнитное поле, вектор магнитной индукции которого перпендикулярен плоскости фотографии. Модуль вектора магнитной индукции равен 1,8 Тл.

Задание 1. Определите направление силовой линии магнитного поля.

Задание 2. Длинный след на фотографии, начинающийся в точке *a* (рис. 179), оставлен протоном, который двигался влево – вверх. Начальная кинетическая энергия протона 1,8 МэВ. Почему толщина трека и его кривизна увеличиваются к концу пробега протона?

Задание 3. Почему нейтрон, попавший в ядро атома газа, не оставил трек в камере Вильсона? Ядро какого элемента распалось при попадании в него нейтрона, если известно, что при распаде образовались два протона, две α -частицы и несколько нейтронов?



21.2. Как формулируется II закон Ньютона?

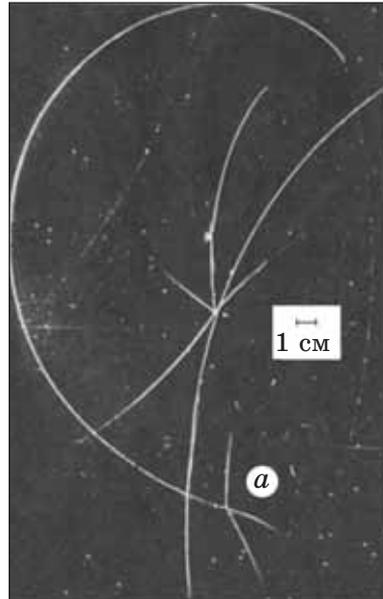


Рис. 179

Как вычисляется сила Лоренца, действующая на движущуюся заряженную частицу в магнитном поле?

Задание 4. Определите начальную скорость протона, который движется влево – вверх (рис. 179).

Определите скорость и кинетическую энергию этого же протона на заключительном участке его траектории. Для определения скорости вам необходимо будет измерить радиус кривизны траектории протона.

Для этого на конечном участке траектории проведите две хорды (рис. 180). Опустите из середины каждой из хорд перпендикуляры. Точка *O* пересечения этих перпендикуляров и будет центром окружности, по которой движется протон (докажите это).

Сделайте вывод, какое количество энергии было потрачено протоном на процесс ионизации вещества при его движении в камере Вильсона.

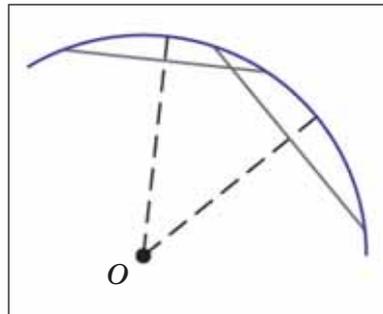


Рис. 180

Счётчик Гейгера. Один из основных приборов, регистрирующих частицы, является счётчик, изобретённый в 1908 году немецким физиком Хансом Гейгером (1882–1945), работавшим в то время под руководством Резерфорда. Счётчик (рис. 181) имеет два электрода: тонкая металлическая нить 1 является анодом и металлический цилиндр 2, расположенный вокруг нити, – катод. Электроды

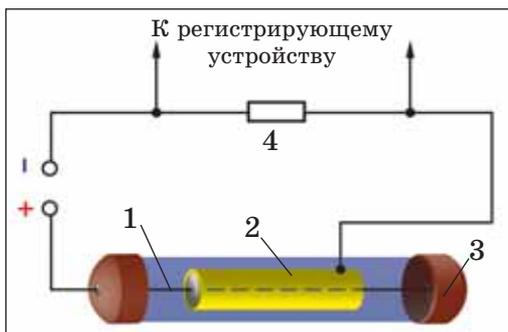


Рис. 181

заклучены в небольшой герметический резервуар 3, наполненный каким-либо газом (аргоном или неоном). В электрическую цепь между анодом и катодом включён резистор 4 с большим сопротивлением (сотни мегаом). С помощью источника 5 между электродами счётчика создаётся напряжение около 400 В.

Принцип действия прибора основан на использовании механизма газового разряда – электронной лавины. Гамма-кванты или бета-излучение (электроны), попав в счётчик Гейгера, вызывают ионизацию газа. Возникшие при этом свободные электроны движутся к аноду. Вблизи нити – анода – напряжённость электрического поля велика. Электроны ускоряются электрическим полем до такой степени, что при столкновении с атомом газа вызывают его ионизацию. В результате число электронов лавинообразно возрастает, ток через счётчик увеличивается. Из-за этого увеличивается напряжение на резисторе, включённом в цепь счётчика, и этот импульс напряжения фиксируется регистрирующей аппаратурой, подключённой к счётчику.

При протекании тока происходит перераспределение напряжения в электрической цепи счётчика. Напряжение на резисторе увеличивается, а напряжение между анодом и катодом счётчика уменьшается (ведь сопротивление газового промежутка при прохождении электронной лавины существенно меньше, чем в её отсутствие). Это приводит к уменьшению напряжённости электрического поля вблизи анода, и ионизация вещества прекращается. Такой принцип самогашения газового разряда позволяет счётчику через непродолжительное время (10^{-4} с) вернуться в исходное состояние и быть готовым к регистрации новой частицы.



21.3. К какому типу газового разряда относится газовый разряд, происходящий в счётчике Гейгера?

Дозиметрия. Дозиметрия – раздел прикладной физики, в котором рассматриваются вопросы взаимодействия ионизирующего излучения с веществом, а также последствия воздействия излучения на биологические объекты.

В зависимости от вида излучения (α -, β -, γ -излучение, поток нейтронов) и первоначальной энергии ионизирующих частиц, а также в зависимости от состава облучаемого вещества процессы взаимодействия протекают по-разному.

Заряженные частицы (α -, β -излучение), проходя вблизи атомного ядра в веществе, тормозятся электронным полем ядра и при этом испускаются кванты тормозного рентгеновского излучения. Возможны и столкновения заряженных частиц непосредственно с ядром атома.

Взаимодействие гамма-квантов с электронными оболочками атомов приводит к фотоэффекту и ионизации вещества.

Нейтроны, не имеющие электрического заряда, взаимодействуют непосредственно с ядрами атомов и могут выбить из них заряженные частицы, которые, в свою очередь, вызывают ионизацию вещества.

В результате всех процессов происходит поглощение энергии излучения веществом, и развивающиеся далее в веществе процессы определяются величиной этой энергии. По этой причине одной из дозиметрических величин является *доза излучения – энергия ионизирующего излучения, поглощённая облучаемым веществом, в расчёте на единицу его массы.*

Если обозначить поглощённую дозу излучения как D , энергию излучения как E , а массу облучаемого вещества m , то

$$D = \frac{E}{m}. \quad (21.8)$$

Единица измерения поглощённой дозы в СИ называется грей¹ (сокращённо обозначается Гр).

$$1 \text{ Гр} = \frac{1 \text{ Дж}}{1 \text{ кг}}.$$

¹ Единица измерения дозы излучения названа в честь английского физика Льюиса Харольда Грея (1905–1965), изучившего воздействие излучения на биологические объекты.

При поглощении ионизирующего излучения веществом, особенно биологическими объектами, имеет значение не только величина поглощённой энергии, но и то, в какой форме эта энергия поглощается. При одной и той же поглощённой дозе биологический эффект, возникающий в тканях живого организма, различен для разных видов излучения. Так, некоторые виды биохимических реакций под действием быстрых нейтронов протекают в 10 раз интенсивнее, чем под действием рентгеновского излучения.

Различие в биологическом действии разных видов излучения характеризуют *коэффициентом качества излучения* k . Для радиоактивного и гамма-излучения $k = 1$, для тепловых нейтронов $k = 3$, для нейтронов с энергией 0,5 МэВ $k = 10$, для α -излучения $k = 20$, для β -излучения $k = 1$.

Биологическое действие поглощённой дозы характеризуют дозиметрической величиной «эквивалентная доза». Эквивалентная доза H равна произведению поглощённой дозы D на коэффициент качества k :

$$H = kD. \quad (21.9)$$

Единица измерения эквивалентной дозы в СИ называется *зиверт*¹ (сокращённо обозначается Зв).

$$1 \text{ Зв} = \frac{1 \text{ Дж}}{1 \text{ кг}}.$$

Природные радиоактивные изотопы, содержащиеся в земной коре (уран, торий, калий и другие), космическое излучение создают *естественный радиационный фон*, который *составляет около 2 мЗв за один год*. Исследования уровня естественного радиационного фона в различных областях Земли показали значительные колебания величины годовой дозы в зависимости от геологических, почвенных, атмосферных условий. Имеются отдельные регионы на Земле, где значительные группы населения живут без последствий для своего здоровья в условиях, когда естественный радиационный фон превышает среднемировую дозу 2 мЗв за один год от 2 до 10 раз. С учётом этого за предельно допустимую дозу излучения, обусловленного внешними искусственными источниками излучения, для населения принято значение не более 5 мЗв за один год.



21.4. Чему равна мощность дозы излучения в случае достижения предельно допустимой дозы дополнительного облучения 5 мЗв за один год?

¹ Единица измерения эквивалентной дозы названа в честь шведского радиофизика Рольфа Максимилиана Зиверта (1896–1966), одного из основоположников радиобиологии.

Для измерения поглощённой дозы излучения или мощности дозы излучения применяются приборы *дозиметры* (рис. 182). В качестве чувствительного элемента дозиметров часто используется счётчик Гейгера.

Современные детекторы частиц. Современные детекторы частиц – устройства, предназначенные для регистрации и измерения параметров частиц высокой энергии, возникающих в ускорителях, а также в космических лучах.

Начиная с 2010 года развитие физики высоких энергий определяется результатами, которые получают в экспериментах на Большом адронном коллайдере. Детекторы ускорителя будут регистрировать частицы, которые возникают при столкновении протонов, разогнанных до скорости, близкой к скорости света. Также изучаются процессы, возникающие при столкновении тяжёлых ионов свинца. Всего Большой адронный коллайдер оснащён четырьмя основными и тремя вспомогательными детекторами.

Один из основных детекторов ускорителя имеет длину 45 м, диаметр 25 м, общая масса прибора около 7000 т (рис. 183). Создавали детектор и работают с ним 3000 учёных-физиков из десятков стран мира. Этот детектор предназначен для исследования протон-протонных столкновений и является многоцелевым прибором, который позволяет регистрировать частицы различных энергий. Детектор позволяет фиксировать практически все частицы, образующиеся при протон-протонных столкновениях, способен разделить различные типы частиц, точно измерить импульсы заряженных частиц и энергию частиц и излучения.

Основными элементами детектора являются:

- *внутренний детектор*. Здесь отслеживаются траектории частиц, возникающих при протон-протонных столкновениях;
- *калориметры*. Измеряется энергия частиц;
- *мюонный детектор*. Регистрируются «электронноподобные» частицы;
- *магнитная система*. Искривление трека заряженной частицы в магнитном поле позволяет определить знак заряда частицы и её импульс.



Рис. 182

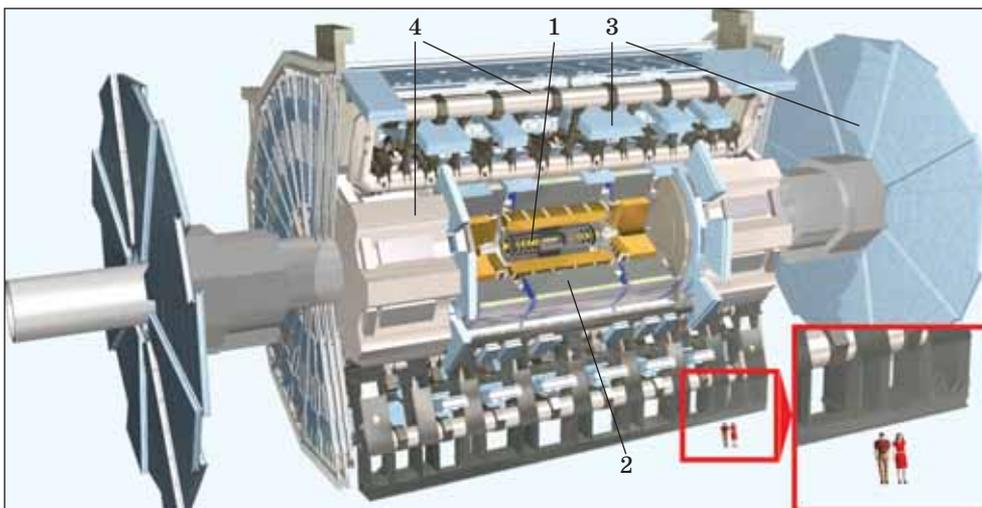


Рис. 183. Общий вид одного из основных детекторов Большого адронного коллайдера в разрезе (детектор ATLAS). Фигурки людей показаны для иллюстрации масштаба. Рисунок с сайта: atlas.ch

- 1 – внутренний детектор;
- 2 – калориметры;
- 3 – мюонный детектор;
- 4 – магнитная система



Внутренний детектор расположен вокруг вакуумной трубы, по которой движутся потоки ускоренных протонов. Радиус внутреннего детектора более 1 м, длина 7 м. Ближе всего к трубе находится *пиксельный детектор*. Он состоит из трёх слоёв кремниевых детекторов. Около двух тысяч отдельных чувствительных матриц, каждая из которых имеет собственный электронный блок, содержат в общей сложности 80 000 000 пикселей и покрывают площадь в 1,7 м кв.

Далее располагается восьмислойный *полупроводниковый трековый детектор* с общей площадью 60 м кв., который функционирует подобно пиксельному детектору. Пиксельный и полупроводниковый трековые детекторы позволяют для каждой заряженной частицы, вылетающей из области протон-протонных столкновений, зафиксировать пространственные координаты семи точек на треке частицы. Координаты частиц измеряются на расстоянии до 0,5 м от области столкновений протонов с точностью, которая достигает 10 мкм.

Третий компонент внутреннего детектора – *трековый детектор переходного излучения*. Этот детектор состоит из длинных (длиной более 1 м) трубок диаметром 4 мм, которые наполнены смесью газов (ксенон, углекислый газ, кислород). Внутренняя поверхность трубочки покрыта проводящим слоем (он является катодом). Внутри трубочки находится тончайшая вольфрамовая нить (она является анодом). Между анодом и катодом поддерживается напряжение в несколько киловольт. При прохождении заряженной частицы через трубочку газовая смесь ионизируется и фиксируется импульс тока (от каждой трубочки идёт канал считывания информации, всего их 420 000).

Калориметры детектора содержат две измерительные системы. *Внутренний электромагнитный* калориметр представляет собой «стопку» свинцовых пластин (металл-поглотитель), в зазоре между которыми находятся жидкий аргон при низкой температуре (чувствительный элемент). Пролетающая сквозь калориметр заряженная частица порождает электромагнитное излучение, которое ионизирует аргон. Величина ионизации и позволяет оценить энергию пролетевшей частицы. *Внешний калориметр* содержит органический сцинтиллятор – вещество, в котором под воздействием ионизирующих излучений возникают световые вспышки (сцинтилляции). Световые вспышки регистрируются фотоумножителями и превращаются в электрический сигнал.

Мюонный детектор предназначен для регистрации «электронно-подобных частиц» (мюонов), в нём используют газовые трубки, как и в детекторе переходного излучения, но большего диаметра.

Магнитная система детектора содержит различные типы электромагнитов, которые создают магнитные поля, необходимые для искривления траекторий частиц, движущихся в детекторе. Все электромагниты являются сверхпроводящими, и при протекании по ним электрического тока силой тока в десятки килоампер создаётся магнитное поле в несколько тесла (что в десятки тысяч раз больше магнитного поля Земли).

Трек, камера Вильсона, уменьшение энергии частицы на единицу пути $\Delta E \sim \frac{q^2}{v^2}$, пузырьковая камера, **счётчик Гейгера**, **дозиметрия**, **поглощённая доза излучения** $D = \frac{E}{m}$, **грей**, **коэффициент качества излучения**, **эквивалентная доза** $H = kD$, **зиверт**, **естественный радиационный фон** составляет около **2 мЗв за один год**, современные детекторы частиц.

21.1 ● Наряду с камерой Вильсона во второй половине XX века широко использовалась диффузионная камера. Несомненным достоинством диффузионной камеры являлось то, что она была прибором непрерывного действия. Схематически диффузионная камера изображена на рисунке 184. Камера представляет собой герметически замкнутый сосуд со стеклянными боковыми цилиндрическими стенками и верхним стеклом 1. Металлическое дно камеры 2 охлаждается до температуры от -60 до -70 °С твёрдой углекислотой 3. В верхней части камеры имеется металлическое кольцо 4 с жёлобом, заполненным метиловым спиртом. Температура кольца и спирта от $+10$ до $+20$ °С. Спирт является источником пара 5. Наблюдаемые треки частиц фиксируют с помощью фотографического устройства 6. Объясните принцип действия прибора.

21.2 ● Чему равна годовая доза излучения за счёт естественного радиационного фона в местности, где показания дозиметра в среднем совпадают с показанием дозиметра, изображённого на рисунке 182?



21.3. Что такое радиофобия? Чем она вызвана?

21.4 ● Доза гамма-излучения, представляющая смертельную опасность для человеческого организма, составляет 5–6 Гр. Оцените, сколько горячего чая должен выпить человек, чтобы его организм получил такое же количество энергии, как и в случае гамма-облучения. Чем обусловлено негативное воздействие излучения на живые организмы?

21.5 ● На рисунке 185 воспроизведены треки двух частиц в камере Вильсона, помещённой в магнитное поле. Вектор магнитной индукции поля перпендикулярен плоскости фотографии. Начальные скорости частиц одинаковы и перпендикулярны силовым линиям магнитного поля. Известно, что нижний трек на фотографии принадлежит протону. Какой частице принадлежит верхний трек? Ответ обосновать.

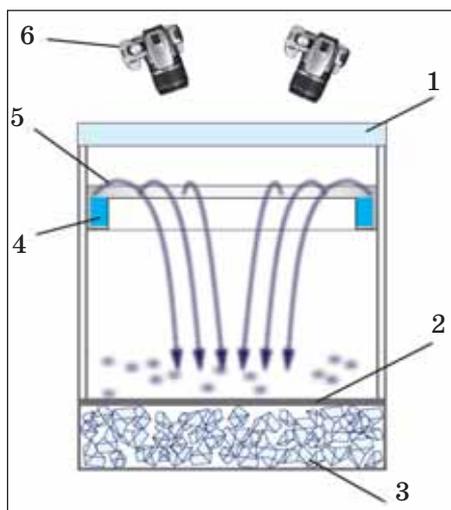


Рис. 184



Рис. 185

§ 22. ЭЛЕМЕНТАРНЫЕ ЧАСТИЦЫ И ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ



С незапамятных времён люди хотели охватить многогранность природы посредством наименьшего возможного числа элементарных концепций.

*Из Нобелевской речи
пакистанского физика-теоретика
Абдуса Салáма¹ (1926–1996).*

Две с половиной тысячи лет поисков. Вопросы о том, что является первоосновой нашего мира, как устроен окружающий мир, волновали людей издревле. Идея дискретности материи восходит к древнегреческому философу и учёному-энциклопедисту Демокриту (около 460 до н. э. – год смерти неизвестен; по некоторым сведениям, прожил свыше ста лет). Он представлял мир как систему *атомов* – неделимых частиц, хаотично движущихся в пустом пространстве. Атомы при своём движении сталкиваются и либо разлетаются, либо сцепляются между собой, что приводит к возникновению сложных тел.

Идеи Демокрита об атомарном строении вещества перешли из плоскости философии в плоскость естественных наук лишь через много веков. Только в первой половине XVII века в трудах французского учёного Пьера Гассенди (1592–1655) вводится термин «*молекула*», трактуемый как соединение нескольких атомов. Стронником атомистической теории являлся и выдающийся русский учёный-энциклопедист Михаил Васильевич Ломоносов (1711–1765), разработавший молекулярно-кинетическую теорию тепловых явлений.

Первый шаг к количественному описанию свойств атомов был сделан известным английским учёным Джоном Дальтоном (1766–1844). Дальтоном было введено понятие *относительной атомной массы* и определены относительные атомные массы ряда химических элементов.

¹ Нобелевской премией по физике в 1979 году был отмечен вклад Абдуса Салама в построение объединённой теории слабых и электромагнитных взаимодействий между элементарными частицами совместно с американскими физиками Стивеном Вайнбергом и Шелдоном Ли Глэшоу.

Майкл Фарадей (1791–1867), изучая процессы электролиза, предположил, что электропроводность водных растворов солей, кислот и щелочей обусловлена движением заряженных частиц, названных им *ионами*.

В 1896 году французским физиком Антуаном Анри Беккерелем (1852–1908) было открыто явление *радиоактивности*. Радиоактивность свидетельствовала о наличии определенной внутриатомной структуры.

В следующем 1897 году выдающимся английским физиком Джозефом Джоном Томсоном (1856–1940) был открыт *электрон*, измерено отношение заряда электрона к его массе.

В начале XX века благодаря трудам великих немецких физиков-теоретиков Макса Планка (1858–1947) и Альберта Эйнштейна (1879–1955) возникло представление о квантах электромагнитного поля – *фотонах*. Было установлено, что энергия и импульс фотона определяются частотой излучения.

В 1905–1906 годах Альберт Эйнштейн и польский физик Мариан Смолуховский (1872–1917) разрабатывают теорию *броуновского движения* – движение видимых макроскопических частиц твёрдого тела, находящихся в жидкости или газе. Причиной броуновского движения являются удары молекул жидкости или газа, совершающих хаотическое тепловое движение. Теория броуновского движения была подтверждена экспериментальными работами французского физика Жана Батиста Перрена (1870–1942), в которых он сделал то, что в то время казалось совершенно невозможным, – *определил массу атомов и молекул*.

В 1911 году великим английским физиком Эрнестом Резерфордом (1871–1937) *открыто атомное ядро*, окончательно доказана сложная структура атома. Резерфордом же в 1919 году обнаружена частица, входящая в состав атома, – *протон* – и предсказано (1920 г.) существование нейтральной ядерной частицы – *нейтрона*. В 1932 году английским физиком Джеймсом Чедвиком (1891–1974) нейтрон был экспериментально обнаружен.

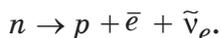
Электрон, протон, нейтрон, квант электромагнитного поля – фотон – получили название *элементарных частиц*, то есть частиц, которые невозможно расщепить на составные части и которые при взаимодействии с другими частицами ведут себя как единое целое.

В 1932 году американским физиком Карлом Дейвидом Андерсоном (1905–1991) был открыт «двойник» электрона – частица, имеющая такие же характеристики, как и электрон, но обладающая положительным электрическим зарядом. Эта частица была названа *позит-*

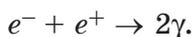
роном (обозначается e^+). Позитрон оказался первой открытой учёными *античастицей*. В дальнейшем факт существования «двойников» – античастиц – был доказан для всех элементарных частиц. В настоящее время парная природа элементарных частиц «частица – античастица» является достоверно установленным законом природы. Учёные-физики умеют даже «изготавливать» *антивещество*. Так, ещё в 1970 году на Серпуховском ускорителе был зарегистрирован антигелий-3. В 1995 году в ЦЕРНе был синтезирован атом антиводорода, состоящий из антипротона и позитрона.

В настоящее время учёными открыто несколько сотен элементарных частиц. Некоторые частицы, например фотон, электрон, протон, по современным научным представлениям являются стабильными. Нейтрон по меркам мира элементарных частиц является долгожителем и существует в свободном состоянии (вне пределов атомного ядра) 880 с. Время же жизни большинства частиц – миллионная, миллиардная доля секунды либо ещё более короткий промежуток времени.

Основной важнейший факт, установленный учёными при изучении элементарных частиц, заключается в том, что **возможны взаимные превращения одних частиц в другие**. Например, свободный нейтрон «распадается» на протон, электрон и частицу, называемую электронное антинейтрино (обозначается $\bar{\nu}_e$):

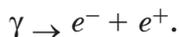


Слово «распадается» в последнем предложении взято в кавычки не случайно. Приведём следующее образное сравнение: если любопытный малыш хочет узнать, как устроен его игрушечный автомобиль, то он может разобрать игрушку на отдельные детали, а затем из этих деталей собрать что-нибудь другое. В мире же элементарных частиц не происходит «сборка» новой «конструкции» – новой частицы из «запасных частей» – остатков предыдущей частицы. Происходит именно *превращение* одних частиц в другие. К примеру, в 1933 году французский физик Фредерик Жолио Кюри (1900–1958) на опыте обнаружил превращение пары «электрон и позитрон» в кванты электромагнитного излучения – фотоны:



Этот процесс назвали *аннигиляцией* (от позднелатинского *annihilatio* – уничтожение, исчезновение). Ясно, что внутри электрона и позитрона не могли находиться кванты электромагнитного излучения, движущиеся со скоростью света.

Возможен и обратный процесс, когда квант гамма-излучения, взаимодействуя с веществом, превращается в электронно-позитронную пару:



22.1. Какова, по вашему мнению, должна быть минимальная энергия γ -кванта, чтобы была возможна реакция рождения электронно-позитронной пары?

Несмотря на большое многообразие процессов превращения, происходящих в микромире, на них наложены жёсткие ограничения, обусловленные законами сохранения. **Все превращения элементарных частиц строго подчиняются законам сохранения** – закону сохранения энергии, закону сохранения импульса, закону сохранения электрического заряда и другим законам сохранения, действующим в природе.

Классификация элементарных частиц. Когда число открытых частиц стало исчисляться сотнями, среди учёных, занимающихся изучением элементарных частиц, стало бытовать высказывание: «Когда-то открывателей элементарных частиц награждали Нобелевской премией, но теперь такое открытие должно наказываться штрафом». Открытые учёными частицы разительно отличались по своим физическим характеристикам и свойствам, были так не похожи друг на друга, что появился шуточный термин «зоопарк элементарных частиц». Для учёных стала насущной проблема классификации частиц – распределение «обитателей зоопарка» по отдельным «вольерам». В настоящее время все элементарные частицы подразделяются на две группы. Первая группа частиц – **лептоны** (от греческого *leptos* – тонкий, лёгкий). К лептонам относится такая известная нам частица, как *электрон*.



22.2. Как называется частица, являющаяся античастицей электрона?

При протекании реакций превращения элементарных частиц электрону и позитрону сопутствуют электрически нейтральные частицы, называемые *электронное нейтрино* и *электронное антинейтрино*. Нейтрино имеют очень малую массу (приблизительно в 2 млн раз меньше, чем масса электрона), и они крайне слабо взаимодействуют с веществом. Толща земного шара для потока нейтрино, приходящего к нам из недр Солнца – области термоядерных реакций, – прозрачнее, чем тонкая пластинка стекла для светового луча. Гипотеза о существовании электронных нейтрино была выдвинута швейцарским физиком-теоретиком Вольфгангом Паули (1900–1958) в 1930 году и только в 1953–1956 годах были получены прямые экспериментальные доказательства их существования.

Помимо электрона и электронного нейтрино к лептонам относятся электрически отрицательно заряженные частицы, называемые мюон и тау-лептон (таон). Это нестабильные частицы с массой в 207 и 3477 масс электрона соответственно. Этим частицам соответствуют мюонное нейтрино и тау-нейтрино. Для трёх видов нейтрино зафиксированы интересные процессы – нейтринные осцилляции, то есть преобразование различных видов нейтрино друг в друга. Таким образом, в настоящее время учёным известны двенадцать частиц-лептонов: электрон, два тяжёлых «электрона» – мюон и тау-лептон, три вида нейтрино и шесть их античастиц.

По современным научным представлениям, *лептоны считаются бесструктурными* частицами в отличие от другой группы элементарных частиц, называемых **адронами** (от греческого *hadros* – большой, сильный). Эти частицы имеют сложную внутреннюю структуру. Адроны состоят из частиц, получивших название *кварки*. Всего кварков, как лептонов, шесть, а с учётом антикварков – двенадцать. Масса кварков различна и оценивается от 4 до 340 000 масс электрона. Характерной особенностью кварков является то, что они имеют дробный электрический заряд в $\pm 1/3$ и $\pm 2/3$ заряда электрона.

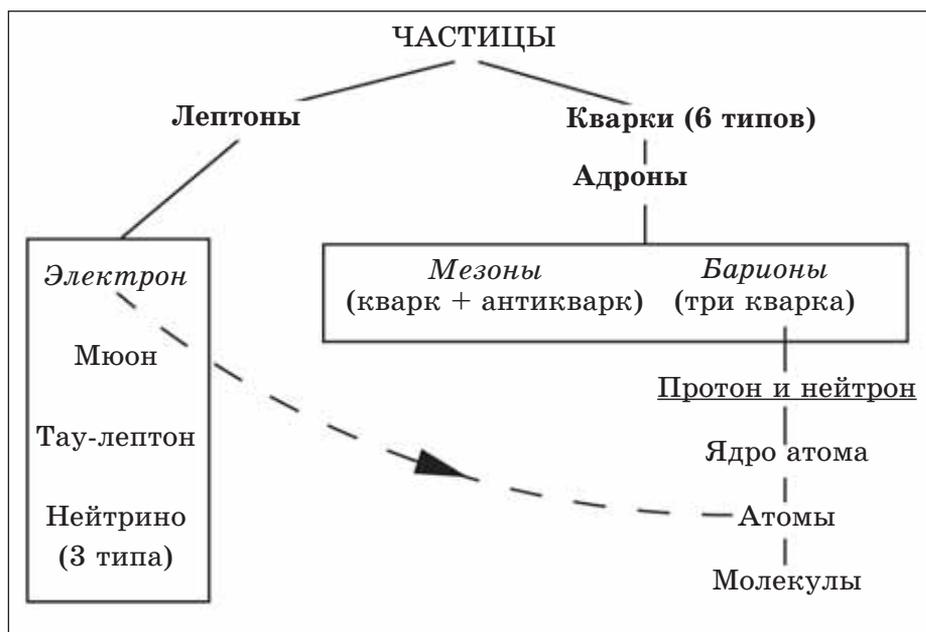


Рис. 186

Адроны могут в своём составе иметь или два кварка (точнее, кварк и антикварк), или три кварка. Частицы адроны, состоящие из кварка и антикварка, образуют подгруппу *мезонов* (от греческого *mesos* – средний, промежуточный). Частицы-адроны, состоящие из трёх кварков, образуют подгруппу *барионов* (от греческого *barys* – тяжёлый). Именно к барионам относятся наши «старые знакомые» – протон и нейтрон.

Рассмотренная нами классификация элементарных частиц и структура вещества приведена на рисунке 186.



Гипотеза о кварковом строении адронов была выдвинута физиками-теоретиками ещё в 1964 году. Однако за прошедшее время физиками-экспериментаторами так и не было обнаружено ни одного свободного кварка. Не удалось им и расщепить какую-либо частицу адрон на отдельные кварки. Это объясняется тем, что, по мнению учёных, силы межкваркового взаимодействия при увеличении расстояния между кварками не уменьшаются, а увеличиваются (подобно тому, как это происходит при растяжении пружины). По этой причине, чтобы «вырвать» кварк из частицы, мы должны сообщить ему тем больше энергии, чем больше расстояние между кварком и частицей. Но такая попытка выбить отдельный кварк из адрона в высокоэнергичном состоянии приводит к тому, что как только энергия системы превышает энергию покоя кварка, происходит не распад частицы на отдельные кварки, а образование новых комбинаций кварков – новых мезонов и барионов. При этом образование новых частиц происходит в полном соответствии с кварковой теорией.

Если адроны (мезоны и барионы) в принципе невозможно разделить на отдельные кварки, то почему учёные уверены, что протон, к примеру, состоит именно из трёх кварков, имеющих дробный электрический заряд? Может быть, кварковая модель адронов лишь удачный математический приём, использованный при классификации частиц? Уверенность в реальном существовании кварков базируется на результатах многочисленных экспериментов. Например, в опытах по рассеянию потока релятивистских электронов на протонах было выяснено, что протон не является бесструктурной частицей, а состоит из трёх точно подобных объектов, чьи характеристики (например, электрический заряд) совпадают с теоретически предсказанными характеристиками кварков.

Фундаментальные взаимодействия и классификация частиц.

Выясним, что является основным признаком, по которому частицы классифицируются на лептоны и адроны. Первоначально учёные

считали, что таким признаком является масса частицы – лептоны имеют меньшую массу, чем адроны. Но это убеждение было поколеблено в 1975 году, когда был обнаружен «сверхтяжёлый электрон» – тау-лептон, чья масса почти в два раза превосходит массу типичной адронной частицы – протона. Не могло быть классифицирующим признаком при разделении частиц на лептоны и адроны и наличие у частицы электрического заряда.



22.3. Как доказать, что участие (неучастие) частицы в электромагнитном взаимодействии не может быть тем признаком, по которому частицы были классифицированы на лептоны и адроны?

Из курса химии вам известно, что помимо массы и электрического заряда частицы характеризуются и другими величинами. Одной из таких величин является *спин*. Спин – сугубо квантовая характеристика частицы, измеряемая в $\frac{h}{2\pi}$, где h – постоянная Планка, $h = 6,62 \cdot 10^{-34}$ Дж·с. По величине спина частицы подразделяются на частицы с целым спином (0, 1, 2) $\frac{h}{2\pi}$ и частицы с полуцелым спином ($\frac{1}{2}, \frac{3}{2}$) $\frac{h}{2\pi}$. Свойства частиц самым существенным образом зависят от величины их спина. Но частицы, относящиеся к разным группам – лептонам и адронам, – могут обладать одинаковыми спинами. Например, и электрон (относится к лептонам) и протон (относится к адронам) обладают полуцелым спином. Следовательно, и величина спина не является тем признаком, который классифицирует частицы на лептоны и адроны.

Учёные установили, что в основе классификации элементарных частиц на лептоны и адроны лежит способность (или неспособность) частиц участвовать в том или ином виде взаимодействия.

Напомним, что, по современным научным представлениям, в природе существует четыре фундаментальных (качественно различающихся) типа взаимодействий: *гравитационное, электромагнитное, сильное и слабое*.

Ареной *гравитационного взаимодействия* является мир космоса. Благодаря гравитационному взаимодействию – силе всемирного тяготения – в процессе эволюции Вселенной возникли звёздные системы – галактики, звёзды, планеты, и именно гравитационное взаимодействие «руководит» их движением.

Электромагнитное взаимодействие – взаимодействие электрически заряженных частиц. Благодаря этому типу взаимодействия существует атомно-молекулярная структура вещества, биологические клетки, состоящие из тысяч миллиардов атомов, а значит, и сама жизнь.

Гравитационные и электромагнитные силы убывают с увеличением расстояния между тяготеющими массами или электрически заряженными частицами, но радиус действия этих сил бесконечен.

Сильное взаимодействие, в отличие от гравитационного и электромагнитного взаимодействий, ограничивает сферу своего действия расстоянием порядка 10^{-15} м. Проявлением сильного взаимодействия являются ядерные силы, удерживающие протоны и нейтроны внутри ядра атома.

Слабое взаимодействие – взаимодействие, проявляющее себя только в микромире, радиус его действия порядка 10^{-18} м (миллиардная миллиардной доли метра!). Именно проявлением слабого взаимодействия является распад свободного нейтрона на протон, электрон и электронное антинейтрино.

Учёными было установлено, что *все без исключения элементарные частицы участвуют в гравитационном взаимодействии, электрически заряженные частицы и фотон участвуют в электромагнитном взаимодействии. Помимо этого лептоны участвуют в слабом взаимодействии, а адроны (мезоны и барионы) участвуют в сильном и слабом взаимодействиях.*



Стандартная модель: достижения и нерешённые проблемы.

Фундаментальные взаимодействия описываются в рамках различных физических теорий. Исторически первой из них стала теория электромагнетизма, созданная Джеймсом Клерком Максвеллом в 1861–1873 годах. В 1915 году Альбертом Эйнштейном была разработана общая теория относительности, являющаяся теорией гравитации. На тот момент две эти научные теории являлись достаточной теоретической базой для описания известных в то время фундаментальных взаимодействий.

Установление протонно-нейтронного состава ядра атома, изучение распада нейтрона (β -радиоактивность) привело учёных-физиков к осознанию факта существования ещё двух типов фундаментальных взаимодействий – сильного взаимодействия и слабого взаимодействия. В 1932–1934 годах были созданы теоретические концепции, объясняющие особенности этих взаимодействий.

Во второй половине XX века дальнейшее изучение элементарных частиц привело учёных к созданию *теории электрослабого взаимодействия*, объединившей электромагнетизм и слабые взаимодействия¹, и теории сильного взаимодействия.

¹ Таким образом, можно утверждать, что существует три типа взаимодействий: гравитационное, сильное и электрослабое.

На основе теории электрослабого взаимодействия и *теории сильного взаимодействия* разработана так называемая **Стандартная модель** элементарных частиц.

Перечислим *основные положения Стандартной модели*:

– Все вещества состоят из 24 фундаментальных частиц: 6 лептонов (электрон, мюон, тау-лептон, электронное нейтрино, мюонное нейтрино, тау-нейтрино), 6 кварков и 12 соответствующих лептонам и кваркам античастиц.

– Нейтрино участвуют только в слабых взаимодействиях, электрически заряженные лептоны (электрон, мюон, тау-лептон) участвуют в слабых и электромагнитных взаимодействиях, кварки участвуют в сильных, слабых и электромагнитных взаимодействиях.

– Теория электрослабого взаимодействия и теория сильного взаимодействия являются квантовыми теориями. Это означает, что взаимодействие элементарных частиц в рамках этих теорий объясняется обменом квантами соответствующих физических полей. Так, например, таким квантом для электромагнитного поля является фотон.

Выводы и следствия, вытекающие из Стандартной модели, получили убедительные экспериментальные подтверждения. Так, в 1983 году в ЦЕРНе были открыты кванты, которые являются переносчиками слабого взаимодействия. Характеристики этих частиц совпали с характеристиками, предсказанными ранее теорией электрослабого взаимодействия. Кванты, которые являются переносчиками сильного взаимодействия в «чистом виде», как и кварки, не обнаружены, но и здесь экспериментально наблюдаются эффекты, предсказанные теорией сильного взаимодействия.

В марте 2013 года было официально объявлено, что в теоретической конструкции Стандартной модели заполнено последнее «белое пятно» – открыта частица, называемая физиками *бозоном Хиггса*¹. В рамках Стандартной модели эта частица – бозон Хиггса – ответственна за массу элементарных частиц. Бозон Хиггса был обнаружен детекторами Большого адронного коллайдера. Энергия покоя частицы составляет около 125–126 ГэВ (то есть бозон Хиггса массивнее протона более чем в 130 раз).

Таким образом, для теоретического описания фундаментальных взаимодействий учёным в наше время достаточно только общей тео-

¹ Частица названа так по фамилии английского физика Питера Хиггса (р. 1929 г.), который в 1964 году предложил механизм, объясняющий происхождение масс элементарных частиц. Реализация этого механизма требует существования особой частицы – бозона Хиггса.

рии относительности (теории гравитации) и Стандартной модели. Зная небольшое число (порядка двадцати) численных значений величин (массы элементарных частиц, константы, характеризующие взаимодействия, ряд физических констант – скорость света, постоянная Планка и так далее), можно в принципе теоретически описать весь наш мир, объяснить результаты множества уже проведённых экспериментов и предсказать результаты новых опытов.

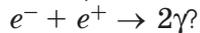
Вправе ли мы, исходя из результатов, достигнутых физикой сегодняшнего дня, сделать вывод, что наука физика завершила своё развитие? Безусловно, нет. В современной физике существует ещё множество нерешённых проблем (а их разрешение в будущем, весьма вероятно, поставит на повестку дня новые вопросы и проблемы). Вот только некоторые из этих проблем:

- не создана квантовая теория гравитации, нет ответа на вопрос, существует ли квант гравитационного взаимодействия (физики уже придумали для этой гипотетической частицы красивое название – гравитон);
- не реализованы планы создания единой теории, описывающей сильное и электрослабое взаимодействия (а в перспективе – и гравитационное взаимодействие);
- все ли фундаментальные частицы открыты или в природе существуют ещё более массивные поколения лептонов и кварков.

Элементарные частицы, позитрон, античастица, взаимные превращения одних элементарных частиц в другие, $e^- + e^+ \rightarrow 2\gamma$, $\gamma \rightarrow e^- + e^+$, лептоны (электрон, мюон, тау-лептон, электронное нейтрино, мюонное нейтрино, тау-нейтрино), адроны (мезоны и барионы), кварковая структура адронов, спин, фундаментальные взаимодействия: гравитационное, электромагнитное, сильное, слабое, в отличие от адронов лептоны не участвуют в сильном взаимодействии, Стандартная модель (вещество состоит из лептонов и кварков, которые взаимодействуют квантами, являющимися переносчиками электромагнитного, слабого и сильного взаимодействий), бозон Хиггса.

22.1 ● Существует огромное различие в величине сильного, электромагнитного, слабого и гравитационного взаимодействий. Например, в случае взаимодействия двух протонов в ядре атома «силы» этих взаимодействий находятся в отношении $1:10^{-2}:10^{-10}:10^{-38}$. Для наглядности представим силу взаимодействий в виде шкалы масс, приняв силу слабого взаимодействия за массу в 1 г. Какой массе при этом будет соответствовать сила электромагнитного и сильного взаимодействий? Массе скольких электронов будет при этом соответствовать сила гравитационного взаимодействия?

22.2 ● Какова частота квантов электромагнитного взаимодействия, возникающих в результате аннигиляции электрона и позитрона:



Кинетической энергией электрона и позитрона пренебречь.

22.3 ● Оцените, какой может быть максимальная длина волны γ -излучения, чтобы взаимодействие кванта этого излучения с веществом могло бы привести к рождению электрон-позитронной пары.

Самое важное в разделе «Элементы теории относительности и квантовой физики»

1. Механикой сверхвысоких скоростей является *специальная теория относительности* (СТО). Она базируется на двух постулатах:

- принципе относительности,
- независимости скорости света в вакууме c от скорости источника света.

Импульс p и полная энергия E релятивистской частицы равны:

$$p = \frac{mv}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}},$$

$$E = \frac{mc^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}},$$

где m – масса частицы;

v – её скорость относительно некоторой инерциальной системы отсчёта.

Существует *энергия покоя E_0* .

$$E_0 = mc^2.$$

Релятивистские эффекты полностью подтверждены экспериментально.

2. Изучение законов микромира привело учёных к созданию *квантовой физики*.

Было установлено, что электромагнитная энергия излучается и поглощается *отдельными квантами* (фотонами). *Импульс p и энергия E фотона равны:*

$$p = \frac{E}{c},$$

$$E = h\nu,$$

где h – постоянная Планка;

ν – частота излучения.

Квантовая теория фотоэффекта позволила объяснить существование *красной границы фотоэффекта* и зависимость кинетической энергии электрона, вырванного из вещества при фотоэффекте, от частоты излучения.

$$h\nu = A_{\text{вых}} + \frac{mv^2}{2},$$

где $A_{\text{вых}}$ – работа выхода вещества;

m – масса электрона;

v – его скорость.

Квантовая теория атома позволила объяснить существование *линейчатых спектров излучения*, обосновать возможность *индуцированного (вынужденного) излучения*, что лежит в основе работы *лазеров*.

3. Ядра атомов состоят из *протонов* и *нейтронов*, удерживаемых мощными *ядерными силами*. Ядра с одинаковым числом протонов, но разным числом нейтронов – это *изотопы*. Ядра некоторых изотопов самопроизвольно испытывают *радиоактивные превращения*, испуская α -, β -, γ -излучение. С течением времени скорость радиоактивного распада не изменяется.

Закон радиоактивного распада:

$$N = N_0 2^{-\frac{t}{T}},$$

где N_0 – число ядер радиоактивного изотопа в начальный момент времени;

N – число оставшихся ядер изотопа (не испытавших распад) к моменту времени t ;

T – период полураспада.

Энергия связи протонов и нейтронов в ядре атома, *энергетический выход* ядерных реакций определяют через *дефект массы* Δm :

$$E_{\text{св}} = \Delta mc^2.$$

Практически важными источниками ядерной энергии являются:

– реакция деления тяжелых элементов (*цепная реакция деления урана*),

– *термоядерный синтез* лёгких элементов.

4. *Основной факт* в мире элементарных частиц – это факт их *взаимных превращений*. Элементарные частицы подразделяются на *лептоны*, *кварки* и *кванты* электромагнитного, слабого, сильного взаимодействий. Помимо частиц существуют *античастицы*. К лептонам относятся, в частности, электрон и нейтрино. Из кварков состоят частицы адроны (мезоны – из кварка и антикварка, барионы, например протоны и нейтроны, – из трёх кварков). По современным научным представлениям фундаментальными взаимодействиями являются *гравитационное*, *электрослабое* (электромагнитное + слабое) и *сильное взаимодействия*. *Лептоны*, помимо гравита-

ционного и (для электрически заряженных частиц) электромагнитного взаимодействий, участвуют в слабом взаимодействии. Адроны, помимо гравитационного и (для электрически заряженных частиц) электромагнитного взаимодействий, *участвуют в слабом и сильном взаимодействиях.*

III.1 ● С какой скоростью движутся протоны по 26,7-километровому кольцу Большого адронного коллайдера, если энергия частицы составляет 7 ТэВ? Сколько оборотов в кольце ускорителя совершает такой протон за одну секунду?

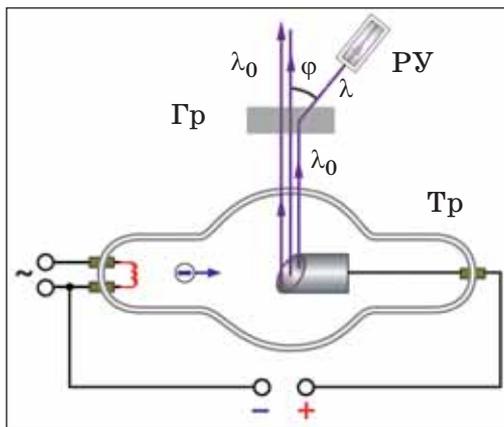
III.2 ● При подаче напряжения на полупроводниковый светодиод под воздействием электрического поля источника тока электрон может совершить переход из валентной зоны в зону проводимости при условии, что энергия, приобретенная электроном, не меньше «ширины» запрещенной зоны. Обратный процесс перехода электрона может сопровождаться излучением кванта света. Определите, какое минимальное напряжение должно быть подано на светодиод, чтобы он мог излучать свет с длиной волны 630 нм.

III.3 ● Слой свинца толщиной в 1,8 см ослабляет поток гамма-излучения вдвое. Какой толщины необходим слой свинца, чтобы он пропускал не более 6,25 % от первоначального потока гамма-излучения?

III.4 ● В таблице 3 «Работа выхода для некоторых металлов» (§ 18) для ряда металлов указаны не определенные значения работы выхода, а некоторый диапазон значений. С чем это, по вашему мнению, может быть связано? (Примечание. Одним из основных свойств кристаллов является анизотропия.)



III.5. В 1923 году американский физик Артур Комптон (1892–1962) открыл физический эффект, названный в дальнейшем его именем. Упрощенная схема опыта Комптона изображена на рисунке 187. Монохроматическое рентгеновское излучение с длиной волны λ_0 , создаваемое рентгеновской трубкой Тр, в виде узкого пучка направлялось на слой вещества (например, графита Гр). В результате взаимодействия излучения с электронами, содержащимися в графите, рентгеновское



излучение рассеивалось, и рассеянное излучение фиксировалось регистрирующим устройством РУ. Причем длина волны рассеянного рентгеновского излучения λ не оставалась прежней, она всегда была больше длины волны падающего излучения ($\lambda > \lambda_0$) и зависела от угла рассеяния φ . Этот эффект увеличения длины волны рассеянного излучения является доказательством квантовых свойств электромагнитного излучения. Почему? Ответ обосновать.

Рис. 187

P. S.



При изучении раздела «Элементы теории относительности и квантовой физики» были рассмотрены основные понятия современной физики – релятивистские представления о пространстве-времени, квантовые явления и классификация элементарных частиц.

– Рассматривая релятивистские эффекты, вы узнали об относительности расстояний и относительности промежутков времени. Но формулы, позволяющие получить численные значения этих эффектов в зависимости от скорости движения тела, в учебнике не приведены. Вы знаете, как рассчитывается импульс и энергия частицы в специальной теории относительности. Но анализ движения релятивистской частицы в силовом поле (гравитационном, электрическом, магнитном) не проводился.

– При изучении основ квантовой физики был, например, рассмотрен энергетический спектр атома водорода, объяснено с квантовой точки зрения существование давления света, явление фотоэффекта. Но вслед за Нильсом Бором не был произведен расчёт диаметра атома водорода. Не анализировался вопрос, как зависит давление, производимое светом при падении на поглощающую или зеркальную поверхность, от мощности светового потока.

– При изучении атомного ядра было выявлено протонно-нейтронное строение ядра, изучено явление радиоактивности. Но не рассматривались (помимо капельной модели ядра) иные модели строения атомного ядра, условия стабильности (устойчивости) ядра.

– Были рассмотрены принципы получения ядерной энергии при цепной реакции деления урана, при термоядерном синтезе легких элементов. Но технические подробности реализации данных процессов не изучались.

– Вам известна классификация элементарных частиц, известно, какие физические взаимодействия являются фундаментальными. Но степень освоения этого материала такова, что в большинстве случаев мы лишены возможности проводить физические расчёты и оценки рассматриваемых процессов.

Заключение

Хороша наука физика, только жизнь коротка.
Академик Игорь Васильевич Курчатov

Перефразируя слова, вынесенные в эпиграф заключения, скажем, что хороша наука физика, только школьный курс физики коротковат. Действительно, сложно в несколько уроков в неделю в 7 – 11 классах вместить все результаты познания природы многими поколениями учёных от античности до наших дней. Трудно скупыми строчками учебника передать чувства физика-теоретика, осознанного новые закономерности протекания физических явлений, или чувства физика-экспериментатора, добывшего в опытах новые научные факты, или чувства физика-инженера, сумевшего воплотить теоретические идеи и экспериментальные разработки в «железо» – практически важные приборы и изделия, действующие безотказно даже в неумелых руках.

Несмотря на это, позволим выразить надежду, что основная задача физики как учебного предмета – совместно с другими предметами естественнонаучного цикла помочь вам сформировать основы научного мировоззрения – в определённой мере достигнута. Вы знаете, что окружающий вас мир познаваем, вам известны основные методы научного познания природы, применяемые в естественных науках. Вами изучены многие физические явления, вам известны величины, характеризующие эти явления, и законы, которым явления подчиняются. Вы научились проводить наблюдения и опыты, обрабатывать полученные результаты и на их основе выявлять определённые экспериментальные закономерности. Вы умеете применять полученные знания для объяснения природных явлений и принципа действия отдельных технических устройств.

Можно также выразить уверенность, что изучение физики, как и других естественных наук, способствовало развитию вашего мышления и, в частности, такого его значимого качества, как критичность. Уверены, что если не у всех, то у многих из вас, фразы о «положительной или отрицательной энергетике» того или иного человека, строчки «астропрогноза» и тому подобные заявления вызывают улыбку. Ведь источником информации для критически мыслящего человека служат наблюдения, опыт и размышления, а не досужие разговоры, сдобренные «научной» терминологией. Такого человека отличают умение выделять главное и определять, какая информация относится к рассматриваемому вопросу, умение формулировать

проблему и решать её при индивидуальной и совместной познавательной деятельности, умение отделять факты от субъективного мнения и истинную информацию от ложной и псевдоинформации, умение выявлять причинно-следственные связи и проводить логически обоснованные суждения, умение делать выводы и проверять эти выводы на практике.

Перед тем как попрощаться с учебником физики 11 класса, советуем вам:

- Ещё раз в конце каждого раздела прочитать «Самое важное».
- Ещё раз прочитать эпиграфы к параграфам и прокомментировать, как они связаны с содержанием соответствующего параграфа.
- Выполнить итоговые задания.

Итоговое задание 1. По плану ответа подготовьте ответ:

- о явлении электромагнитной индукции,
- о явлении резонанса,
- о явлении полного отражения,
- о явлении интерференции света,
- о явлении внешнего фотоэффекта,

Итоговое задание 2. По плану ответа подготовьте ответ:

- о законе электромагнитной индукции,
- о законе отражения света,
- о законе преломления света,
- о законе радиоактивного распада,

Итоговое задание 3. По плану ответа подготовьте ответ о величинах, указанных в таблице на заднем форзаце учебника.

Итоговое задание 4. По плану ответа подготовьте ответ об опыте, который подтверждает:

- существование явления самоиндукции,
- зависимость частоты колебаний математического маятника от длины нити подвеса маятника и ускорения свободного падения,
- существование явления дисперсии света,
- второй постулат специальной теории относительности о независимости скорости света в вакууме от скорости источника света,
- уравнение Эйнштейна для фотоэффекта и существование красной границы фотоэффекта.

Итоговое задание 5. По плану ответа подготовьте ответ:

- об электромагнитном колебательном контуре,
- о трансформаторе,
- об индукционном генераторе переменного тока,

- о волоконном световоде,
- о дифракционной решётке,
- о дозиметре,
- о ядерном реакторе.

В течение ряда лет вы изучали физику по учебникам, целью которых было способствовать формированию функционально грамотной личности, то есть личности, которая способна использовать приобретённые знания, умения и навыки для успешного решения самых разнообразных жизненных задач и которая способна осваивать новые знания на протяжении всей жизни.

Спасибо за работу!

Ответы к заданиям

- 1.1. 5 см^2 . 1.3. 0,05 В; 0,25 А. 1.4. 8,4 В. 1.5. 10 мкВ/м .
 2.1. 0,1 Вб; 0,01 Дж. 2.2. 800 В. 2.3. $E(t) = 20 \sin(100\pi t - \frac{\pi}{2})$ (В);
 20 В. 2.5. 0,72 Дж.
 3.1. 25 мФ. 3.2. $q(t) = 8 \cdot 10^{-5} \cos 1000t$ (Кл). 3.3. 5 Гц.
 4.1. 2,5 мГн. 4.2. $0,02 \frac{\text{М}}{\text{с}}$; 63 Гц; 0,1 с; 1,4 см; $\frac{\pi}{4}$ рад; 0,89 м/с;
 56 м/с²; 0,16 Дж; $0,36 \text{ кг} \cdot \frac{\text{М}}{\text{с}}$; 22 Н. 4.3. 8 мкКл.
 5.1. 0,94 В; 0,67 В. 5.2. 150 Ом; 300 Вт. 5.3. 140 В. 5.4. 200 вит-
 ков. 5.5. Половину периода.
 6.1. 500 Ом; 0,44 А. 6.2. 440 Ом; 1,4 Гн. 6.4. 1,4 мГн.
 7.1. 9,3 мм. 7.2. 30 км. 7.3. 210 м.
 8.1. 32 см. 8.2. Средневолновой диапазон. 8.3. 75 км. 8.4. 60 км.
 8.5. В 100 млн раз.
 I.1. 0,83 мкс.
 9.1. $1,96 \cdot 10^8 \text{ м/с}$. 9.3. На $4,7^\circ$. 9.4. 24° . 9.5. 6,8 м.
 10.1. 32 см; 3,1 дп; в 4 раза.
 11.1. 48° . 11.2. 15 см. 11.5. 1,5 дп.
 12.1. $0,18^\circ$.
 14.2. $5 \cdot 10^{14} \text{ Гц}$. 14.5. 600 нм.
 15.1. 610 нм. 15.5. 500 штрихов на 1 мм.
 16.3. 0,8 с. 16.4. $\frac{16}{65} \text{ с}$.
 17.1. $3,8 \cdot 10^{-19} \text{ кг} \cdot \text{м/с}$; в $\frac{16}{9}$ раза. 17.2. 0,94 с. 17.3. 938,3 МэВ;
 $1,673 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$. 17.4. $7,6 \cdot 10^{-22} \text{ кг} \cdot \text{м/с}$. 17.5. 0,47 М; 0,42 с.
 18.3. 0,67 эВ. 18.4. $2,6 \cdot 10^8 \text{ м/с}$. 18.5. $6,6 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$.
 19.4. 24,64 года; 40,93 года.
 20.1. $7,7 \frac{\text{МэВ}}{\text{частица}}$.
 22.2. $1,24 \cdot 10^{20} \text{ Гц}$. 22.3. 1,21 пм.
 III.1. Скорость протонов практически равна скорости света; более
 11000 оборотов. III.2. 2 В. III.3. 9 см.

Предметно-именной указатель

А

Адрон 251
 Активность 217
Альфёров Ж. И. 209
 Альфа-распад 215
 Альфа-частица 211
 Амплитуда 28
 Анализ спектральный 288
 Аннигиляция 249
 Антивещество 249
 Античастица 249
Араго Ф. Д. 145
 Атомная единица массы 211
 Афелий 322

Б

Басов Н. Г. 208
 Безмассовая частица 194
Беккерель А. 215
 Бета-распад 215
 Близорукость 122
 Блок-схема радиосвязи 92
 Бозон Хиггса 255
Бор Н. 198

В

Вебер (единица измерения) 12
 Вектор магнитной индукции 10
 Взаимодействие
 - гравитационное 253
 - сильное 213, 254
 - слабое 254
 - фундаментальное 254
 - электромагнитное 253
 Волны 72
 - акустические 74
 - звуковые 73
 - когерентные 79, 146
 - поперечные 72, 141
 - продольные 73

Г

Галилей Г. 169

Гамма-излучение 216
 Генератор
 - индукционный 55
 - трёхфазный 57
 Генри (единица измерения) 19
 Герц (единица измерения) 29
 Грэй (единица измерения) 241

Д

Давление света 200
 Дальностьзоркость 122
 Действующее значение
 - напряжения 53
 - силы тока 53
 Дейтерий 213
Декарт Р. 109
 Деление ядра 230
 Демодуляция 201
 Детектирование 91
 Детекторы частиц 235
 Дефект массы 224
 Диоптрия 115
 Дисперсия света 135
 Дифракционная решётка 158
 - отражательная 158
 - прозрачная 158
 Дифракция 85, 153

Длина волны 74, 75

Доза

- излучения 241
 -- эквивалентная 242

Дозиметр 243

Дозиметрия 241

Доливо-Добровольский М. О. 59

Дуализм корпускулярно-волновой 195

З

Закон

- Ньютона
 -- второй 166
 -- первый 166, 168

- отражения света 104
- преломления света 107
- прямолинейного распространения света 104
- радиоактивного распада 218
- самоиндукции 22
- сложения скоростей
 - классический 179
 - релятивистский 179
- электромагнитной индукции 13

Замедлитель нейтронов 231
 Зиверт (единица измерения) 242
 Зона Френеля 156

И

Излучение

- индуцированное 207
- монохроматическое 137
- самопроизвольное 207

Изотопы 213
 Импульс в СТО 181
 Индуктивность 18
 Интерференция 79, 81, 145

К

Камера

- Вильсона 235
- диффузионная 246
- пузырьковая 238

Квант электромагнитного излучения 194
 Квантовая теория фотоэффекта 203
 Кварк 251
 Колебания 27

- вынужденные 60
- гармонические 28, 37
- механические 33
- свободные 37, 90
- электромагнитные 30

 Кольца Ньютона 149
 Коэффициент качества излучения 242
 Красная граница фотоэффекта 203
Курчатов И. В. 231

Л

Лазер 208

- полупроводниковый 208

Лебедев П. Н. 200
 Лептон 251
 Линза 112

- вогнутая 113
- выпуклая 112
- рассеивающая 113
- собирающая 113
- тонкая 116

 Луч световой 104

М

Массовое число 212
 Масс-спектрограф 214
 Мезон 252
 Метод

- аналогии 22
- «меченых атомов» 222
- нейтронно-активационный 221
- радиоуглеродный 220

 Модель

- строения ядра протонно-нейтронная 212

 Модуляция 91

Н

Напряжение

- линейное 59
- фазное 59

 Нейтрино 250
 Нейтрон 211
Ньютон И. 135

О

Оптика 104

- геометрическая 104
- волоконная 125

 Оптическая ось 112
 Оптическая сила линзы 115
 Относительность

- одновременности 176
- промежутков времени 177
- расстояний 176

- Отражение
 - диффузное 106
 - от гладкой поверхности 106
 - полное 109
- П**
 Парадокс 181
 Период
 - дифракционной решётки 158
 - колебаний 29
 - полураспада 218
Планк М. 193
 Планка
 - гипотеза 193
 - постоянная 193
 Поглощение волн 78
 Позитрон 248
 Показатель преломления вещества
 абсолютный 107, 108
 Поляризация волн 86
 Поляроиды 142
 Постулаты
 - Бора 198
 - СТО 175
 Правило Ленца 10
 Предельный угол полного отражения 109
 Преломление волн 78
 Принцип
 - относительности Галилея 169
 Проникающая способность излучения 215
 Просветление оптики 149
 Протон 211
Прохоров А. М. 208
- Р**
 Работа выхода 203
 Радар 96
 Радиоактивность 215
 Радиоволны 95
 Радиолокация 96
 Радуга 137
 Разделение изотопов 213
 Разрешающая способность глаза 93, 121
 Рассеяние света 139
 Расстояние наилучшего зрения 130
 Реактор ядерный 231, 232
 - на быстрых нейтронах 232
 - на медленных нейтронах 232
 Реакция ядерная 227
 - прямая 228
 - цепная 230
 - термоядерного синтеза 234
Резерфорд Э. 210–211
 Резонанс
 - механический 62
 - электрический 70
- С**
 Свет
 - естественный 142
 - поляризованный 143
 Световод волоконный 125
 Световой луч 104
 Свободное тело 166
 Свойство обратимости светового луча 114
 Сетчатка глаза 120
 Силы
 - ядерные 213
 Система
 - мира
 - отсчёта
 -- инерциальная 168
 -- неинерциальная 168
Склодовская-Кюри М. 215
 Скорость электромагнитных волн 74
Снеллиус В. 109
 Сопротивление
 - ёмкостное 67
 - индуктивное 69
 Сотовая связь 93, 94
 Спектр
 - дисперсионный 135
 - дифракционный 154, 155
 - линейчатый 197, 198
 Спин 253
Столетов А. Г. 202, 203
 Счётчик Гейгера 240

Т

Таунс Ч. 208
Телевидение 92
Теория
- электромагнитного поля 103
Тесла (единица измерения) 10
Ток
- переменный 52
-- трёхфазный 59
Токамак 234
Томсон У. 33
Трансформатор 55
- трёхфазный 59
Трек 236
Тритий 213

Ф

Фаза колебаний 28
Ферми Э. 229
Фокус линзы 114
- главный 114
- мнимый главный 114
Формула линзы 118
Фотон 194
Фотоэффект
- внешний 201
- внутренний 200
Френель О. Ж. 155

Ц

Цвет 136

Ч

Частица элементарная 248
Частота
- вынуждающей силы 61
- собственная колебательной системы 61
Чедвик Д. 211

Э

Эйнштейн А. 175
Энергия
- кинетическая в СТО 184
- покоя 183
- поля магнитного 22
- поля электромагнитной волны 89, 90
- полная релятивистского тела 183
- связи 223, 225
-- удельная 226
Эффект
- Комптона 260

Ю

Юнг Томас 145, 155

Я

Явление
- самоиндукции 19
- электромагнитной индукции 9, 12
Ядро атома 212

Оглавление

Как работать с учебником	3
Раздел 1.	
Электромагнитные колебания и волны	7
§ 1. Закон электромагнитной индукции	9
§ 2. Индуктивность. Энергия магнитного поля	18
§ 3. Свободные колебания	27
§ 4. Решение расчётных и экспериментальных задач по теме «Свободные колебания»	38
§ 5. Вынужденные колебания	49
§ 6. Резистор, конденсатор, катушка индуктивности в цепи переменного тока	64
§ 7. Волны	72
§ 8. Практическое применение электромагнитных волн	88
Самое важное в разделе «Электромагнитные колебания и волны»	98
P. S.	100
 Раздел 2.	
Геометрическая и волновая оптика	102
§ 9. Законы геометрической оптики	103
§ 10. Линзы: их свойства и применение	112
§ 11. Решение расчётных и экспериментальных задач по теме «Геометрическая оптика»	124
§ 12. Дисперсия света	135
§ 13. Поляризация света	141
§ 14. Интерференция света	145
§ 15. Дифракция света	153
Самое важное в разделе «Геометрическая и волновая оптика» ...	162
P. S.	163

Раздел 3.

Элементы теории относительности и квантовой физики	164
§ 16. Постулаты специальной теории относительности	166
§ 17. Основы релятивистской динамики	181
§ 18. Элементы квантовой физики	192
§ 19. Ядро атома. Радиоактивность	210
§ 20. Ядерная энергия и ядерная энергетика.....	223
§ 21. Детекторы частиц	235
§ 22. Элементарные частицы и фундаментальные взаимодействия	247
Самое важное в разделе «Элементы теории относительности и квантовой физики»	258
P. S.	261
Заключение	262
Ответы к заданиям	265
Предметно-именной указатель	266

Андрюшечкин Сергей Михайлович

Физика
11 класс

Базовый уровень

Общероссийский классификатор продукции ОК-005-93,
том 2; 953005 – литература учебная

Издатель С. М. Андрюшечкин. E-mail: asm57@mail.ru

Электронный аналог печатного издания