

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ РФ
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ЯДЕРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
«МИФИ»

В.В. Грушин, Н.А. Добродеев, Ю.В. Самоварщиков

Пособие по физике

ОТ ПРУЖИНЫ ДО АТОМНОГО ЯДРА

В помощь учащимся 9 класса

Москва 2009

УДК 53 (075)
ББК 22.3я7
Г91

Грушин В. В., Добродеев Н. А., Самоварщиков Ю. В. Пособие по физике «От пружины до атомного ядра». В помощь учащимся 9 класса. М.: МИФИ, 2009. – 104 с.

Пособие предназначено для углубленного изучения физики. Содержит учебный материал по физике и задачи по механическим колебаниям, электромагнитной индукции, электромагнитным колебаниям и волнам, оптике и основным представлениям о строении атома и атомного ядра в соответствии со стандартами по физике для 9-го класса основной средней школы в несколько расширенном виде с учетом дальнейшего обучения по физико-математическому профилю.

Материал и задачи расположены по темам в соответствии с последовательностью занятий. В сборник включены задачи повышенного уровня сложности, соответствующие целям успешного дальнейшего обучения в физико-математических классах.

Работа с данным пособием поможет подготовиться к участию в олимпиадах и поступлению в МИФИ.

Рецензент В.К. Лебедева

Рекомендовано редсоветом МИФИ
в качестве учебно-методического пособия

ISBN 978-5-7262-1166-4

© *Национальный исследовательский
ядерный университет «МИФИ», 2009*

Предисловие

Настоящее пособие создано на основе практики проведения занятий в 9-х физико-математических классах Лицея № 1511 при МИФИ. Программа разработана на основе Стандартов общего основного образования. Так как Стандарты не предъявляют строгих требований к расположению и последовательности изложения учебного материала, то нами принята попытка изложить в начале курса вопросы, отраженные в этом пособии.

Вопросы, отраженные в этом пособии, являются непосредственным продолжением тематики 8-го класса – это электромагнитные колебания и волны, свет, атом и атомное ядро. Рассматриваются также механические колебания и волны, чтобы была опора и возможность аналогий для лучшего понимания электромагнитных колебаний.

Рассмотрение ведется, по возможности, описательным образом, тем более, что нужных знаний по математике к этому моменту у учащихся еще нет. Это является дополнительным аргументом к такому подходу.

Разделы механики, предусмотренные Стандартами для изучения в 9-м классе, требуют больших математических представлений о векторах и тригонометрических функциях, изложение которых предполагается в следующей части курса.

Указанное распределение материала не мешает его использовать так, как считает преподаватель.

Некоторые интересные задачи, приведенные в пособии (они отмечены звездочкой*), взяты из "Сборника задач по физике" А. П. Рымкевича.

1. Колебания пружинного маятника

Механические колебания

Колебательными называют повторяющиеся в той или иной степени процессы.

Колебания в механике – это такие движения, при которых происходит повторение всех положений тела в пространстве.

Если такое повторение происходит строго через одинаковые промежутки времени, то такие колебания называются периодическими.

Период колебания – продолжительность (время) одного колебания. Обозначается символом T и измеряется в секундах.

Частота колебаний – число колебаний в единицу времени.

За единицу частоты принимают частоту такого колебания, когда за одну секунду совершается одно колебание. Эта единица называется **герц** (Гц) и обозначается греческой буквой ν («ню»)

Связь между частотой и периодом:

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

Таким образом, частота – это величина, обратная периоду. Период – это величина обратная частоте.

Скажем, если период равен 0,01 с, то за одну секунду будет совершено 100 колебаний: $T = 0,01$ с, $\nu = 100$ Гц.

Пример механических колебаний – пружинный маятник

Рассмотрим опыт с горизонтальной пружиной, которая закреплена с одной стороны и прикреплена к шарикю с другой. Шарик с отверстием и может скользить по горизонтальному стержню.

Координатную ось Ox направим вправо, а за начало координат возьмем точку, где находится тело (шарик) в положении равновесия (рис.1.1).

а. Шарик в положении равновесия. Все силы, действующие на шарик, скомпенсированы, т.е. в сумме равны нулю. Шарик покоится.

б. Отведем шарик вправо, сжимая пружину, на расстояние A . Координата шарика $x = A$. Удерживаем шарик рукой. Это тоже положение равновесия. Здесь сила руки компенсирует силу упругости пружины. Шарик покоится.

в. Убираем руку. Равновесие нарушается. В этот момент на шарик действует сила упругости пружины, которая направлена влево (обозначена $-\vec{F}$), координата шарика $x = A$, а скорость $\vec{V} = 0$.

Под действием силы шарик начинает двигаться влево к положению равновесия, его скорость увеличивается, а координата уменьшается.

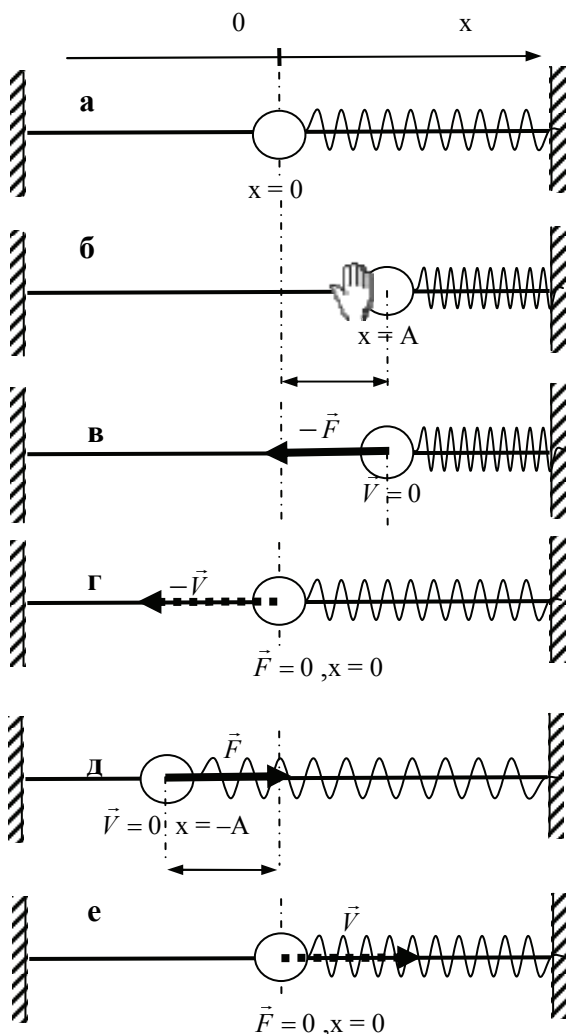


Рис. 1.1

г. Шарик достиг положения равновесия. Координата $x = 0$. Сила упругости равна нулю (пружина не деформирована). Скорость шарика максимальна и направлена влево (обозначена $-\vec{v}$). Благодаря наличию скорости шарик проходит положение равновесия и продолжает двигаться влево. Однако пружина растягивается, появляется сила упругости, которая направлена вправо, она уменьшает скорость и шарик останавливается.

д. Шарик остановился (на мгновение). Его расстояние от положения равновесия также равно A , а координата $x = -A$. Скорость равна нулю, а сила упругости направлена вправо (обозначена \vec{F}). Под действием силы шарик начинает двигаться вправо к положению равновесия, его скорость увеличивается, а координата уменьшается.

е. Шарик достиг положения равновесия. Координата $x = 0$. Сила упругости равна нулю (пружина не деформирована). Скорость шарика максимальна и направлена вправо (обозначена \vec{v}).

Далее тело вернется в точку с координатой A , т.е. туда, откуда оно начало свое движение. Одно колебание закончится и начнется следующее, которое полностью повторит первое колебание.

При сжатии или растяжении пружины сила упругости пропорциональна величине этого сжатия или растяжения. При указанном выборе начала координат $F = k|x|$. Сила упругости направлена в сторону, противоположную смещению тела. Коэффициент k называется **жесткостью** пружины. Она измеряется в ньютонах на метр (Н/м).

Гармоническими называют колебания, которые происходят под действием силы, пропорциональной смещению и направленной в сторону, противоположную смещению.

Смещение и амплитуда колебаний

Смещение – отклонение тела от положения равновесия. Оно может быть положительно или отрицательно. Если начало координат находится в положении равновесия тела, то это координата тела x .

Амплитуда колебаний – максимальное по модулю смещение тела от положения равновесия. Обычно обозначается символом A .

Составим таблицу, в которой отразим величины смещения, силы и скорости, в зависимости от положения тела в соответствии с рис. 1.1.

Положение	Смещение	Сила	Скорость
в	A	$-\vec{F}$ влево	0
г	0	0	$-\vec{V}$ влево
д	$-A$	\vec{F} вправо	0
е	0	0	\vec{V} вправо
в	A	$-\vec{F}$ влево	0

Вывод: колебания шарика на пружине являются гармоническими.

Скорость и сила упругости в колебательном процессе меняются периодически, как и координата.

Энергия тела в колебательном процессе пружинного маятника

Вспомним, что:

1) полная механическая энергия E равна сумме кинетической E_k и потенциальной E_p энергий: $E = E_k + E_p$;

2) в любой замкнутой системе тел, где отсутствуют силы трения, полная механическая энергия E сохраняется;

3) кинетическая энергия E_K материальной точки массой m , которая движется со скоростью V , равна:

$$E_K = \frac{mV^2}{2};$$

4) потенциальная энергия E_{II} пружины, деформированной на величину x , равна:

$$E_{II} = \frac{kx^2}{2}.$$

Воспользовавшись законом сохранения механической энергии, можно понять, что происходит при колебаниях.

В крайней правой точке (положение **в**) смещение максимально и равно A , а скорость равна нулю. Следовательно, в этой точке потенциальная энергия максимальна, а кинетическая энергия равна нулю. Когда тело проходит положение равновесия (положение **г**), то смещение равно нулю, а скорость максимальна. Следовательно, в этой точке кинетическая энергия максимальна, а потенциальная энергия равна нулю.

Продолжая двигаться влево, тело остановится, когда его скорость и кинетическая энергия станут равными нулю. Это произойдет в крайней левой точке (положение **д**). Из закона сохранения механической энергии следует, что в положении **д** потенциальная энергия будет равна кинетической в положении **г** и потенциальной в положении **в**. А это, в свою очередь, означает, что смещения в правую и левую сторону одинаковы по модулю и равны амплитуде A .

Полная механическая энергия системы в каждом из крайних положений:

$$E = E_K + E_{II} = 0 + \frac{kA^2}{2} = \frac{kA^2}{2}.$$

Когда тело проходит положение равновесия, его полная энергия

$$E = E_K + E_{II} = \frac{mV^2}{2} + 0 = \frac{mV^2}{2}.$$

Следовательно, $\frac{kA^2}{2} = \frac{mV^2}{2}$, что характерно для гармонических колебаний.

Потери энергии в реальных колебаниях

В реальных системах присутствуют силы трения (значительные или незначительные), которые приводят к превращению части механической энергии в тепловую (внутреннюю энергию – тела нагреваются) Например, если при переходе **в – г** теряется некоторое количество Q энергии, следовательно,

$$\frac{kA_1^2}{2} = \frac{mV^2}{2} + Q, \text{ где } A_1 \text{ – это смещение в положении } \mathbf{в}.$$

Столько же энергии Q теряется при переходе **г – д**, следовательно,

$$\frac{mV^2}{2} = \frac{kA_2^2}{2} + Q, \text{ где } A_2 \text{ – это смещение в положении } \mathbf{д}.$$

Из этих выражений следует, что

$$\frac{kA_1^2}{2} = \frac{kA_2^2}{2} + 2Q.$$

Ясно, что смещение в положении **д** будет меньше, чем в положении **в**: $A_2 < A_1$, т.е. амплитуда колебаний уменьшается.

Таким образом, реальные колебания всегда затухающие. Гармонические колебания – идеализация реальных колебаний. Если трение существенно уменьшить, то можно приближенно считать реальные колебания гармоническими.

Период колебаний пружинного маятника

У различных пружинных маятников периоды колебаний различны.

Рассмотрим опыты, в которых используются различные массы шариков и различные пружины.

При этом нужно предусмотреть, чтобы пружины имели массу существенно меньшую, чем массы шариков. И постараться существенно уменьшить трение между шариками и стержнем.

Используем некоторую пружину, будем присоединять к ней шарики различной массы и определять период колебаний.

Правильно определить период можно следующим образом: отклонить маятник от положения равновесия и, отпустив его, одновременно включить секундомер. Отсчитать десять колебаний, выключить секундомер. Период будет равен времени, показанному секундомером, деленному на десять.

Опыт показывает: для того, чтобы увеличить период колебаний в два раза, нужно увеличить массу шарика в четыре раза. Чтобы увеличить период в три раза, нужно увеличить массу шарика в девять раз.

Следовательно, можно сделать вывод, что период прямо пропорционален корню квадратному из массы тела:

$$T = a\sqrt{m},$$

a – коэффициент пропорциональности.

Возьмем пружины различной жесткости. Обычно такие пружины изготавливаются из упругой проволоки различной толщины.

Определить жесткость можно следующим образом: сжать или растянуть пружину с помощью динамометра, обеспечив некоторое смещение L . Пусть L будет равно 5 см (0,05 м). Зафиксировать показание динамометра, например,

$F = 150$ Н, и по формуле $k = \frac{F}{L}$ определить жесткость.

$$\text{В нашем примере } k = \frac{150}{0,05} = 3000 \frac{\text{Н}}{\text{м}}.$$

Опыт показывает, что при увеличении жесткости пружины в четыре или девять раз периоды колебаний уменьшаются в два или три раза соответственно. Следовательно, период обратно пропорционален корню квадратному из жесткости пружины:

$$T = b \frac{1}{\sqrt{k}},$$

где b – коэффициент пропорциональности.

Объединив два вывода, получим:

$$T = C \sqrt{\frac{m}{k}}, \text{ где } C = ab.$$

В экспериментах получается, что $C = 6,28$ или $2 \cdot 3,14$ или 2π .

Окончательно формула для периода колебания пружинно-го маятника может быть записана в виде:

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

Задачи к разделу 1

1.1. Шарик, колеблющийся на пружине, совершил $N = 41$ колебание за $\tau = 10$ с. Найти период и частоту колебаний.

1.2.* Частота колебаний крыльев комара $\nu = 600$ Гц, а период колебаний крыльев шмеля $T = 5$ мс. Какое из насекомых и на сколько больше взмахов крыльями сделает при полете за $\tau = 1$ мин?

1.3. Шарик колеблется на пружине жесткостью $k = 1,2$ кН/м. Амплитуда колебаний $A = 4,8$ см. Определить модуль силы упругости:

- 1) когда скорость шарика равна нулю;
- 2) когда смещение шарика равно $2,5$ см;
- 3) когда шарик проходит положение равновесия.

1.4. На какое расстояние x надо отвести от положения равновесия шарик массой $m = 200$ г, закрепленный на пружине жесткостью $k = 1$ кН/м, чтобы он проходил положение равновесия со скоростью $v_m = 2$ м/с?

1.5. Как привести в состояние колебательного движения шарик на пружине, сообщив ему: а) потенциальную энергию; б) кинетическую энергию?

1.6. Какова максимальная скорость v_m шарика, колеблющегося на пружине жесткостью $k = 0,5$ кН/м, при амплитуде колебаний $a = 6$ см? Масса шарика $m = 100$ г. Трением пренебречь.

1.7. Какова максимальная скорость v_m шарика (см. задачу **1.6.**), первоначально смещенного на $A = 6$ см, при первом прохождении положения равновесия, если на преодоление сил трения затрачивается 10% механической энергии?

1.8.* Первый шар колеблется на пружине, имеющей жесткость в четыре раза большую, чем жесткость пружины, на которой колеблется второй шар такой же массы. Какой из шаров и во сколько раз дальше надо отвести от положения равновесия, чтобы их максимальные скорости были одинаковы?

1.9. Груз массой m колеблется на пружине жесткостью k с амплитудой A (численные значения величин приведены в таблице). Найти:

- 1) полную механическую энергию E ;

2) потенциальную энергию $E_{\text{п}}$ в точке с координатой x ;

№	k , Н/м	A , м	x , м	m , кг
1	56	0,042	0	0,27
2	56	0,042	0,042	0,27
3	56	0,042	0,031	0,27
4	56	0,042	0,021	0,47
5	38	0,063	0,051	0,47

3) кинетическую энергию $E_{\text{к}}$ в этой точке;

4) скорость v прохождения грузом этой точки.

1.10. Найти период и частоту колебаний груза массой m на пружине, жесткость которой равна k (численные значения величин приведены в таблице).

№	m , кг	k , Н/м
1	0,143	9,22
2	0,211	12,3
3	0,387	74,3
4	1,44	166
5	1,97	93,2

1.11. Груз на пружине жесткостью $k = 1,25$ Н/м делает $N = 20$ колебаний за $\tau = 10$ с. Определить массу груза.

1.12. Если к шарiku, колеблющемуся на пружине, прилепить кусок пластилина массой $m = 50$ г, то частота колебаний уменьшится в два раза. Определить массу M шарика.

1.13. Во сколько раз изменится период колебаний груза, подвешенного на пружине, если отрезать: а) половину длины пружины; б) четвертую часть длины пружины; и подвесить на оставшуюся часть тот же груз?

2. Колебания математического маятника

Математический маятник – это небольшое тело, подвешенное на легкой нерастяжимой нити, один конец которой закреплен.

Условия для тела и нити более точно означают следующее: *небольшое тело* – размеры его много меньше, чем длина нити; *легкая нерастяжимая нить* – ее масса много меньше массы тела, а растяжение ее гораздо меньше длины.

На практике тяжелый шарик, подвешенный на нити достаточно большой длины, можно считать математическим маятником.

Когда нить занимает вертикальное положение (рис.2.1) и шарик находится в покое, то маятник находится в положении равновесия. Если шарик отвести в сторону и отпустить, то маятник станет совершать механические колебания. Будут ли колебания такого маятника гармоническими? В общем случае не будут, так как движение тела происходит по дуге окружности. Но если максимальный угол отклонения от вертикали является небольшим, например, меньше 10° , то колебания можно считать гармоническими.

Опыт показывает, что период гармонических колебаний математического маятника не зависит от массы тела и амплитуды колебаний.

Период колебаний математического маятника при малых углах прямо пропорционален корню квадратному из длины l

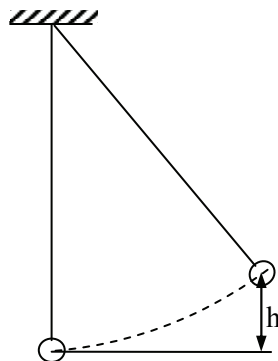


Рис.2.1

его нити и обратно пропорционален корню квадратному из ускорения свободного падения g : $T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$.

Ускорение свободного падения принимается равным $g = 9,81 \text{ м/с}^2$. В разных местах Земли оно может отличаться от этого значения, но не очень значительно. Кстати, с помощью математического маятника достаточно просто определить ускорение свободного падения g в данном месте.

Преращения энергии при колебаниях математического маятника

Рассмотрим, какие же превращения энергии происходят при колебаниях математического маятника. При отклонении от положения равновесия маятнику сообщается потенциальная энергия в поле тяжести Земли. Шарик поднимается на высоту h относительно высоты, на которой он находился в положении равновесия (высоту в положении равновесия принимаем за нуль – начало отсчета высоты). В этой точке скорость тела, а так же его кинетическая энергия равны нулю.

Когда шарик движется и проходит через положение равновесия, то в этой точке скорость максимальна, а высота равна нулю. Следовательно, в этой точке кинетическая энергия максимальна, а потенциальная энергия равна нулю.

Напомним, что кинетическая энергия E_K материальной точки массой m , которая движется со скоростью V , равна

$$E_K = \frac{mV^2}{2},$$

а потенциальная энергия на высоте h , равна

$$E_{II} = mgh.$$

При колебаниях происходит постоянный переход потенциальной энергии (в крайних положениях маятника) в кинетическую энергию (при прохождении положения равновесия). В промежуточных колебаниях отлична от нуля и кинетическая

и потенциальная энергия. Полная механическая энергия шарика

$$E = E_K + E_{II}$$

в любом положении и она не изменяется в отсутствие сил сопротивления.

Реально силы сопротивления присутствуют всегда, и они, в конечном счете, приводят к затуханию колебаний.

Задачи к разделу 2

2.1. Найти период и частоту колебаний математического маятника, длина нити которого равна L для значений:

- 1) $L = 0,141$ м; 2) $L = 1$ м; 3) $L = 0,734$ м; 4) $L = 2,13$ м;
5) $L = 98$ м.

2.2. Во сколько раз изменится частота колебаний математического маятника при увеличении длины нити в 3 раза?

2.3. Как привести в колебания маятник стенных часов, сообщив ему: а) потенциальную энергию; б) кинетическую энергию?

2.4. Два математических маятника за одно и то же время τ совершили: первый $N_1 = 10$; второй $N_2 = 30$ колебаний. Определить отношение длин маятников l_1/l_2 .

2.5. Какое значение получил ученик для ускорения свободного падения g при выполнении лабораторной работы, если маятник длиной $l = 80$ см совершил за $\tau = 1$ мин $N = 34$ колебания?

2.6. Чему должна быть равна длина l нити маятника, чтобы период его колебания был равен $T = 1$ с?

2.7. Маятник имеет период колебаний $T = 1$ с на Земле. Каким будет период T_0 его колебаний на Луне (на Луне $g_0 = 1,6 \text{ м/с}^2$)?

2.8.* За одно и то же время τ один математический маятник делает $N_1 = 50$ колебаний, а другой $N_2 = 30$ колебаний. Найти их длины l_1 и l_2 , если один из них на $x = 32$ см короче другого.

2.9. При увеличении длины нити на $x = 48$ см, частота колебаний математического маятника уменьшилась в $n = 1,5$ раза. Определить первоначальную длину l нити.

2.10. Математический маятник отклонили на небольшой угол. При этом груз приподнялся на $h = 15$ мм. С какой скоростью v_m груз будет проходить положение равновесия?

3. Графики колебаний. Вынужденные колебания

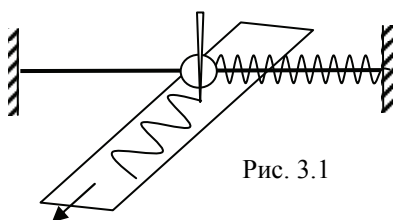


Рис. 3.1

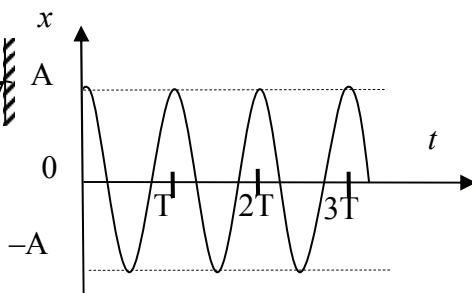


Рис. 3.2

Гармоническое колебательное движение можно представить в виде графика зависимости координаты тела x от времени t .

Изобразить такой график может само тело (рис. 3.1). Для этого к телу необходимо прикрепить карандаш. Под ним расположить лист бумаги. Если лист неподвижен, то тело при

колебаниях опишет отрезок прямой, длина которого будет равна удвоенной амплитуде $2A$. Если бумагу (лучше бумажную ленту) перемещать с некоторой постоянной скоростью в направлении, перпендикулярном направлению колебаний, то получим кривую линию, которая называется *осциллограммой*.

Осциллограмма – график движения колеблющегося тела.

Для гармонических колебаний получим кривую, вид которой показан на рис. 3.2.

В курсе математики такая кривая называется *синусоидой*. Следовательно, график зависимости координаты тела от времени при гармонических колебаниях представляет собой синусоиду. На таком графике легко определить величину амплитуды и период колебаний.

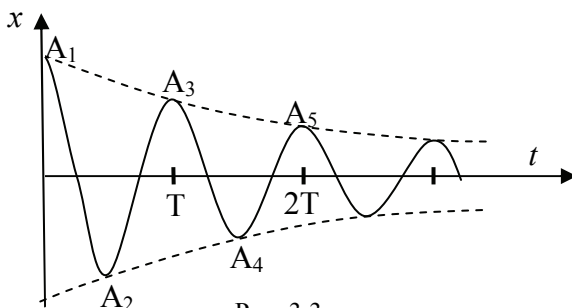


Рис. 3.3

В реальной практике получим, скорее всего, затухающие колебания (рис. 3.3).

Фаза колебаний

Если взять два одинаковых математических маятника и, отклонив их в сторону, одновременно отпустить, то они будут колебаться одинаково (рис. 3.4).

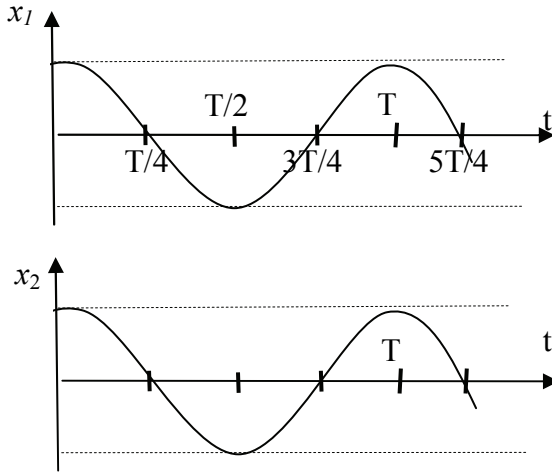


Рис. 3.4

Если два тела совершают колебания с одинаковой частотой (одинаковым периодом) и в любой момент времени находятся в одинаковом состоянии относительно положения равновесия, то говорят, что такие колебания происходят в *одинаковой фазе*.

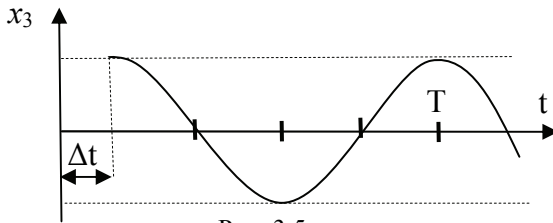


Рис. 3.5

Если маятники отпустить в разные моменты времени (рис.3.5), то у них будут одинаковые частоты, периоды и даже амплитуды, но один все время будет отставать от другого. Если посмотреть их осциллограммы, то увидим, что одна

сдвинута относительно другой на время Δt . В этом случае говорят, что колебания происходят со *сдвигом по фазе*. Величину сдвига Δt можно оценивать в долях периода.

Так, если $\Delta t/T = 1/2$, то это означает, что для совпадения осциллограмм одну из них нужно сдвинуть на полпериода. Такие колебания, как говорят, происходят в *противоположных фазах*.

Если $\Delta t/T = 1$, то это означает сдвиг на период. Но сдвиг на период приводит к полному наложению осциллограмм. Следовательно, такие колебания происходят в одинаковой фазе.

Свободные колебания

Возбудить колебания маятника можно двояко:

- 1) медленно вывести маятник из положения равновесия и далее предоставить его самому себе;
- 2) резко толкнуть покоящийся маятник и далее предоставить его самому себе.

В обоих случаях маятнику сообщается начальная энергия: в первом – потенциальная, во втором – кинетическая.

Свободные колебания – колебания, которые происходят после однократного возбуждения без дополнительных внешних воздействий.

Колебательные системы – системы тел, которые способны совершать свободные колебания.

Собственная частота колебаний системы – частота ее свободных колебаний.

Собственная частота у системы не может быть произвольной. Она определяется для каждой конкретной системы.

Затухающие колебания – колебания, амплитуда которых уменьшается с течением времени.

Свободные колебания являются затухающими.

Вынужденные колебания

Для того чтобы колебания не затухали, необходимо пополнять механическую энергию, расходуемую на трение и сопротивление внешней среды. Это можно делать, прикладывая в процессе колебаний внешнюю периодически изменяющуюся силу. Такие колебания уже не будут свободными.

Вынужденные колебания – колебания, совершаемые под действием внешней периодически изменяющейся силы.

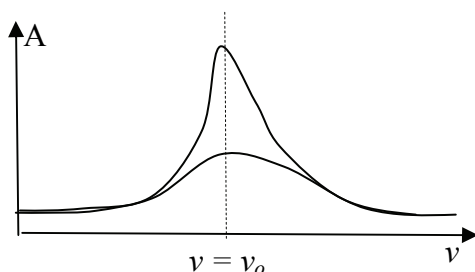


Рис.3.6

Вынужденные колебания происходят с частотой вынуждающей силы.

Амплитуда вынужденных колебаний растет с ростом амплитуды вынуждающей силы. Амплитуда вынужденных колебаний зависит также от частоты вынуждающей силы.

Частота вынуждающей силы может быть любой.

Резонанс – явление резкого возрастания амплитуды колебаний в случае, когда частота вынуждающей силы ν совпадает с частотой собственных колебаний ν_0 .

Амплитудно-частотная характеристика – это график зависимости амплитуды колебаний от частоты вынуждающей силы. Пример такого графика при двух разных значениях величины трения приведен на рис.3.6.

3. Задачи к разделу 3

3.1. На рис.3.1з (I-III) приведены графики $x(t)$ трех различных колебаний. Чем отличаются колебательные движения?

3.2. На рис.3.2з приведены графики $x(t)$ двух колебательных движений I и II. Определить амплитуды, периоды и частоты этих колебаний.

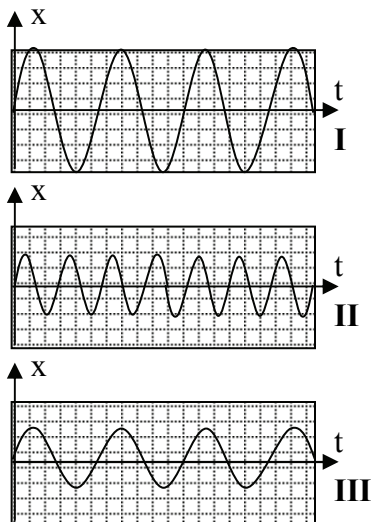


Рис.3.1з

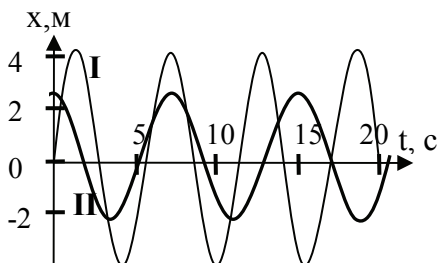


Рис.3.2з

3.3. Какое из колебаний (рис.3.2з) началось по причине сообщения ему потенциальной энергии?

3.4. Два маятника одинаковой длины отклонили на одинаковый угол. Первый из них начал совершать колебания на четверть периода раньше, чем второй. Начертите графики их колебаний. В каком положении будет находиться второй маятник, когда первый максимально отклонится от положения равновесия?

3.5. На рис.3.3з приведены графики $x(t)$ четырех различных колебаний. По графикам определить разность фаз между 1 и 2, 2 и 3, 3 и 4, 1 и 4 колебаниями в долях периода. Какие колебания происходят в одинаковой фазе? Какие колебания происходят в противоположной?

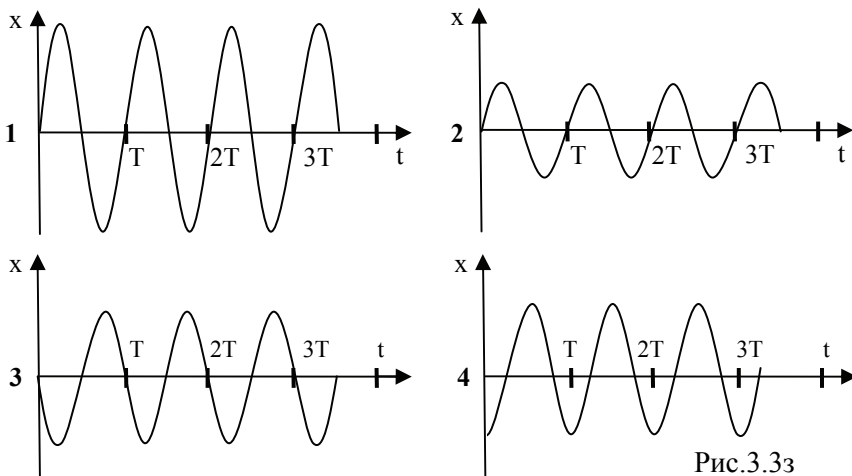


Рис.3.3з

3.6.* Колебания каких из приведенных ниже тел будут свободными: а) поршень в цилиндре двигателя; б) игла швейной машины; в) ветка дерева после того, как с нее слетела птица; г) струна музыкального инструмента; д) конец стрелки компаса; е) мембрана телефона при разговоре; ж) чашки рычажных весов? Какие из приведенных колебаний вынужденные?

3.7. *Чтобы отвести качели с сидящим на них человеком на большой угол, необходимо приложить значительную силу. Почему же раскачать качели до такого же угла отклонения можно с помощью значительно меньшего усилия?

3.8. На шарик массой $m = 0,1$ кг, закрепленный на пружине жесткостью $k = 400$ Н/м, действуют переменная сила, частота

которой $\nu = 16$ Гц. Будет ли при этом наблюдаться резонанс? С какой частотой ν_0 должна действовать сила, чтобы наблюдалось явление резонанса?

3.9. Пассажирский вагон массой $m = 20$ т и жесткостью подвески $k = 240$ кН/м движется в составе поезда по рельсам. С какой скоростью движется поезд, если на рельсовых стыках вагон получает периодическое силовое воздействие и сильно раскачивается? Длина рельса $L = 25$ м. Скорость выразить в км/час. Для чего в промежутки между длинными вставляют короткие рельсы длиной $L_1 = 12,5$ м?

4. Механические волны. Звук

Волны – это колебания, распространяющиеся в пространстве.

Механические волны распространяются в некоторой среде.

Образование волн

Поплавки на воде при прохождении волны колеблются вверх и вниз, но не перемещаются по направлению распространения волны. Также и вода не переносится в направлении распространения волны.

Если один конец длинного горизонтального шнура перемещать вверх-вниз, то по шнуру побежит волна. Таким образом, шнур является переносчиком волны, но точки шнура не перемещаются в направлении распространения волны, а совершают колебания в перпендикулярном направлении.

Источником волн являются источники колебаний. Шнур и вода являются переносчиками колебаний.

Переносчиками колебаний могут быть твердые, жидкие и газообразные среды.

Длина и скорость волны

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

Длина волны обозначается обычно греческой буквой λ (лямбда).

Из определения следует, что длина волны равна расстоянию между двумя ближайшими гребнями или впадинами.

Строго говоря, длина волны равна расстоянию между двумя ближайшими точками среды, колеблющимися в одинаковой фазе.

Скорость волны – скорость распространения колебаний в среде.

Согласно определению длины волны

$$\lambda = v \cdot T$$

(T – период колебаний, v – скорость волны.).

Так как частота колебаний $\nu = \frac{1}{T}$, то $v = \lambda \cdot \nu$.

Скорость волны v нельзя путать со скоростью движения колеблющихся частиц среды V . Частицы среды волной не переносятся! Они колеблются относительно своих положений равновесия.

Поперечные и продольные волны

Рассмотрим часто используемую модель образования волны – горизонтальную цепочку шаров, между которыми действуют силы упругости, т.е. соединенных пружинами. Волну можно вызвать, если какой-нибудь шарик отвести вверх или вниз и отпустить. Колебания этого шара будут передаваться вдоль цепочки – образуется волна, в которой все шарики будут колебаться в вертикальном направлении поперек направлению распространения волны (вдоль цепочки). Это будет поперечная волна.

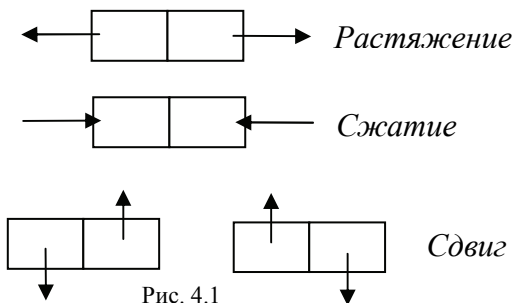
Поперечные волны – волны, в которых колебания частиц среды происходят перпендикулярно к направлению распространения волны.

Волну вдоль цепочки частиц можно вызвать и иначе. Если начальную частицу отвести не вверх или вниз, а влево или вправо, то образуется разрежение (или сгущение) частиц, которое благодаря упругим связям между частицами будет распространяться вдоль цепочки. При этом частицы будут совершать колебания вдоль цепочки около своих положений равновесия.

Продольные волны – волны, в которых колебания частиц среды происходят вдоль направления распространения волны.

Формулы для скорости, частоты, периода и длины продольной волны такие же, как и для поперечной волны, хотя скорости распространения этих волн в одной и той же среде различны.

В случае продольной волны можно сказать, что длина волны равна расстоянию между двумя ближайшими сгущениями или разрежениями.



При прохождении продольной волны реализуются такие виды деформации среды, как растяжение и сжатие. При прохождении поперечной волны реализуется такой вид деформации, как сдвиг (рис. 4.1).

В жидкостях, газах и твердых телах при сжатии и растяжении возникают упругие силы, поэтому продольные волны хорошо распространяются во всех средах. Поперечные волны распространяются только в твердых средах, так как при сдвиговых деформациях в жидкостях и газах упругие силы не возникают и волна быстро затухает. Таким образом, поперечные волны распространяются только в твердых средах.

В твердых средах скорость поперечной волны меньше скорости продольной.

Скорость волн в более плотных средах больше, чем в менее плотных.

Если в средах имеются неоднородности, то скорость волны изменяется.

Вообще говоря, здесь речь идет о распространении волн в сплошной среде, то есть в толще среды. Иными словами, если имеется точечный источник колебаний, то от него волна распространяется во все стороны и области сжатия (разряжения) можно представить в виде концентрических сфер (рис. 4.2).

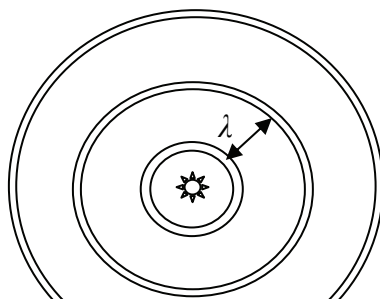


Рис. 4.2

На границах раздела сред (на поверхностях) могут возникать поперечные волны. Так, на границах жидкость – газ, например, на поверхности воды мы наблюдаем поперечные волны.

Звуковые волны

У любого звука есть источник. Источниками являются колеблющиеся тела. Например, струна гитары. Если ее возбудить в середине, она будет казаться толще, чем по краям. Это потому, что струна колеблется. Прикоснитесь ногтем к стру-

не, и вы почувствуете эти колебания. Колебания передаются воздушной среде и распространяются в ней во все стороны. При этом в воздухе происходит перемещение областей с более высокой и более низкой плотностями, то есть распространяется продольная волна сжатия и расширения воздуха.

Человек воспринимает, т.е. слышит звуки с частотами от 16 Гц до 20 кГц. Волны с частотами более 20 кГц называются ультразвуком. Волны с частотами менее 16 Гц называются инфразвуком. Все звуковые волны, независимо от частоты, распространяются в воздухе практически с одинаковой скоростью. Она равна 330 м/с.

Звуковые волны распространяются не только в воздухе, но и в жидких (вода), и твердых средах. Скорость распространения звука в этих средах больше, чем в воздухе.

Для распространения звука необходима среда. В вакууме звук не распространяется.

Особенностью ультразвуковых волн является возможность их узконаправленного распространения в виде пучка.

Резонанс

Если в пространстве распространяются звуковые колебания с определенной частотой ν_1 , т. е. проходит звуковая волна и на пути ее распространения находятся источники колебаний с такой же собственной частотой $\nu_0 = \nu_1$, то такие источники будут возбуждаться, усиливая тем самым звук этой частоты. Это явление называется акустическим резонансом.

Резонируют не только источники колебаний. Резонировать могут столбы воздуха, находящиеся в частично замкнутых объемах, например, в трубках, открытых с одной стороны. Очевидно, что наиболее громкое звучание такого резонатора наступает, когда собственная частота его колебаний совпадает с частотой колебаний источника.

Поэтому камертоны укрепляют на ящиках, открытых с одной стороны. Причем для камертона с разной частотой звучания ящики имеют разные размеры. Если взять струнные музыкальные инструменты, то в качестве резонаторов используются их корпуса. Они имеют сложную форму, чтобы разными частями резонировать с разными частотами струн.

Человек, произнося звуки, также использует резонатор – это полость рта.

Дифракция звука

Дифракция – явления, связанные с огибанием препятствия звуковой волной.

Степень такого огибания зависит от соотношения между длиной волны и размером препятствия или отверстия. Оценим величину длины звуковой волны. Для нижней границы частоты в 16 Гц $\lambda = 20$ м, а для верхней – 20 кГц $\lambda = 15$ мм. Дифракция наблюдается тогда, когда на пути звука оказывается какое-либо препятствие. Предметы размерами от нескольких сантиметров до метров звук огибает. Так, можно разговаривать с кем-то стоящим за углом здания, хотя он и не виден. Звуковая волна легко огибает угол.

Если размеры препятствия намного больше длины волны, то звук отражается, а позади препятствия формируется зона акустической тени. Отраженный звук мы слышим как эхо.

Для того чтобы услышать эхо как отдельный звук, необходимо, чтобы преграда (стена) находилась на расстоянии не меньше 11 м. Явление возникновения эха при отражении используется на практике: есть способ определения местоположения тел по отражению от них ультразвуковых сигналов, называемый эхолокацией.

Основные характеристики звука

Звуки, издаваемые камертоном или другими гармонически колеблющимися телами, называются чистыми музыкальными звуками. Осциллограммы таких звуков – это синусоиды различной частоты.

Громкость звука оценивается органами слуха человека. Мы с вами оцениваем энергию колебаний пропорционально квадрату амплитуды. Громкость действительно зависит от амплитуды, но зависимость более сложная.

Высота звука определяется его частотой: бас (80-350 Гц) и колоратурное сопрано (до 1400 Гц). Осциллограммы таких звуков – синусоиды различной частоты.

Шумы отличаются от чистых музыкальных звуков. Им не соответствует определенная частота колебаний. Это смесь хаотически чередующихся звуков различной частоты.

Тембр звука – характерная для каждого голоса и музыкального инструмента окраска звука, вызываемая отклонением от синусоидальности в колебаниях. Присутствует основной тон, на который накладываются более высокочастотные колебания – обертоны.

Задачи к разделу 4

4.1. Расстояние между соседними гребнями волны на море $L = 8$ м. Период колебаний катера, качающегося на волне, $T = 2,5$ с. Чему равна скорость волны?

4.2. В реку брошен камень. Какой будет образовавшаяся волна: круговой или вытянутой течением?

4.3. * По поверхности воды в озере волна распространяется со скоростью $v = 6$ м/с. Каковы период T и частота ν колебаний поплавка, если длина волны $\lambda = 3$ м?

4.4.* Рыболов заметил, что за $\tau = 10$ с поплавок совершил на волнах $N = 20$ колебаний, а расстояние между соседними гребнями волн $l = 1,2$ м. Какова скорость v распространения волн?

4.5. Волна с частотой колебаний $\nu = 165$ Гц распространяется со скоростью $v = 340$ м/с. Какова длина волны λ ?

4.6. В океанах длина волны достигает $\lambda = 300$ м, а период $T = 13,5$ с. Определить скорость распространения такой волны.

4.7. При землетрясении на сейсмографе сигнал от поперечной волны зафиксирован на $\tau = 25$ с позже сигнала от продольной волны. Каково расстояние от сейсмографа до эпицентра землетрясения, если в гранитном массиве скорость продольной волны $v = 5,40$ км/с, а скорость поперечной $v_0 = 3,85$ км/с?

4.8. Длина звуковой волны в воздухе для самого низкого мужского голоса достигает $\lambda_1 = 4,3$ м, а для самого высокого женского голоса $\lambda_2 = 25$ см. Найти частоты колебаний этих голосов. Скорость звука в воздухе $v = 340$ м/с.

4.9.* Частотный диапазон рояля от $\nu_1 = 90$ Гц до $\nu_2 = 9000$ Гц. Найти диапазон длин этих звуковых волн в воздухе. Скорость звука в воздухе $v = 340$ м/с.

4.10. На каком расстоянии от наблюдателя вспыхнула молния, если он услышал гром через $\tau = 6$ с после того как увидел молнию? Скорость звука в воздухе $v = 340$ м/с.

4.11. Расстояние между двумя железнодорожными станциями $L = 8,3$ км. Сколько времени идет звук от одной станции до другой по воздуху? по рельсам? Скорость звука в воздухе $v = 340$ м/с, в стали $v_0 = 5500$ м/с.

4.12. Стрелок слышит звук удара пули в мишень через $\tau = 1,5$ с после выстрела. На каком расстоянии от него поставлена мишень? Скорость полета пули $v_0 = 270$ м, скорость звука в воздухе $v = 340$ м/с.

4.13. Стекло поглощает звук меньше, чем воздух. Почему уличный шум слышен лучше при открытых окнах?

4.14. Охотник выстрелил, находясь в поле на расстоянии $L = 500$ м от лесного массива. Через какое время τ он услышит эхо от выстрела? Скорость звука в воздухе $v = 340$ м/с.

Почему в помещениях практически эхо не слышно?

4.15. Какова глубина моря, если посланный и отраженный от морского дна ультразвук возвратился на поверхность через $\tau = 0,93$ с? Скорость ультразвука в воде $v = 1490$ м/с.

4.16. На какой глубине проходит косяк рыбы (см. задачу 4.14), если появляется дополнительный отраженный сигнал через $\tau_0 = 0,33$ с?

4.17. Стальную деталь проверяют ультразвуковым дефектоскопом. Первый отраженный сигнал был получен через $\tau_1 = 65$ мкс после посылки, второй – через $\tau_2 = 170$ мкс. Какова толщина детали? На какой глубине находится дефект? Скорость ультразвука в стали $v = 5190$ м/с.

5. Электромагнитная индукция

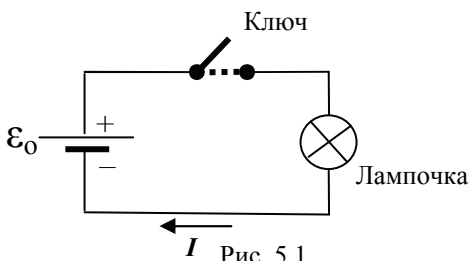
Простейшим устройством, позволяющим определить наличие магнитного поля, является стрелка компаса. Известно, что стрелка компаса одним концом указывает все время на север. Однако если компас поднести к постоянному магниту, то она начнет отклоняться от своего естественного положения. Оказывается, что такое же действие на стрелку оказыва-

ет проводник с электрическим током. Следовательно, вокруг проводника с током возникает магнитное поле.

Таким образом, источниками магнитного поля являются постоянные магниты и проводники, по которым течет электрический ток.

Если взять два постоянных магнита, то в зависимости от их расположения они могут либо притягиваться, либо отталкиваться. Так же могут вести и проводники с током. Если в параллельных проводниках токи текут в одном направлении, то такие проводники будут притягиваться, если в противоположных – отталкиваться. Более того, можно воздействовать на проводник с током постоянным магнитом – заставить его смещаться.

Впервые электрический ток получили, используя аккумулятор типа нынешнего, но, конечно, более примитивный. Электрическая схема довольно проста (рис. 5.1).



Величина тока определяется законом Ома $I = \frac{\epsilon_0}{R}$, где R – сопротивление лампочки, а ϵ_0 – ЭДС батареи. Поскольку аккумуляторы были сложны и ненадежны, возникла мысль: если электрический ток создает вокруг магнитное поле, то нельзя ли с помощью магнитного поля создать электрический ток. Оказалось, что можно, но для этого понадобилось много лет. Проблема заключалась в том, что постоянное магнитное поле, в котором находился проводник, не приводило к возникновению тока. Ток появлялся только, если поле изменялось.

Электромагнитная индукция – явление возникновения электрического тока в замкнутом проводнике при изменении потока магнитного поля, пронизывающего контур проводника.

Опыты Фарадея

Рассмотрим схему опытов, обнаруживших явления электромагнитной индукции (рис. 5.2).

Два проводящих контура (вообще говоря, это катушки с намотанным проводом) размещены один под другим так, чтобы плоскости были параллельны (оси катушек совпадали). Первый контур через ключ K и

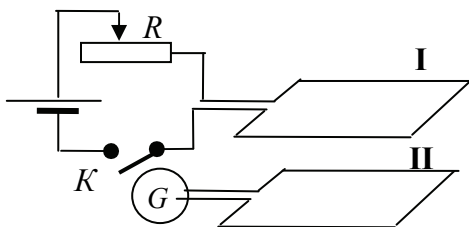


Рис. 5.2

реостат R соединен с источником питания. Второй контур замкнут на гальванометр G .

Если по первому контуру протекает постоянный электрический ток, во втором контуре ток не обнаруживается.

Ток во втором контуре обнаруживается в следующих случаях.

1. В момент замыкания (размыкания) ключа K , когда ток в первом контуре быстро возрастает от нуля до некоторой постоянной величины (убывает от некоторой постоянной величины до нуля).

2. При движении движка реостата при замкнутом ключе K (изменяется сила тока в первом контуре).

3. При относительных перемещениях контуров (удаляются, сближаются, смещаются) при включенном ключе K .

4. При введении в зазор между контурами ферромагнитного материала.

5. При замене первого контура постоянным магнитом, но перемещающимся относительно второго контура.

Ток, возникающий во втором контуре, называют индукционным. Он возникает в замкнутом контуре только при условии изменения магнитного поля, пронизывающего этот контур. При этом в контуре возникает ЭДС, которая называется ЭДС индукции и обозначается \mathcal{E}_i , в отличие от \mathcal{E} для постоянных источников тока.

Характеристики магнитного пол

Магнитное поле характеризуется вектором \vec{B} , который называется **вектором магнитной индукции**. Это означает, что магнитное поле имеет не только величину (больше, меньше), но и направление в пространстве. Векторные величины используются и для электрических полей: вектор \vec{E} – напряженность электрического поля, и для гравитационных полей: вектор \vec{G} – ускорение гравитации. Кстати, с последним вы знакомы: это ускорение свободного падения \vec{g} вблизи поверхности Земли.

Единицей магнитной индукции является тесла (Тл).

С магнитным полем связано важное понятие – магнитный поток, по-другому – поток магнитной индукции Φ . Магнитный поток в случае постоянного магнитного поля определяется выражением:

$$\Phi = BS,$$

где B – величина магнитной индукции, а S – площадь контура, расположенного перпендикулярно к вектору \vec{B} .

Единицей магнитного потока является вебер (Вб).

Как выглядит магнитное поле? Человеческие органы чувств его не воспринимают, но это не значит, что его не существует. Его можно зарегистрировать по косвенным признакам, например, по поведению магнитной стрелки компаса.

Магнитное поле можно изобразить в виде линий индукции. Например (рис. 5.3), поле постоянного магнита А, поле прямого проводника с током Б, поле кругового проводника с током В и поле катушки (соленоида) Г.

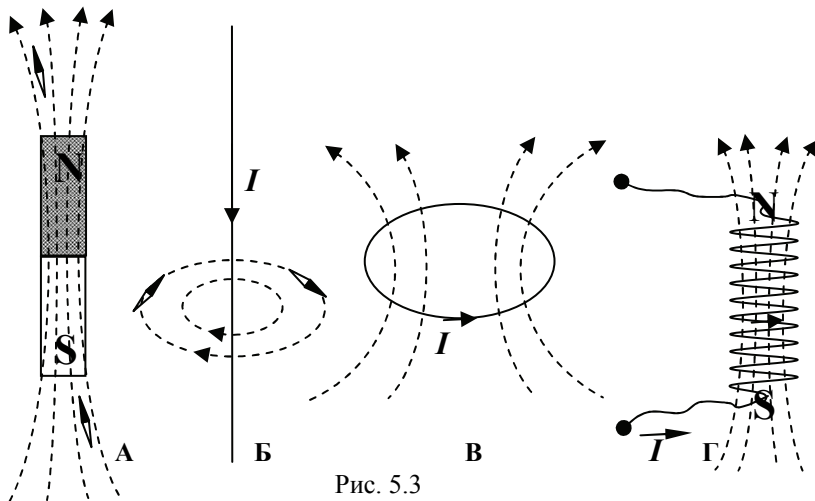


Рис. 5.3

Следует обратить внимание на то, что поле катушки, по которой протекает постоянный ток, аналогично по форме полю постоянного прямого магнита.

Направление индукционного тока. Правило Ленца

Итак, для того чтобы возникла ЭДС индукции и индукционный ток, необходимо чтобы через замкнутый контур изменялся магнитный поток. Поток можно изменять по-разному: либо изменять величину индукции B , либо изменять площадь контура S , либо и то и другое.

Определим направление индукционного тока. Проведем такой эксперимент: подвесим на нити замкнутый легкий проводящий контур в виде кольца. Будем подносить к нему постоянный магнит. Кольцо будет отталкиваться от магнита. Если магнит выдвигать, кольцо будет притягиваться к магниту. Если магнит не перемещать, то кольцо будет висеть так, как будто магнита нет вовсе. Если кольцо разорвать, т.е. сделать контур не замкнутым, то оно на перемещения магнита реагировать не будет. Результаты опытов не зависят от полярности магнита (рис.5.4).

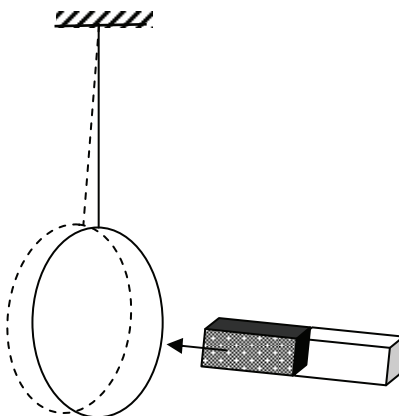


Рис.5.4

Обобщение результатов приводит к выводу, который носит название **правила Ленца**: *индукционный ток имеет всегда такое направление, что его магнитное поле препятствует любым изменениям магнитного потока, вызывающим появление индукционного тока.*

Самоиндукция

Электрический ток, проходя по проводнику, создает вокруг проводника магнитное поле (рис.5.3Б). Если создать из проводника замкнутый контур и (рис.5.3В), то магнитный поток внутри контура Φ будет пропорционален величине тока I в контуре:

$$\Phi = L \cdot I,$$

где L – коэффициент пропорциональности, который называется индуктивностью контура или просто индуктивностью.

Индуктивность – физическая величина, равная отношению магнитного потока Φ через площадь контура, создаваемого током, текущим в контуре, к силе этого тока I :

$$L = \frac{\Phi}{I}.$$

Индуктивность зависит от геометрии контура, числа витков и т.п. Из проводника длиной 1 м можно изготовить различные контуры. Они будут обладать различной индуктивностью.

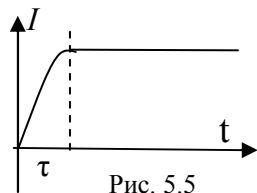
Единицей индуктивности является генри (Гн).

Если в таком контуре (рис.5.3В) увеличивать ток, то будет увеличиваться магнитный поток через контур. Следовательно, в контуре должна возникнуть ЭДС индукции, так как происходит изменение магнитного потока. Дело в том, что при возникновении индукционного тока безразлично, из-за чего происходит изменение потока: за счет «чужого» внешнего магнитного поля или за счет «своего». Эта ЭДС возникает, она называется ЭДС самоиндукции и обозначается \mathcal{E}_s .

Самоиндукция – явление возникновения ЭДС индукции в контуре в результате изменения силы тока в этом же контуре.

А как же направлен индукционный ток? Индукционный ток будет направлен против основного, если основной увеличивается, и направлен по основному, если он уменьшается.

Посмотрим на график изменения тока в момент включения простейшей электрической цепи (рис.5.5). Оказывается, ток от 0 до I изменяется не мгновенно: он нарастает до этого значения практически в течение некоторого времени τ . Чем больше индуктивность контура, тем больше время τ .



Электрический генератор. Переменный ток

Самым простым способом изменить поток магнитного поля через контур является изменение площади контура. Рассмотрим одинаковые контуры, но расположим их по-разному в одном и том же магнитном поле (рис.5.6). Так, в случае А контур перпендикулярен к полю – через него проходит максимальный поток. В случае Б контур повернут на некоторый угол – поток становится меньше. В случае В контур параллелен полю – поток через контур не проходит – поток равен нулю.

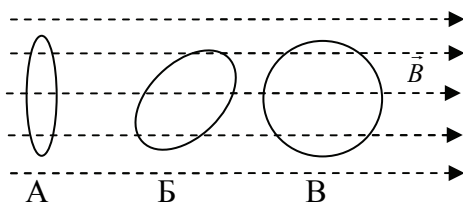


Рис. 5.6

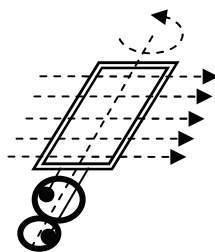


Рис. 5.7

По такому же принципу работает электрический генератор.

Плоская рамка с несколькими витками может вращаться вокруг оси, лежащей в плоскости рамки (рис.5.7). Вращение осуществляется с помощью любой механической машины (ветродвигатель). Рамка помещена в магнитное поле постоянных магнитов. Начальный и конечный концы проводника контура выведены с одной стороны вдоль оси рамки. Они скользят по кольцевым контактам, которые соединены с внешней цепью. При вращении рамки в магнитном поле поток нарастает от нуля до максимума, а затем спадает опять до нуля. Когда рамка повернется на 180° , все повторится, только ток будет течь в противоположную сторону. Графиком зависимости тока от времени с учетом изменения направления тока будет синусоида.

Итак, в рамке получается переменный ток. Его график представляет собой синусоиду. Такой же график будет и у ЭДС индукции в контуре.

Трансформатор

Трансформатор представляет собой две катушки, размещенные на общем ферромагнитном сердечнике (рис.5.8).

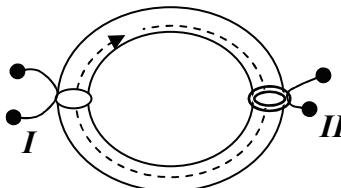


Рис. 5.8

Ферромагнитные материалы, помещенные в магнитное поле, усиливают его в несколько раз,

по сути, собирая его в себя из пространства, что позволяет избежать рассеяния магнитного поля.

К ферромагнитным материалам относятся металлы: железо, кобальт, никель и ряд других.

Подадим на первичную катушку (пусть она имеет всего один виток) переменный ток от генератора, который мы только что смастерили. Переменный магнитный поток, созданный первичной обмоткой, проходит по сердечнику и индуцирует ЭДС во вторичной обмотке. Если во вторичной обмотке 10 витков, то ЭДС индукции будет в 10 раз больше. Меняя число витков в первичной и вторичной обмотках, можно получить как повышающие, так и понижающие трансформаторы.

Передача электрической энергии на расстояние

Основной проблемой передачи электрической энергии является тепловая потеря на проводах от источника к потребителю. Эти расстояния достигают сотен и тысяч километров. Предположим, что потребитель заявляет, что ему необходима мощность $P = 10$ МВт и напряжение 220 В. Следовательно, электрический ток, поступающий к потребителю,

$$I = P/U.$$

Этот ток, проходя по проводам, нагревает их. При этом, согласно закону Джоуля – Ленца, выделяется (т.е. теряется) мощность $P_{\Pi} = I^2 R$, где R – сопротивление проводов от источника до потребителя. Уменьшить сопротивление практически невозможно. Однако если подставить значение тока в формулу потери мощности, получим $P_{\Pi} = P^2 R / U^2$.

Из этого выражения видно, что сократить потери можно, увеличивая напряжение. Для этих целей используются трансформаторы: повышающий у источника, а понижающий у потребителя. Передача тока по линии происходит под высоким напряжением (до 600 кВ)

Задачи к разделу 5

5.1. В магнитное поле с индукцией $B = 0,1$ Тл помещен контур, выполненный в форме кругового витка радиуса $R = 3,4$ см. Плоскость витка перпендикулярна к полю. Определить величину магнитного потока Φ через этот контур.

5.2. Какой магнитный поток будет проходить через катушку из $N = 20$ витков проволоки с тем же радиусом витка (см. задачу 5.1), помещенную в то же магнитное поле?

5.3. В магнитное поле с индукцией $B = 0,25$ Тл помещен плоский контур, выполненный в форме «восьмерки» с одинаковыми радиусами колец, равными $r = 2$ см. Плоскость контура перпендикулярна к полю. Определить величину магнитного потока Φ через этот контур. В каком случае поток будет равен нулю?

5.4. В магнитное поле с индукцией $B = 0,15$ Тл помещен контур, выполненный в форме прямоугольника со сторонами $a = 5$ см и $b = 3$ см. Определить величину магнитного потока Φ через этот контур, если: а) плоскость контура перпендику-

лярна к полю; б) плоскость контура параллельна полю; в) плоскость контура наклонена к полю под углом 30° .

5.5. Определить направление магнитного поля и положение полюсов одинаковых магнитов, если магнитная стрелка установилась так, как показано на рис. 5.1з.

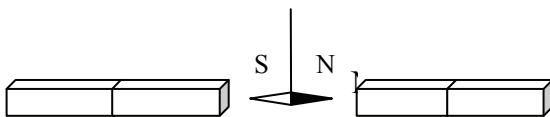


Рис. 5.1з

5.6. В плоскости листа лежит проводник, по которому течет ток (по стрелке, рис. 5.2з). Изобразите как установится магнитная стрелка, подвешенная на нити, в точках А и В под проводником. (Форму и обозначение полюсов стрелки см. в задаче 5.5).



Рис. 5.2з

5.7. Перпендикулярно к плоскости листа проходит проводник с током (рис. 5.3з). Ток направлен на нас. Изобразите, как установится магнитная стрелка, подвешенная на нити, в точках А, В, и С в плоскости листа.

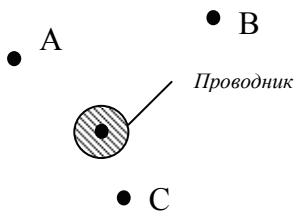


Рис. 5.3з

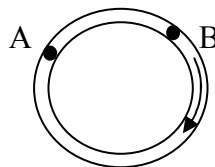


Рис. 5.4з

5.8. В плоскости листа лежит круговой контур, по которому течет ток (по стрелке, рис. 5.4з). Изобразите, как устано-

вится магнитная стрелка, подвешенная на нити, в точках А и В над проводником.

5.9. В плоскости листа лежит круговой контур с током. Магнитная стрелка, подвешенная на нити над контуром, установилась так, как показано на рис. 5.5з. В каком направлении проходит ток по контуру?

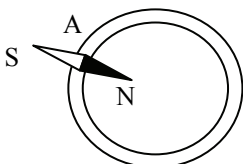


Рис. 5.5з

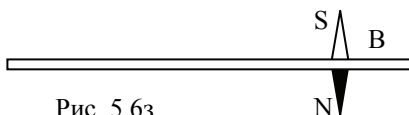


Рис. 5.6з

5.10. В плоскости листа лежит проводник, по которому течет ток. В каком направлении течет ток, если магнитная стрелка, подвешенная на нити под контуром, установилась так, как показано на рис. 5.6з?

5.11. Определить магнитный поток в контуре, если индуктивность L и ток I в контуре (численные значения величин приведены в таблице):

№	L , Гн	I , А
1	0,00143	5,0
2	0,211	12,3
3	0,00007	0,48
4	0,000003	1,85
5	0,5	20000

5.12. Определить индуктивность L контура, если в нем возникает магнитный поток $\Phi = 0,45$ мВб при токе $I = 5$ А?

5.13. К замкнутому контуру приближают постоянный магнит (рис. 5.7з). В каком направлении пойдет ток по этому контуру? Изменится ли направление тока, если перевернуть магнит и приближать его к контуру полюсом?

5.14. Постоянный магнит (см. задачу 5.13) подвесили на пружине и толкнули его вниз по направлению к контуру. Магнит начал совершать колебания. Начертите примерную осциллограмму тока в контуре, считая положительным направление тока по часовой стрелке.

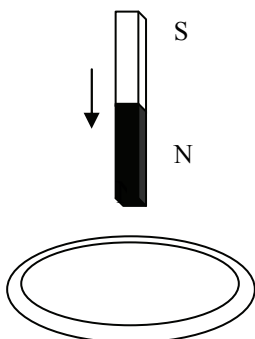


Рис. 5.7з

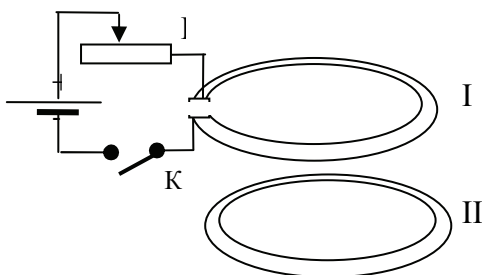


Рис. 5.8з

5.15. Определить направление индукционного тока в нижнем контуре (рис. 5.8) в случаях, когда: а) ключом замыкают цепь верхнего контура; б) при замкнутом ключе реостатом равномерно уменьшают ток в верхнем контуре; в) при замкнутом ключе приближают контуры друг к другу; г) ключом размыкают цепь.

5.16. Магнитный поток, пронизывающий контур, изменяется со временем так, как показано на рис. 5.9з. Построить примерный график изменения тока в этом контуре.

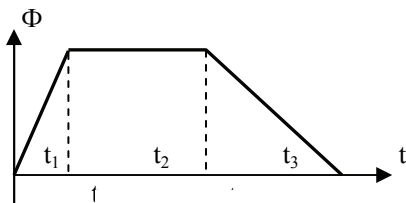


Рис. 5.9з

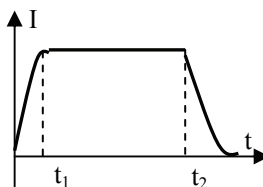


Рис. 5.10з

5.17. При включении (выключении) ключа (см. зад. 5.13) ток в верхнем контуре благодаря явлению самоиндукции изменяется так, как показано на графике (рис. 5.10з).

Ответить:

а) как будет изменяться ток, если увеличить индуктивность контура, увеличив число витков;

б) можно ли, изменив способ намотки, сделать контур практически с нулевой индуктивностью?

6. Емкость. Колебательный контур.

Электромагнитные волны

Конденсатор. Емкость

Одним из важных элементов электрических цепей, в которых возбуждаются электромагнитные колебания, является конденсатор (накопитель). Конденсатор устроен так: две металлические пластины – обкладки расположены на небольшом расстоянии друг от друга. Между пластинами располагается тонкая прослойка воздуха или какого-либо изолирующего материала. Если вам понадобится изготовить конденсатор – самый простой способ: взять две полоски пищевой фольги, проложить между ними чуть более широкий лист тонкой бумаги, проложить два провода между полосками фольги и бумагой (это будут выводы), скрутить все в рулон – получим бумажный конденсатор.

Характерная особенность конденсатора – способность накапливать электрический заряд.

Если конденсатор подключить к источнику постоянного тока, то на его обкладках появятся одинаковые по величине заряды q разного знака (рис. 6.1). При этом величина заряда на каждой пластине пропорциональна напряжению U : $q = CU$. Коэффициент пропорциональности C характеризует конденсатор и называется емкостью.

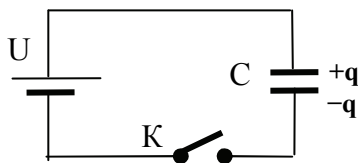


Рис. 6.1

Электрическая емкость (емкость) – физическая величина, равная отношению заряда на пластине конденсатора к напряжению между пластинами:

$$C = \frac{q}{U}.$$

Единицей электрической емкости является фарад (Ф).

Опыт показывает, что емкость конденсатора тем больше, чем больше площадь пластин (обкладок) и чем меньше расстояние между пластинами. Однако уменьшение расстояния между обкладками или увеличение напряжения между ними может привести к пробое конденсатора, поэтому конденсаторы помечают, на какое максимальное напряжение они рассчитаны.

На практике иногда требуются конденсаторы переменной емкости. Они состоят из двух групп пластин, которые могут вдвигаться друг в друга, изменяя тем самым эффективную площадь конденсатора.

Если конденсатор зарядить, то в нем будет электрическое поле и связанная с ним энергия электрического поля, которая определяется выражением:

$$E_3 = \frac{q^2}{2C}.$$

Это выражение можно записать по-другому, если учесть, что $C = q/U$:

$$E_3 = \frac{qU}{2} = \frac{CU^2}{2}.$$

Энергия магнитного поля

Если создать из проводника замкнутый контур, то магнитный поток Φ через площадь, охватываемую контуром, будет пропорционален величине тока I в контуре:

$$\Phi = L \cdot I,$$

где L – коэффициент пропорциональности, который называется индуктивностью контура – об этом сказано в предыдущем разделе.

Индуктивность контура зависит от его геометрии, числа витков, наличия ферромагнитных материалов внутри контура. Сравнительно большую индуктивность имеют катушки с намотанным на них проводом с большим числом витков и с железным сердечником внутри. При прохождении тока I по катушке с индуктивностью L в ней и окружающем пространстве создается магнитное поле, энергия которого определяется выражением:

$$E_m = \frac{LI^2}{2}.$$

Колебательный контур

Соберем электрическую цепь из конденсатора C , катушки L и аккумулятора. Поставив переключатель в положение 1, зарядим конденсатор до напряжения U . Переведем переключатель в положение 2. Конденсатор разряжается через катуш-

ку и в катушке течет ток. Если к цепи подключить осциллограф, то на экране появится осциллограмма затухающих колебаний (рис. 6.2).

Электрическая цепь, состоящая из конденсатора и катушки индуктивности, называется **колебательным контуром**. В такой цепи, если конденсатор вначале заряжен, возникают свободные электромагнитные колебания.

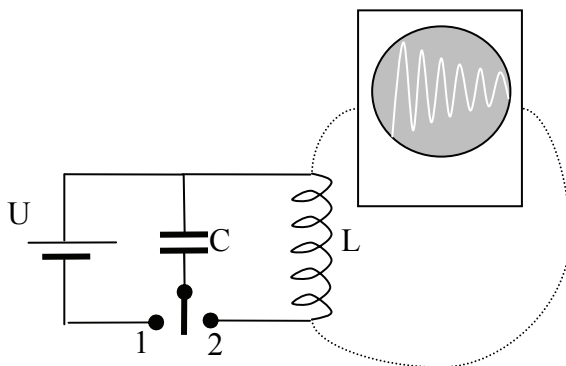


Рис. 6.2

Итак, вначале в конденсаторе запасена энергия $E_э = q_0^2/2C$. При разряде конденсатора через катушку в ней возникает ЭДС самоиндукции, которая препятствует мгновенному увеличению тока. По мере разряда конденсатора уменьшается $E_э$, но одновременно растет энергия магнитного поля $E_м$ в катушке.

В момент, когда конденсатор полностью разрядится ($q = 0$), энергия электрического поля $E_э$ станет равна нулю, а энергия магнитного поля $E_м$ будет максимальной и сила тока в катушке достигнет максимального значения $I_м$. Несмотря на то, что конденсатор разряжен, ток благодаря ЭДС самоиндукции не может прекратиться сразу. Поэтому конденсатор перезаряжается. На той пластине, где был положительный

заряд, теперь будет отрицательный. Ток прекращается, и вся энергия сосредоточена в заряженном конденсаторе. К этому моменту проходит полпериода колебания. Далее все повторяется, только ток течет в противоположном направлении.

Явления в колебательном контуре аналогичны явлениям при колебаниях математического маятника (рис. 6.3).

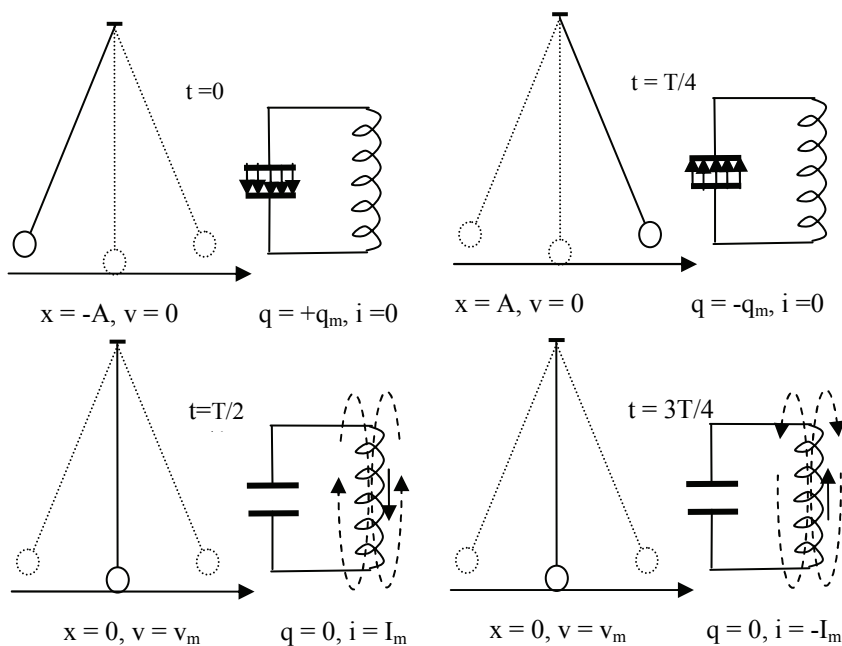


Рис. 6.3

Свободные колебания в контуре со временем затухают так же, как и колебания математического маятника. На затухание влияет наличие электрического сопротивления в проводниках. При каждом колебании часть энергии колебаний переходит в тепловую (внутреннюю) энергию, а со временем вся энергия колебаний переходит в тепловую.

Изменяя C и L , можно экспериментально определить период электромагнитных колебаний.

Выражение для периода электромагнитных колебаний в контуре имеет вид (если не учитывать затухания)

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

и называется формулой Томсона.

Для того чтобы в колебательном контуре получить незатухающие колебания, необходимо осуществлять постоянную подзарядку конденсатора от источника питания. Но источник должен подключаться один раз за период через $t = T, 2T$ и т.д. Для этого нужен быстродействующий ключ, который способен в нужный момент подключить аккумулятор. В качестве такого ключа используются транзисторы, а управление включением осуществляется с помощью дополнительной катушки, размещаемой рядом с катушкой контура.

Вынужденные электромагнитные колебания в контуре получают при подсоединении генератора переменного тока. В этом случае частота и период будут определяться генератором. Однако если частота колебаний генератора совпадает с собственной частотой колебаний контура, в контуре резко возрастет амплитуда колебаний тока. Это явление называется резонансом.

Электромагнитное поле

Теория электромагнитного поля была создана Максвеллом к 1865 году. Из теории следовало, что постоянные магнитное и электрическое поля есть частные случаи проявления электромагнитного, когда заряды неподвижны или движутся с постоянной скоростью.

Если какое-либо поле изменяется во времени в некоторой области пространства, то в ней присутствуют и магнитное, и электрическое поле. Согласно Максвеллу, изменяющееся магнитное поле (магнит колеблется) приводит к созданию в этой области изменяющегося электрического полей. Если в этом пространстве есть проводящий замкнутый контур, то в

нем электрические поля вызовут движение зарядов, т.е. появится электрический ток. Если магнитное поле остается постоянным, то электрическое поле не возникает и движения зарядов в проводнике не происходит.

Магнитные поля изображают линиями индукции. В каждой точке пространства вектор магнитной индукции \vec{B} направлен по касательной к линии индукции. Аналогично электрическое поле изображается линиями напряженности. В каждой точке пространства вектор напряженности электрического поля \vec{E} направлен по касательной к линии напряженности.

Электромагнитные волны

Одним из важнейших выводов из теории Максвелла был вывод о возможности существования электромагнитных волн. Через 10 лет электромагнитные волны были экспериментально обнаружены Герцем.

Для образования электромагнитной волны (как и для прочих волн) необходим источник. В качестве источника для электромагнитной волны необходимо, чтобы в некоторой области пространства были колеблющиеся электрические заряды. Хорошими источниками электромагнитных волн являются антенны радиотелевизионных передатчиков. Колебания зарядов приводят к колебанию вектора \vec{E} напряженности электрического поля, что вызывает в той же области колебания вектора индукции \vec{B} . В соседних точках пространства также возникнут колебания векторов \vec{E} и \vec{B} , но с некоторым запаздыванием. Эти колебания вызовут, в свою очередь, колебания поля в более далеких точках, но с еще большим запаздыванием.

Этот процесс напоминает распространение упругой волны в среде (твердой, жидкой или газообразной). Однако при распространении электромагнитной волны происходят колебания напряженности электрического поля и индукции магнитного поля \vec{E} и \vec{B} , поэтому электромагнитная волна может распространяться и в вакууме.

Свойства электромагнитных волн.

1. Электромагнитные волны – волны поперечные.

Векторы \vec{E} и \vec{B} колеблются перпендикулярно направлению распространения волны (рис. 6.4).

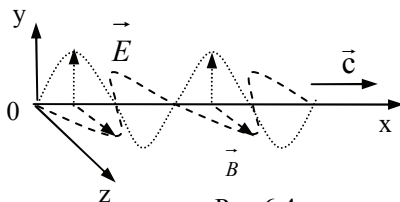


Рис.6.4

2. Векторы \vec{E} и \vec{B} колеблются перпендикулярно друг к другу в одинаковой фазе.

3. Скорость электромагнитных волн в вакууме (воздухе) постоянна и равна $c = 3 \cdot 10^8$ м/с.

4. Скорость электромагнитных волн в среде в n раз меньше, чем в вакууме:

$$v = c/n,$$

где n – показатель преломления среды. Для воздуха $n \approx 1$.

5. Соотношения между длиной волны, скоростью ее распространения, периодом и частотой такие же, как и для упругой волны:

$$\lambda = c \cdot T = c/\nu.$$

6. При переходе электромагнитной волны из вакуума (воздуха) в вещество ее частота не меняется. Длина волны уменьшается.

7. Электромагнитные волны переносят энергию.

Принципы радиосвязи

С помощью колебательных контуров можно получить электромагнитные волны с частотами от 1 до 10^{13} Гц или длинами волн от нескольких мегаметров до долей миллиметра.

Однако электромагнитные волны с частотами, близкими к звуковым до 50 кГц, очень быстро затухают. Поэтому невозможно звуковые колебания передать на большие расстояния, превратив их в электромагнитную волну той же частоты.

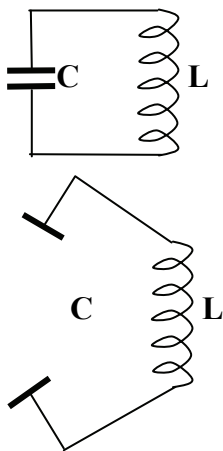


Рис. 6.5

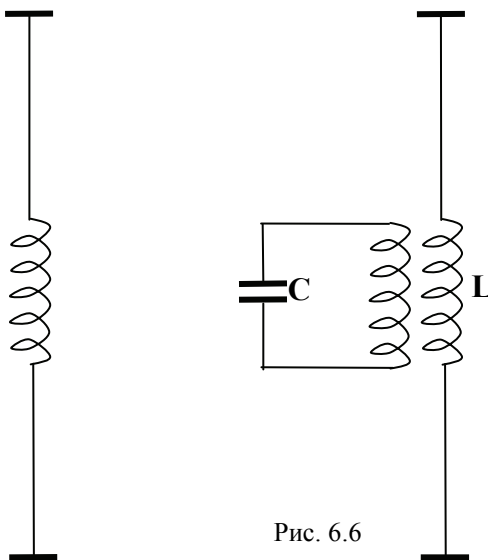


Рис. 6.6

Вообще говоря, колебательный контур в виде соединения конденсатора C и катушки L , даже с подпиткой от источника (чтобы сделать колебания незатухающими) излучает электромагнитную волну очень слабо – почти не излучает, так как все поля сосредоточены внутри контура. Для излучения необходимо контур сделать открытым (рис. 6.5). Такой открытый контур называют антенной. Открытый контур связывают индуктивно с закрытым, который является генератором (рис. 6.6), а сам открытый контур уже является излучателем элек-

тромагнитной волны такой же частоты, которую дает генератор. При этом размеры антенн должны быть сравнимы с длиной волны, вот почему очень длинные волны не излучаются.

Когда в такой системе идет излучение электромагнитных волн, требуется дополнительная подпитка от источника, так как волны забирают часть энергии от генератора. Таким образом осуществляется передача электромагнитных волн определенной частоты. Для передачи сигналов используются длинные волны (порядка 1000 м), средние (порядка 100 м), короткие (порядка 10 м), ультракороткие (порядка 1 м), дециметровые (доли метра).

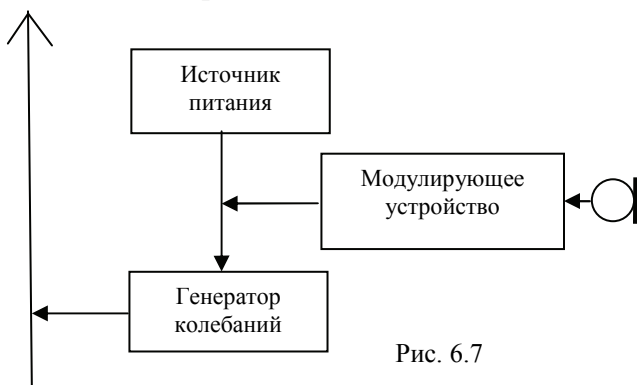


Рис. 6.7

В начальный период радиосвязи информацию передавали непосредственно на частоте генератора, посылая длинные импульсы (1000 колебаний) – тире и короткие (100 колебаний) – точка, а во время пауз прекращал работу генератора (Попов и Маркони). Для чтения информации использовали азбуку Морзе.

Для передачи звука необходимо внести коррективы (модуляцию) в работу генератора (рис. 6.7). Модулирующее устройство либо меняет его амплитуду – амплитудная модуляция (АМ), либо частоту – частотная модуляция (FM). Амплитудную модуляцию осуществить принципиально проще – на-

пряжение подпитки от источника надо изменять в соответствии с характером звуковых колебаний.

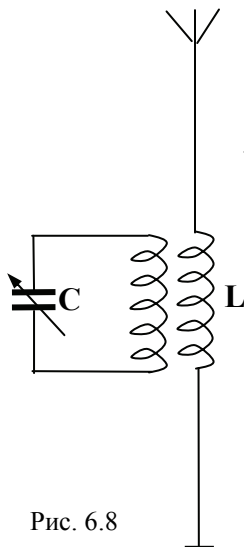


Рис. 6.8

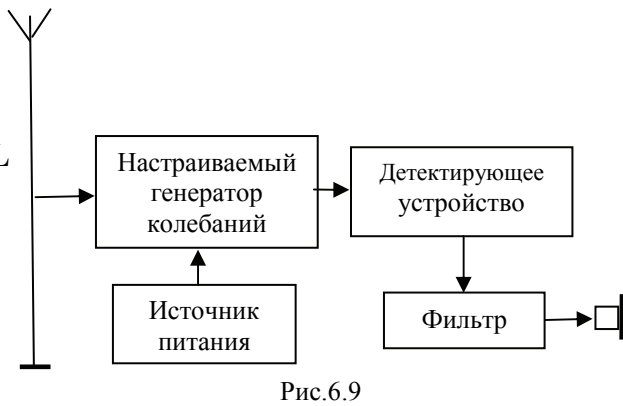


Рис.6.9

Для приема электромагнитных волн используется такая же антенна, индуктивно связанная с колебательным контуром внутри приемника (рис. 6.8).

У этого контура есть особенность – переменная емкость, что позволяет настраивать приемник на разные частоты.

Принятый приемником (рис. 6.9) модулированный высокочастотный сигнал не способен вызвать колебания мембраны телефона (динамика) – он может вызвать только высокочастотные колебания. Поэтому сначала сигнал детектируют, т.е. пропускают через фильтр часть переменного высокочастотного сигнала, идущего только в одном направлении. В качестве детекторов используют диоды. Детекторы пропускают ток только в одном направлении. После детектирования вместо высокочастотного непрерывного сигнала с переменной амплитудой мы имеем серию импульсов одной направленности с такой же переменной амплитудой. Далее с помощью

фильтра разделяют высокочастотную и низкочастотную составляющие колебаний. Высокочастотная составляющая проходит через фильтр, а низкочастотная – непосредственно через телефон (динамик).

Влияние электромагнитного поля и излучения на живые организмы

В ходе эволюционного развития жизнь на Земле приспособилась к естественному фону электромагнитного поля. Некоторые отклонения наблюдаются лишь в периоды солнечной активности, когда под влиянием мощного корпускулярного потока магнитное поле Земли испытывает кратковременные резкие изменения своих основных характеристик. Это явление, получившее название магнитных бурь, неблагоприятно отражается на состоянии всех экосистем, включая и организм человека.

На нынешнем этапе развития науки и техники человек вносит существенные изменения в естественное электромагнитное поле. Основные источники этих изменений – электромагнитные поля от линий электропередачи (ЛЭП) и электромагнитные поля от радиотелевизионных и радиолокационных станций.

Линии электропередачи и некоторые другие энергетические установки создают электромагнитные поля промышленных частот (50 Гц) в сотни раз выше среднего уровня естественных полей.

Вредное воздействие на человеческий организм невидимого, но очень опасного электромагнитного загрязнения окружающей среды идет гораздо более быстрыми темпами, чем прогресс в электронике.

Задачи к разделу 6

6.1. Какой заряд Q накопит конденсатор емкостью $C = 150$ мкФ при подключении к источнику питания с напряжением $U = 25$ кВ?

6.2. До какого напряжения U нужно зарядить конденсатор емкостью $C = 200$ пФ, чтобы ему передать заряд $Q = 58 \cdot \text{мкКл}$?

6.3. Определить энергию E_C заряженного конденсатора (по условию задачи 6.1). С какой скоростью v должен лететь снаряд массой $m = 1$ кг, имея кинетическую энергию, равную энергии заряженного конденсатора?

6.4. Определить энергию E_C заряженного конденсатора. Значения емкости C , заряда Q и напряжения U взять из таблицы:

№	C , Ф	Q , Кл	U , В
1	0,0000015	0,0052	-
2	$5,8 \cdot 10^{-8}$	-	200
3	$720 \cdot 10^{-12}$	0,0048	-
4	0,0000025	-	150
5	-	0,35	200

6.5. При изменении силы тока в катушке от I_1 до I_2 энергия магнитного поля изменилась на $\Delta E_M = E_{2M} - E_{1M}$. Найти индуктивность L катушки при следующих значениях величин:

	I_2 , А	I_1 , А	ΔE_M , Дж
1	6	4	1
2	9,2	2,9	12,1
3	2,8	0	0,27
4	2,8	14,3	-1,7
5	0	4,7	-3,2

6.6. В катушке с индуктивностью $L = 0,55$ Гн сила тока $I = 15$ А. Какова энергия E_M магнитного поля в этой катушке?

6.7. На рис. 6.13 показан график зависимости напряжения на конденсаторе колебательного контура. Изобразите примерный график изменения тока в этом контуре.

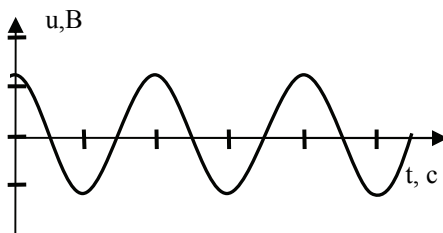


Рис. 6.13

6.8. Определить энергию E_M магнитного поля катушки, в которой при токе $I = 10$ А возникает магнитный поток $\Phi = 0,45$ мВб. Определить индуктивность L этой катушки.

6.9. Колебательный контур состоит из конденсатора емкостью $C = 400$ пФ и катушки индуктивностью $L = 10$ мГн. Определить амплитуду колебаний силы тока I_m , если амплитуда колебаний напряжения $U_m = 500$ В.

6.10. В колебательном контуре индуктивность катушки $L = 0,2$ Гн, а амплитуда колебаний силы тока $I_m = 40$ мА. Определить энергию E_3 электрического поля конденсатора и энергию E_M магнитного поля катушки в тот момент, когда мгновенное значение силы тока $i = 10$ мА.

6.11. Амплитуда силы тока в контуре $I_m = 1,4$ мА, а амплитуда напряжения $U_m = 280$ В. Определить силу тока и напряжение в тот момент времени, когда энергия магнитного поля катушки равна энергии электрического поля конденсатора.

6.12. В колебательном контуре емкость конденсатора $C = 600$ пФ, а амплитуда напряжения $U_m = 18$ В. Определить энергию магнитного поля E_m и энергию E_e электрического поля конденсатора в тот момент, когда напряжение на конденсаторе $u = 10$ В.

6.13. Индуктивность катушки, входящей в колебательный контур $L = 500$ мкГн. Требуется настроить этот контур на частоту $\nu = 1$ МГц. Какой должна быть электрическая емкость C конденсатора?

6.14. Определить период T и частоту ν свободных электрических колебаний в контуре с параметрами, заданными в таблице:

№	C	L
1	50 мкФ	50 Гн
2	0,2 мкФ	0,79 Гн
3	6 пФ	11 мкГн
4	2 пФ	0,5 мкГн
5	$9,11 \cdot 10^{-11}$ Ф	$3,11 \cdot 10^{-5}$ Гн

Какие из этих колебаний могут быть отнесены к колебаниям звуковой частоты?

6.15. Частота электрических колебаний в контуре $\nu = 15$ МГц. Емкость конденсатора $C = 200$ пФ. Определить индуктивность L катушки.

6.16. Период колебаний в контуре $T = 10$ мкс. При увеличении емкости конденсатора на величину $\Delta C = 30$ нФ ($\Delta C = C_2 - C_1$) частота колебаний уменьшилась в два раза. Определить индуктивность L катушки и начальную емкость C_1 конденсатора.

6.17. Во сколько раз изменится частота собственных колебаний в контуре, если емкость конденсатора увеличить в 25 раз ($C_2/C_1 = 25$), а индуктивность катушки уменьшить в 16 раз ($L_1/L_2 = 16$)?

6.18. Определить длину волны радиостанции, ведущей передачу на частоте $\nu = 82$ МГц.

6.19.* Катушка приемного контура радиоприемника имеет индуктивность $L = 1,52$ мкГн. Определить емкость конденсатора C , если контур настроен на прием длины волны $\lambda = 550$ м.

6.20. По международному соглашению сигналы бедствия SOS передаются на длине волны $\lambda = 600$ м. На какой частоте передаются эти сигналы?

6.21.* В каком диапазоне длин волн $\lambda_1 - \lambda_2$ работает приемник, если емкость конденсатора можно плавно изменить от $C_1 = 200$ пФ до $C_2 = 1800$ пФ, а индуктивность катушки постоянна и равна $L = 60$ мкГн?

6.22.* Радиостанция передает звуковой сигнал с частотой $\nu = 2$ кГц на электромагнитной волне $\lambda = 300$ м. Сколько колебаний N происходит в электромагнитной волне за один период звукового колебания?

6.23. Колебательный контур передатчика имеет параметры $C_1 = 160$ пФ и $L_1 = 5$ мГн, колебательный контур приемника имеет параметры $C_2 = 100$ пФ и $L_2 = 4$ мГн. Будут ли они настроены в резонанс (на одну частоту)? Какую величину должна иметь емкость приемника C_2 , чтобы приемник и передатчик были настроены в резонанс?

6.24. Определить расстояние S до самолета, если посланный наземным радиолокатором сигнал после отражения от самолета возвратился к локатору через $\tau = 0,15$ мс?

6.25. Радиосигнал, посланный на Луну, отразился и был принят на Земле через $\tau_1 = 2,5$ с после посылки. Такой же сигнал, посланный на Венеру, был принят через $\tau_2 = 2,5$ мин после посылки. Определить расстояние S_1 от Земли до Луны и расстояние S_2 от Земли до Венеры.

7. Скорость света. Дисперсия света

Свет – электромагнитная волна

Примерно до конца 17 века полагали, что свет имеет корпускулярную природу, т.е. мы видим предметы потому, что они испускают частицы (корпускулы). Корпускулярная теория объясняла большинство оптических явлений, известных в

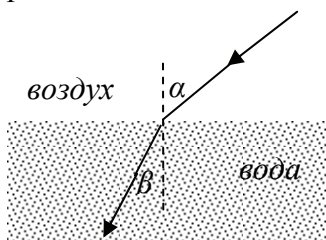


Рис. 7.1

то время. В частности, при преломлении света при его переходе из воздуха в стекло или воду угол преломления меньше угла падения (рис. 7.1). С точки зрения корпускулярной теории это объяснялось тем, что скорость корпускул в плотных средах больше, чем в воздухе.

К концу 17 века появилась волновая теория света, которая также объясняла те же оптические явления, но эффект преломления объяснялся тем, что скорость световой волны в плотных средах меньше, чем в воздухе. Осталось измерить скорость, чтобы решить спор. Но это удалось сделать только к середине 19 века, и было доказано, что свет – это волна.

Вместе с тем, волновые свойства были достаточно хорошо изучены для звуковых волн, которые распространяются в упругих средах. Оставался вопрос, в какой среде распространяется свет. Была выдвинута теория эфира, в котором находятся все планеты и т. д., и в этом эфире распространяется свет. Вообще говоря, в то время теория эфира получила широкое

распространение. Она использовалась и для объяснения ряда тепловых явлений. Вместе с тем, эфиру нужно было приписать несовместимые свойства: с одной стороны он должен обладать высокими упругими свойствами, как у твердых тел, с другой, он прозрачен и тела сквозь него проходят свободно.

Все решилось, когда Максвелл создал теорию электромагнитных волн и показал, что они могут распространяться в вакууме и их скорость там $c = 3 \cdot 10^8$ м/с. Эта скорость была сравнима с той, что измерили экспериментально для света. Когда определили длины волн световых волн, то оказалось, что свет занимает очень узкую область на шкале электромагнитных волн.

Электромагнитные волны, которые могут быть созданы с помощью источников электрических колебаний, имеют частоты меньше $3 \cdot 10^{12}$ Гц и длины волн больше 100 мкм.

Длины световых волн, видимых глазом, находятся в пределах от 0,75 до 0,40 мкм. К ним примыкают невидимые волны – инфракрасное излучение от 100 мкм до 0,75 мкм и ультрафиолетовое излучение – от 0,40 мкм до 10 нм.

Дисперсия света

Радуга как оптическое явление известно давно. Очень похожее явление наблюдается, когда на край зеркала или стекла падает луч света – видна та же система цветов, что и в радуге. Ньютон провел следующий эксперимент.

Сквозь экран с отверстием был пропущен солнечный луч, который падал на стеклянную трехгранную призму. При этом белый свет разлагается на несколько. Сильнее всего в призме отклоняется фиолетовый цвет, слабее – красный

Полученную цветную картину называют спектром. Было выделено семь цветов, которые при прохождении через вторую призму не разлагались (рис. 7.2).

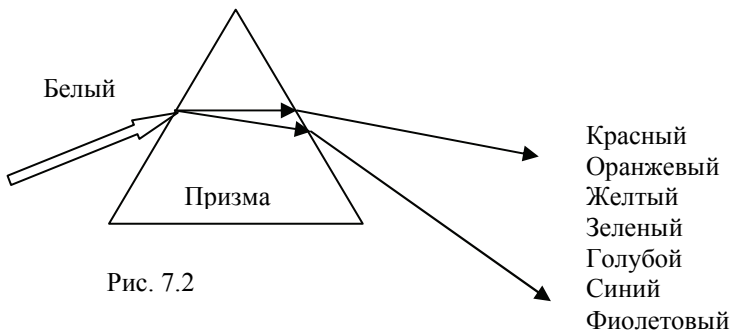


Рис. 7.2

Ньютоном были сделаны выводы:

- 1) существуют простые цвета, их называют монохроматическими;
- 2) у каждого цвета различная преломляемость;
- 3) изменить цвет можно при смешении двух и более простых;
- 4) белый цвет – это смесь всех семи цветов;
- 5) цвет любого тела объясняется его способностью поглощать или отражать простые цвета.

Это выводы Ньютона, которые вполне современны и не противоречат волновой природе света, хотя сам Ньютон был приверженцем корпускулярной теории.

Зная, что свет – это электромагнитная волна, дополним, что каждому простому цвету соответствует электромагнитная волна с частотой $\nu = c/\lambda$. Белый цвет – это смесь в определенной пропорции электромагнитных волн с различными частотами.

В вакууме электромагнитные волны с различными частотами распространяются с одинаковой скоростью $c = 3 \cdot 10^8$ м/с. В веществе скорость волны зависит от ее частоты. Волна с малой частотой (красный цвет) распространяется быстрее, чем волна с большей частотой (фиолетовый цвет).

Известно, что скорость электромагнитной волны в среде меньше, чем в вакууме: $v = c/n$. Следовательно, показатель преломления n зависит от частоты световой волны.

Дисперсия света – это зависимость скорости света в веществе от частоты световой волны и связанные с этим явления.

Задачи к разделу 7

7.1. Сколько времени свет идет от Солнца до Земли, от Луны до Земли, если они удалены на расстояния $L_1 = 1,5 \cdot 10^8$ км и $L_2 = 3,8 \cdot 10^5$ км соответственно?

7.2. На каком расстоянии L от Солнца находится планета Плутон, если свет до нее доходит за время $\tau = 5,5$ ч?

7.3. Оптическая плотность льда меньше, чем оптическая плотность воды. В какой из этих сред свет распространяется с большей скоростью?

7.4. Определить скорость света v в стекле, имеющем абсолютный показатель преломления $n = 1,5$.

7.5. Абсолютный показатель преломления воды для лучей красного цвета $n_k = 1,331$, а для лучей фиолетового цвета $n_\phi = 1,343$. Определить скорости v_k и v_ϕ распространения этих лучей света в воде.

7.6. Скорость распространения света в алмазе $v = 124000$ км/с. Вычислить абсолютный показатель преломления алмаза.

7.7. Скорость распространения лучей желтого света в воде $v_в = 225000$ км/с, а в стекле $v_с = 198200$ км/с. Определить величины абсолютных показателей преломления стекла $n_с$, воды $n_в$ и относительный показатель преломления $n_{с/в}$ стекла относительно воды.

7.8.* Какие частоты колебаний ν соответствуют крайнему красному ($\lambda_{\text{к}} = 0,76$ мкм) и крайнему фиолетовому ($\lambda_{\text{ф}} = 0,40$ мкм) лучам видимой части спектра?

7.9.* На воду падает луч красного цвета с длиной волны $\lambda_0 = 0,70$ мкм. Какой будет длина волны λ в воде, если абсолютный показатель преломления воды $n_{\text{в}} = 1,33$?

Отражение света. Плоское зеркало

Прямолинейное распространение света

Световой луч – это линия, вдоль которой распространяется свет.

На основании опытных данных был сформулирован закон прямолинейного распространения света:

в прозрачной однородной среде свет распространяется по прямым линиям.

Отражение и преломление света

Рассмотрим границу раздела двух прозрачных сред. Пусть на границу падает луч света (рис. 8.1). При этом свет **частично отражается** от этой поверхности, а частично переходит в другую среду, изменяя направление распространения – **преломляется**. Проведем перпендикуляр к границе раздела сред в точке падения луча и определим соответствующие углы.

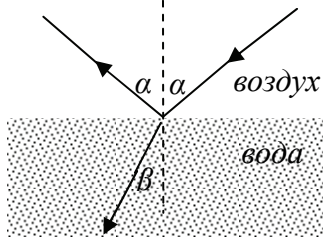


Рис. 8.1

Угол падения – угол между падающим лучом и перпендикуляром к границе раздела двух сред, проведенным через точку падения луча.

Угол отражения – угол между отраженным лучом и перпендикуляром к границе раздела двух сред, проведенным через точку падения луча.

Угол преломления – угол между преломленным лучом и перпендикуляром к границе раздела двух сред, проведенным через точку падения луча.

Законы отражения.

1. Падающий луч, отраженный луч и перпендикуляр к границе раздела сред лежат в одной плоскости.

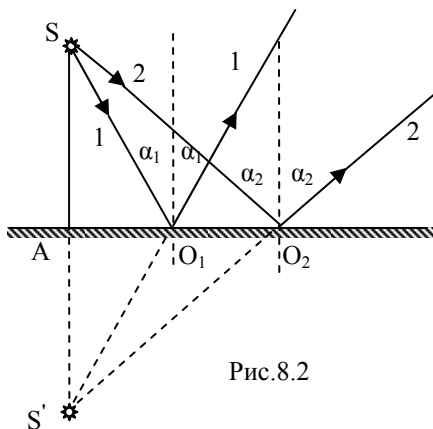
2. Угол отражения равен углу падения.

Законы распространяется на случаи, когда вторая среда не прозрачна и может быть только отражение (плоское зеркало).

Плоское зеркало

Плоским зеркалом может служить полированная плоская металлическая пластинка или плоская стеклянная пластинка, покрытая с одной стороны тонким слоем металла (алюминий).

Если на плоское зеркало падает расходящийся пучок света, то после отражения он опять будет расходящимся. Пусть над зеркалом будет точечный источник света S . Из всего светового потока, падающего на зеркало, выберем два луча 1 и 2 , которые падают на зеркало под углами α_1 и α_2 . После отражения эти лучи расходятся. Продолжения отраженных лучей пересекаются в точке S' , находящейся по другую сторону зеркала относительно источника на перпендикуляре к плоскости зеркала и на том же расстоянии от зеркала, что и источник. Это можно доказать, исходя



из равенства углов падения и отражения и, в силу этого, равенства пар треугольников AO_1S и AO_1S' , AO_2S и AO_2S' .

В наш глаз приходят отраженные лучи 1 и 2 и в точке пересечения их продолжений S' мы видим изображение источника. На самом деле до точки S' не доходят никакие лучи, поэтому изображение является мнимым.

Строгое определение таково: **мнимым** называется **изображение** точечного источника, образованное пересечением продолжений лучей, вышедших из оптической системы. Следовательно, точка S' является мнимым источником.

Чтобы построить изображение предмета в плоском зеркале, необходимо из каждой точки предмета опустить на зеркало перпендикуляр SA и отложить по другую сторону зеркала на этом перпендикуляре отрезок AS' , равный SA . Точка S' и будет мнимым изображением точки S .

Задачи к разделу 8

8.1. На рис. 8.13 показаны три плоских зеркала, на которые падает горизонтальный луч света. Постройте направления лучей, отраженных от зеркал для всех этих случаев.

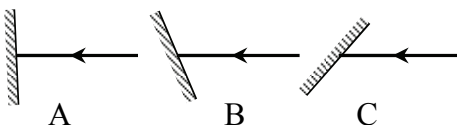


Рис. 8.13

8.2. Солнечные лучи падают под углом $\alpha = 47^\circ$ к горизонту. Под каким углом β к горизонту нужно расположить плоское зеркало, чтобы направить лучи горизонтально? Сколько решений имеет эта задача?

8.3. Солнечные лучи падают под углом $\alpha = 35^\circ$ к горизонту. Под каким углом β к горизонту нужно расположить плоское зеркало, чтобы направить лучи вертикально вниз, чтобы осветить дно колодца?

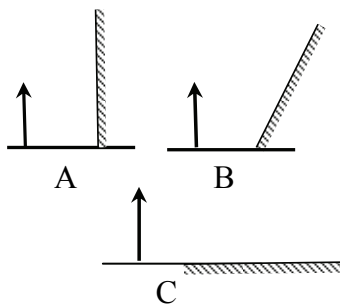


Рис. 8.23

8.4. Построить изображение предмета (стрелки) в плоском зеркале (рис. 8.23), если: А) зеркало параллельно предмету; В) зеркало наклонено по отношению к предмету; С) зеркало горизонтально.

8.5. Человек стоит на расстоянии $l = 5$ м от вертикально расположенного плоского зеркала. На каком расстоянии s от себя он видит свое изображение?

Как изменится это расстояние, если зеркало отодвинуть от человека на $\Delta l = 2$ м?

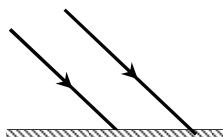


Рис. 8.33

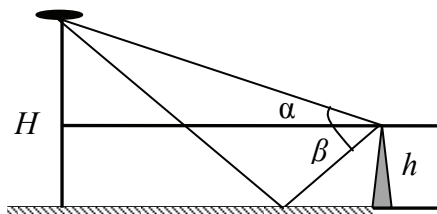


Рис. 8.43

8.6. На плоское зеркало падают два параллельных луча (рис. 8.33). Построить их ход после отражения. Будут ли они параллельны?

8.7.* На какой высоте H находится «летающая тарелка» (рис. 8.43), если с башни маяка высотой h она видна под углом α над горизонтом, а ее изображение в воде – под углом β под горизонтом?

№	$\alpha, ^\circ$	$\beta, ^\circ$	$h, \text{м}$
1	25,4	27,7	50
2	19,3	21,4	72
3	15,6	17,1	34
4	47,7	51,2	28
5	34,8	38,2	62

Решить задачу в общем виде. Расчет высоты произвести по данным таблицы.

9. Преломление света. Полное внутреннее отражение

Законы преломления.

1. *Падающий луч, преломленный луч и перпендикуляр к границе раздела сред, проведенный через точку падения луча, лежат в одной плоскости.*

2. *Отношение синуса угла падения к синусу угла преломления обратно пропорционально отношению абсолютных показателей преломления данных сред:*

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{n_{\beta}}{n_{\alpha}}.$$

Абсолютный показатель преломления n показывает, во сколько раз скорость света в данной среде меньше, чем в вакууме:

$$n = \frac{c}{v}.$$

Иногда абсолютный показатель преломления называют оптической плотностью среды.

Полное внутреннее отражение

При переходе светового луча из оптически более плотной среды (вода) в оптически менее плотную среду (воздух) угол преломления больше угла падения (рис.9.1). Если увеличивать угол падения, то угол преломления β будет увеличиваться еще быстрее, яркость преломленного луча будет уменьшаться, а яркость отраженного – возрастать.

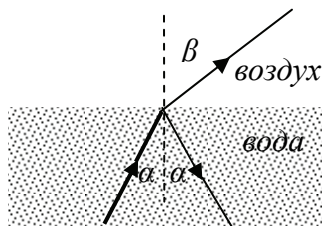


Рис. 9.1

Если угол преломления становится равным 90° , яркость отраженного луча будет равна яркости падающего, а преломленный луч исчезнет вовсе. То же самое сохранилось при увеличении угла падения.

Полное внутреннее отражение – это явление, когда при переходе света из оптически более плотной среды в оптически менее плотную среду под углом падения α , большим некоторого α_0 , свет в оптически менее плотную среду не переходит и полностью отражается от границы раздела, как от зеркала.

Угол падения α_0 называется **предельным углом полного внутреннего отражения**. Если угол преломления $\beta = 90^\circ$, а $\sin \beta = 1$, то согласно законам преломления

$$\sin \alpha_0 = \frac{n_\beta}{n_\alpha}.$$

Задачи к разделу 9

9.1. Световой луч переходит из воздуха в подсолнечное масло. Угол падения $\alpha = 35^\circ$, угол преломления $\beta = 25^\circ$. Определить показатель преломления масла.

9.2. Солнечный свет падает на поверхность воды, налитой в сосуд. Абсолютный показатель преломления воды $n_v = 1,33$.

Определить:

- 1) угол преломления β , если угол падения света $\alpha = 25^\circ$;
- 2) угол падения α , если угол преломления $\beta = 42^\circ$;
- 3) углы падения и преломления, если угол отражения $\gamma = 30^\circ$;
- 4) угол падения на горизонтальное дно сосуда, если угол падения на поверхность воды $\alpha = 45^\circ$.

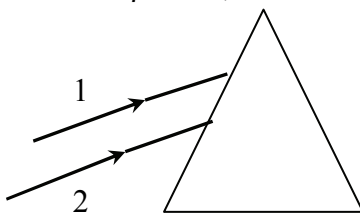


Рис.9.1з

9.3. На стеклянную призму (рис. 9.1з) падают два параллельных луча. Построить их ход после преломления. Будут ли они параллельны?

9.4. Световой луч переходит из воздуха в воду. Абсолютный показатель преломления воды $n_B = 1,33$. При каком угле падения:

- а) луч не преломляется;
- б) отраженный луч перпендикулярен к падающему лучу;
- в) отраженный луч перпендикулярен к преломленному лучу?

9.5. За ширмами А и Б (рис. 9.2з) находятся плоское зеркало и стеклянная призма, на которые падают параллельные лучи. По указанному ходу лучей определите, где находится зеркало и где призма и как они расположены.

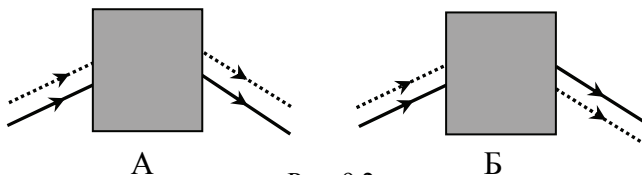


Рис. 9.2з

9.6. Угол падения луча на поверхность воды от подводного источника света равен α . Определить угол преломления луча β при выходе его в воздух, если:

а) $\alpha = 25^\circ$; б) $\alpha = 35^\circ$; в) $\alpha = 45^\circ$; г) $\alpha = 55^\circ$; д) $\alpha = 65^\circ$. Абсолютный показатель преломления воды $n_B = 1,33$. Начиная с какого значения угла падения α_0 луч света из воды не выйдет?

9.7. Угол падения светового луча под водой на толстую стеклянную пластину $\alpha = 35^\circ$. Определить угол преломления β этого луча:

- а) при переходе его в стекло;
- б) при переходе его в стекло, если бы луч падал на пластину не из воды, а в воздухе под тем же углом.

Абсолютный показатель преломления воды $n_b = 1,33$, стекла $n_c = 1,5$.

9.8. В дно озера глубиной $H = 2$ м вбит шест, который возвышается над поверхностью воды на $h = 1$ м. Высота Солнца над горизонтом $\alpha = 30^\circ$. Определить длину тени шеста l_1 на поверхности воды и длину тени l_2 на дне озера.

9.9. Мальчик видит монету на дне ручья под углом $\alpha = 45^\circ$ к поверхности воды и пытается попасть в нее палкой. На каком расстоянии от монеты войдет в дно палка, если глубина ручья $h = 0,4$ м?

9.10. Световой луч падает на поверхность горизонтального стола, формируя яркое пятно. Угол падения $\alpha = 60^\circ$. На пути луча горизонтально устанавливается стеклянная пластина толщиной $h = 6$ см. На какое расстояние s сместится при этом пятно на столе?

10. Линзы. Построение изображений. Формула линзы

Линза

Линза – это прозрачное тело, ограниченное двумя сферическими поверхностями (рис. 10.1).

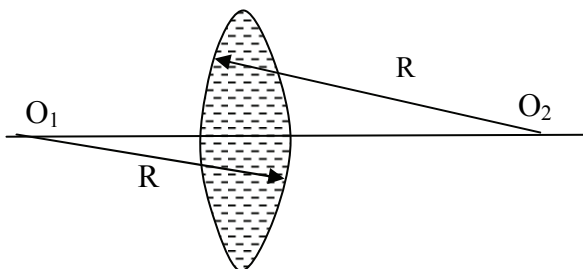


Рис. 10.1

Прямая O_1O_2 , на которой лежат центры обеих сферических поверхностей, называется **главной оптической осью линзы**.

Одна из поверхностей линзы может быть плоской.

Тонкие линзы – это линзы, толщина которых много меньше радиусов поверхностей, образующих линзу.

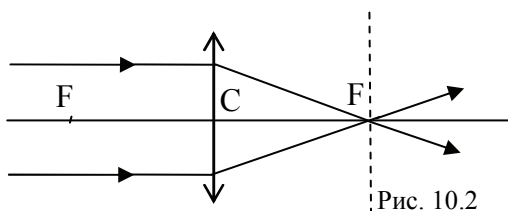
Оптический центр линзы – это точка C , проходя через которую, любой луч не преломляется.

Оптический центр находится на главной оптической оси в центре линзы.

Побочная оптическая ось – любая прямая, проходящая через оптический центр линзы.

Главная плоскость линзы – плоскость, проходящая через оптический центр линзы перпендикулярно к главной оптической оси.

Если линза посередине толще, чем по краям, то такую линзу, независимо от формы будем называть выпуклой, если она находится в среде с меньшей оптической плотностью. И вогнутой, если она посередине тоньше, чем по краям.



Если на выпуклую линзу направить узкий пучок света вдоль главной оптической оси, то пройдя через линзу, он преломится так, что соберется в точке F , которая называется **главным фокусом линзы** (рис. 10.2). Выпуклые линзы называют иначе **собирающими**.

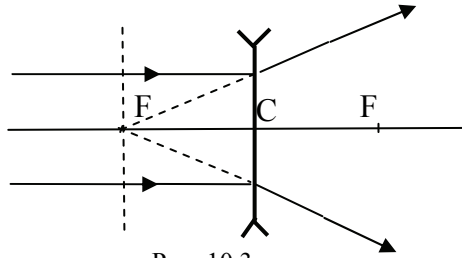


Рис. 10.3

Если на вогнутую линзу направить узкий пучок света вдоль главной оптической оси, то пройдя через линзу, он будет расходиться так, что продолжения лучей будут пересекаться в одной точке F , которая называется **мнимым главным фокусом** линзы (рис. 10.3).

Вогнутые линзы называются **рассеивающими**.

Главный фокус линзы – это точка, лежащая на главной оптической оси, в которой пересекается пучок лучей (или продолжений лучей) света, вышедших из тонкой линзы, если эти лучи падают на линзу параллельно главной оптической оси.

Фокальная плоскость – это плоскость, которая проходит через фокус линзы перпендикулярно к главной оптической оси.

Главный фокус собирающей линзы называют также задним фокусом. У рассеивающей линзы задний фокус находится впереди.

Фокусное расстояние – это расстояние от оптического центра до фокуса.

У собирающих линз фокусное расстояние положительно, у рассеивающих – отрицательно.

Оптическая сила линзы Φ – величина, обратная фокусному расстоянию F :

$$\Phi = 1/F.$$

Измеряется оптическая сила в диоптриях (дптр).

1 диоптрия – это оптическая сила линзы с фокусным расстоянием 1 м:

$$1 \text{ дптр} = 1 \text{ м}^{-1}.$$

Построение изображений. Ход основных лучей

Для построения изображений предметов необходимо знать ход основных лучей (рис. 10.4А – собирающая линза, рис. 10.4Б – рассеивающая линза).

1. Луч, падающий параллельно главной оптической оси, преломляясь, проходит сам или его продолжение через задний фокус линзы.

2. Луч, идущий через оптический центр линзы, проходит, не изменяя своего направления.

3. Луч, проходящий через передний фокус линзы, преломляясь, проходит параллельно главной оптической оси.

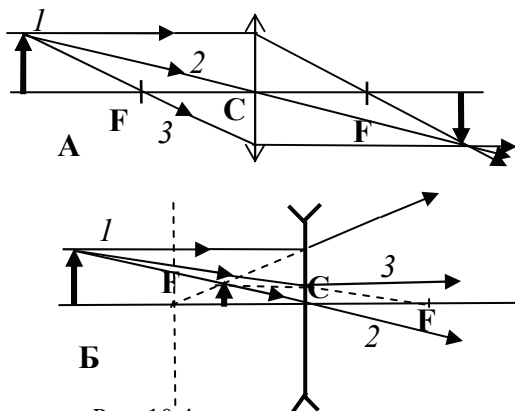


Рис. 10.4

Формула линзы

Любой видимый предмет виден только потому, что он испускает или отражает расходящийся пучок света. Такой предмет называется *действительным*. Если предмет не ис-

пускает и не отражает свет – он невидим. Если предмет испускает или отражает сходящийся пучок света, он также невидим. Такой предмет называется *мнимым*.

С помощью оптических систем можно получить изображения предметов. Если изображение получается в точках пересечения самих лучей, вышедших из оптической системы, оно будет *действительным*. Если изображение получается в точках пересечения продолжений лучей, вышедших из оптической системы, то оно будет *мнимым*.

Расположим перед линзой светящийся предмет в виде отрезка длиной h перпендикулярно к ее главной оптической оси (рис.10.5). Обозначим расстояние от предмета до линзы как d ($d > 0$ для действительных предметов).

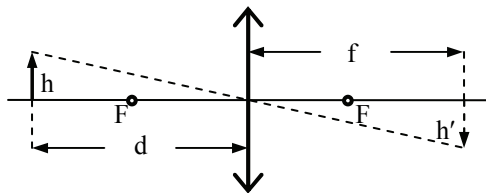


Рис. 10.5

Обозначим расстояние от линзы до изображения h' как f ($f > 0$ для действительных изображений).

Будем полагать, что фокусное расстояние $F > 0$ для собирающих линз и $F < 0$ – для рассеивающих.

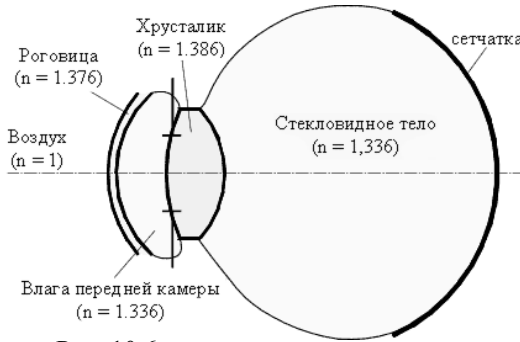
Формула линзы позволяет определить расстояние до изображения, если известны d и F . Она имеет вид:

$$\frac{1}{d} + \frac{1}{f} = \frac{1}{F}.$$

Если при расчетах получим $f > 0$, то изображение будет действительным, и будет находиться за линзой по ходу лучей. Если при расчетах получим $f < 0$, то изображение будет мнимым, и будет находиться перед линзой, формируясь расходящимся пучком лучей.

Глаз как оптическая система

Глаз (рис. 10.6) представляет собой шаровидное тело (*глазное яблоко*). В передней части глаза оболочка переходит в выпуклую и прозрачную *роговицу*. Диаметр всего глазного яблока около 22-24 мм, масса 7-8 г.



Тонкая сосудистая пластинка (*радужная оболочка*) является диафрагмой, ограничивающей проходящий поток света. Через отверстие в радужной оболочке (*зрачок*) свет проникает в глаз. В зависимости от величины падающего потока света диаметр зрачка может изменяться от 1 до 8 мм.

Хрусталик представляет собой двояковыпуклую эластичную линзу, которая крепится на мышцах ресничного тела. Ресничное тело обеспечивает изменение формы хрусталика. Хрусталик разделяет внутреннюю поверхность глаза на две камеры: переднюю камеру, заполненную водянистой влагой, и заднюю камеру, заполненную стекловидным телом.

Внутренняя поверхность задней камеры покрыта **сетчаткой**, представляющей собой светочувствительный слой. Получаемое светочувствительными элементами сетчатки раздражение передается волокнам **зрительного нерва** и по ним достигает зрительных центров мозга.

Поток излучения, отраженный от наблюдаемого предмета, проходит через оптическую систему глаза и фокусируется на внутренней поверхности глаза – сетчатой оболочке, образуя на ней обратное и уменьшенное изображение (мозг «переворачивает» обратное изображение, и оно воспринимается как прямое).

Аккомодация – это способность глаза приспособливаться к четкому различению предметов, расположенных на разных расстояниях от глаза. При аккомодации глаза на бесконечность задний фокус совпадает с сетчаткой. При наибольшем напряжении на сетчатке получается изображение предмета, находящегося на расстоянии около 9 см.

Расстояние наилучшего зрения – это расстояние, на котором нормальный глаз испытывает наименьшее напряжение при рассматривании деталей предмета.

В среднем расстояние наилучшего зрения составляет около 25-30 см

Задачи к разделу 10

10.1. Построить изображение предмета, находящегося на расстоянии d от собирающей линзы с фокусным расстоянием $F = 0,03$ м для случаев (рис. 10.13):

а) $d = 2,5 \cdot F$; б) $d = 2 \cdot F$; в) $d = 1,5 \cdot F$; г) $d = 0,5 \cdot F$.

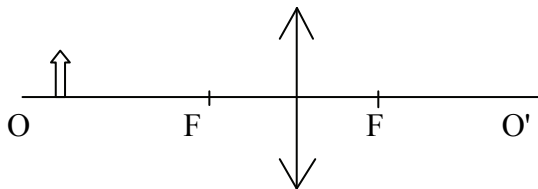


Рис. 10.13

Используя формулу линзы, рассчитать расстояние от линзы до изображения f и сравнить с результатом, полученным при построении.

10.2. Построить изображение предмета, находящегося на расстоянии d от рассеивающей линзы (рис. 10.2з) с фокусным расстоянием $F = 0,025$ м для случаев:

а) $d = 2,2 \cdot F$; б) $d = 2 \cdot F$; в) $d = F$; г) $d = 0,5 \cdot F$.

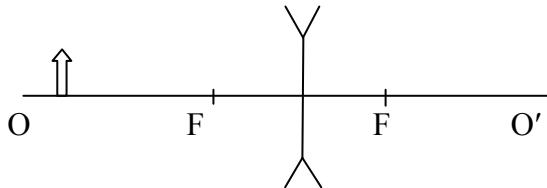


Рис. 10.2з

Используя формулу линзы, рассчитать расстояние от линзы до изображения f и сравнить с результатом, полученным при построении.

10.3. На линзу падает световой луч (рис. 10.3з). Найти построением ход преломленного луча для представленных четырех случаев.

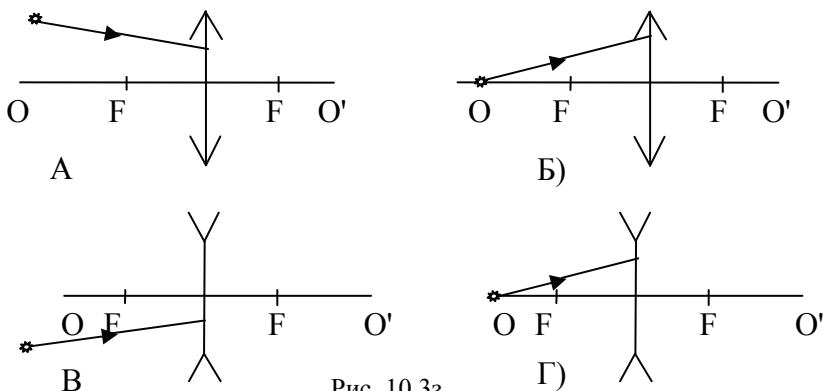


Рис. 10.3з

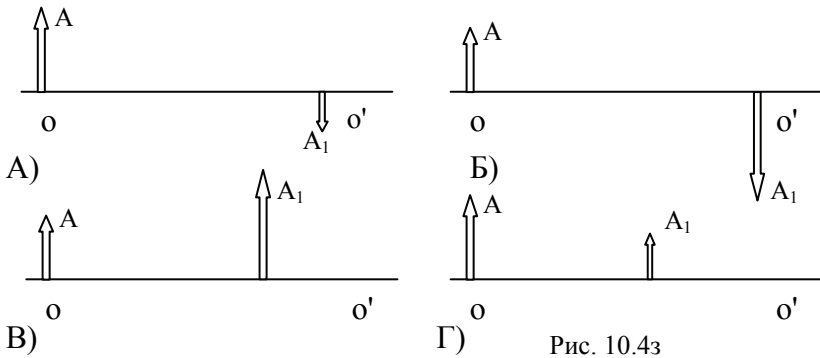


Рис. 10.43

10.4. На рис. 10.43 показаны оптическая ось oo' , предмет A и его изображение A_1 . Построением определить, где находятся оптический центр линзы C , фокусы F и F' . Какие линзы были использованы для получения этих изображений? Рассмотреть все четыре случая.

10.5. Определить фокусные расстояния F_1 и F_2 очковых линз с оптической силой $\Phi_1 = +4,5$ дптр и $\Phi_2 = -3,5$ дптр.

10.6. Определить оптическую силу Φ и фокусное расстояние F собирающей линзы, если изображение предмета, помещенного на расстоянии $d = 15$ см от линзы, получается на расстоянии $f = 30$ см от нее.

10.7. Предмет находится на расстоянии d от линзы с фокусным расстоянием F . Определить, на каком расстоянии f от линзы находится изображение предмета для значений d и F , приведенных в таблице.

№	d , см	F , см
1	20,0	10,0
2	12,0	20,0
3	35,0	7,0
4	15,0	-4,5
5	8,0	-10,0

10.8. Расстояние между свечой и экраном $L = 1$ м. На каком расстоянии d от свечи нужно поместить линзу с фокусным расстоянием $F = 9$ см, чтобы на экране получилось четкое изображение свечи?

10.9. Предмет находится на расстоянии $d = 12$ см от рассеивающей линзы с фокусным расстоянием $F = -10$ см. На каком расстоянии f от линзы находится изображение предмета?

11. Атом и атомное ядро

Радиоактивность

Открытие радиоактивности было вроде случайным. Изучая свойства солей урана, случайно положили кристаллы соли, завернутые в бумагу, на коробку, в которой лежали фотопластины. Спустя некоторое время обнаружили, что пластины оказались засвеченными, т.е. соли урана испускают какое-то излучение, проходящее через бумагу и картон (1896 год).

Ученые заинтересовались, нет ли других элементов, обладающих такими же свойствами. Тут же был обнаружен другой излучающий элемент – торий. Затем супруги Мария и Пьер Кюри открыли еще два элемента с таким же свойством – полоний и радий. Поскольку радий (лучистый) обладал очень высокой активностью самопроизвольного излучения, это явление назвали радиоактивностью. Впоследствии было установлено, что все химические элементы с порядковым номером больше 83 обладают таким свойством. Это явление назвали радиоактивностью.

Радиоактивность – явление самопроизвольного испускания некоторыми элементами излучения, способного проникать через слои вещества, непрозрачные для света.

Само излучение называют **радиоактивным**.

Опыты Резерфорда

Пропустив излучение радия через сильное магнитное поле, Резерфорд обнаружил (1900 год), что оно разделяется на три компонента (рис. 11.1). Их назвали α -, β - и γ -излучением. При дальнейшем изучении оказалось, что:

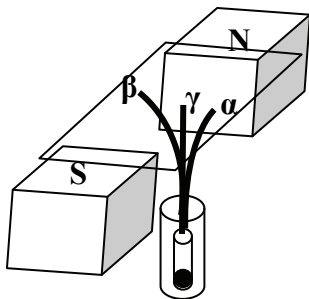


Рис. 11.1

α -излучение – это поток положительно заряженных частиц – дважды ионизированных ядер атома гелия; задерживается полностью это излучение слоем бумаги толщиной 0,1 мм;

β -излучение – это поток отрицательно заряженных частиц – электронов, движущихся с очень высокой скоростью; задерживается β -излучение радия пластинкой алюминия толщиной 3 мм;

γ -излучение – это электромагнитные волны с очень высокими частотами и длиной волны $\lambda < 10^{-12}$ м; задержать γ -излучение радия можно пластинкой свинца толщиной 1 см.

В целом было отмечено, что чем плотнее вещество преграды, тем более тонкая пластина полностью задерживает излучение.

Атом – мельчайшая частица вещества, которая еще несет химические свойства вещества. У простых веществ (в таблице Менделеева – это химические элементы) свои отличающиеся атомы. Когда образуются сложные вещества из простых (химические соединения), их атомы образуют молекулу благодаря различным связям, но при этом атомы простых веществ не изменяются.

Для того чтобы изучить строение атома, Резерфорд (1911 год) облучал очень тонкую фольгу α -частицами. Оказалось, что на фотопластинке образовывалось пятно большего диаметра, чем в случае, когда фольгу убрали. Это означало,

что α -частицы беспрепятственно проходят через фольгу, иногда отклоняясь на небольшие углы. Каково было его удивление, когда он обнаружил, что малая часть α -частиц все-таки отклоняется на углы больше 90° . Это можно представить так, как если бы вы бросали стальные шарики (2000 штук) в некоторую стенку. Большинство шариков (1600 штук) проходят свободно через стенку. Некоторое количество отклонилось от прямолинейного полета (380 штук) и тоже прошли через стенку. Несколько шариков (20 штук) не смогли пролететь сквозь стенку, а отскочили под разными углами, причем два шарика полетели в вашу сторону.

Основной вывод Резерфорда – атом состоит из положительно заряженного ядра и электронной оболочки. Размеры ядра много меньше размеров атома. Такое представление строения напоминает солнечную систему, поэтому модель атома Резерфорда иногда называют планетарной. Резерфорд оценил и примерные размеры атомов и ядер. Так, размер атома 0,1 нм, а размер ядра 0,01 – 0,001 пм (если строить модель и взять ядро размером 1 мм, то атом может иметь диаметр 60 м). У различных химических элементов размеры ядер и атомов различны.

Линейчатые оптические спектры

Рассмотрим, что собой представляет электронная оболочка в атоме. Почему электроны не падают на ядро? Планетарная модель предписывает им двигаться вокруг ядра, как Земле вокруг Солнца, чтобы не упасть на ядро. Но тогда вращающийся электрон должен излучать согласно Максвеллу электромагнитные волны, а значит, атом должен терять энергию и в конце концов электрон должен упасть на ядро. Классическая физика отводит атому жизни всего 10 нс, однако на самом деле атомы очень устойчивы. Стало понятно, что клас-

сическая механика, созданная Ньютоном, и теория Максвелла не могут объяснить устойчивость атома.

Это удалось в первой трети 19-го века. Важную роль в экспериментальном подтверждении новой теории сыграло точное знание спектров излучения некоторых элементов.

Еще в 1885 году начали изучать спектры излучения веществ, как это делал Ньютон, разлагая белый цвет на составляющие с помощью трехгранной призмы. Рассмотрим схему прибора, который называется спектрографом (рис. 11.2).

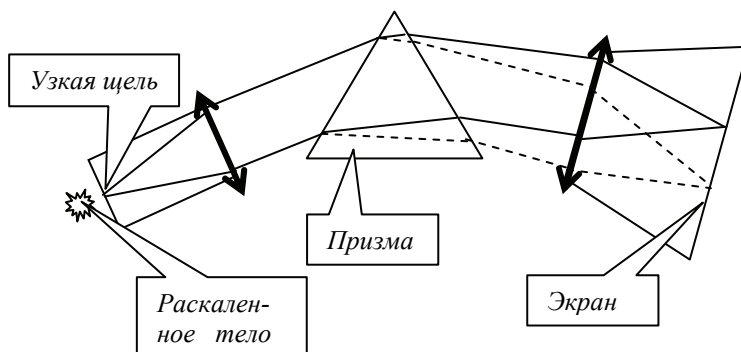


Рис. 11.2

Из узкой щели, которая находится в фокальной плоскости первой линзы, выходит пучок света от сильно нагретого тела (электрическая дуга). После прохождения линзы он превращается в параллельный пучок света, который падает на призму. Пройдя через призму, пучок, благодаря явлению дисперсии, разлагается на множество параллельных пучков, соответствующих различным частотам световых волн. На матовом экране эти пучки фокусируются второй линзой в узкие полоски. Все эти изображения вместе и образуют спектр.

Если используется солнечный луч, дуговой фонарь или любое твердое или жидкое сильно нагретое тело, то в излучаемом свете представлены все частоты, следовательно, на экране

спектрографа будем наблюдать сплошную разноцветную полосу от красной до фиолетовой – *непрерывный спектр*.

Если взять простое вещество в газообразном состоянии и сильно нагреть, то в спектре будут присутствовать только определенные частоты, и на экране спектрографа будем наблюдать яркие линии разных цветов – *линейчатый спектр*.

Каждому химическому элементу, каждому веществу присущ свой линейчатый спектр, что позволяет проводить спектральный анализ и определять состав неизвестных веществ.

Очень интересным оказался спектр излучения водорода. Он представляет собой несколько серий частот, связанных простыми соотношениями:

$$\nu = R \left(\frac{1}{k^2} - \frac{1}{n^2} \right), \text{ где } k = 1, 2, 3, \dots, n = 2, 3, 4, \dots, \text{ причем } n > k.$$

Эта формула была получена Ридбергом в 1891 году на основе опытных данных ряда ученых ($R = 3,29 \cdot 10^{15}$ Гц – постоянная Ридберга).

Немецкий физик Макс Планк предположил, что тела, излучающие электромагнитную энергию, излучают ее отдельными порциями – квантами, имеющими энергию

$$\varepsilon = h \nu,$$

где $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$ Дж·с – постоянная Планка.

В 1913 году датский физик Нильс Бор предложил основы новой теории, позволяющей объяснить накопленные экспериментальные данные по спектрам излучения и по строению атома. Он предложил два постулата:

Первый постулат Бора: *атом может находиться в особых стационарных состояниях, каждому из которых соответствует определенная энергия E_n . В стационарных состояниях атом не излучает.*

Второй постулат Бора: *излучение происходит при переходе атома из стационарного состояния с большей энергией E_n*

в стационарное состояние с меньшей энергией E_k в виде одного кванта электромагнитной волны.

Частота кванта в этом случае определяется правилом частот Бора:

$$\nu = \frac{E_n - E_k}{h}, \text{ где } h \text{ – постоянная Планка.}$$

Следует отметить, что к 1905 году было уже обосновано понятие квантования энергии волны. Эйнштейн представлял электромагнитную волну с частотой ν , как состоящую из множества отдельных – квантов излучения (фотонов) с энергией $\varepsilon = h\nu$.

Поглощение атомом света – процесс, обратный излучению. Атом может поглощать кванты света той же частоты, что и излучает, переходя при этом в стационарное состояние с большей энергией.

Итак, прекрасно работающие законы механики, теория Максвелла оказались бессильны, чтобы объяснить строение атома и спектры излучения. Принятые на вооружение правила квантования и постулаты Бора означали создание физики микромира, которая стала называться квантовой физикой.

Атомное ядро

Еще Резерфорд при создании планетарной модели атома предположил, что в центре атома водорода находится ядро – частица с положительным зарядом, равным по модулю заряду электрона. Эту частицу назвали протон. Что касается других элементов, то возникло предположение, что их ядра содержат такое же число протонов Z , сколько электронов в атоме. Следовательно, заряд ядра $q = Ze$, поэтому число Z называют зарядовым числом. Оно равно порядковому номеру элемента в таблице Менделеева, поскольку химические свойства элементов определяются числом электронов в атоме.

Учитывая, что одинаково заряженные частицы должны отталкиваться, объединение протонов в ядре обеспечивается другими силами, нежели силы электрического взаимодействия. Их назвали ядерными. Ядерные силы существенно больше электрических, но проявляются они только на малых расстояниях (порядка размеров ядер).

С целью изучения строения ядер Резерфордом и его учениками проводилась бомбардировка различных элементов α -частицами. Впервые в результате бомбардировки была определена масса протона. Она оказалась в 1836 раз больше массы электрона. Эту массу условно приняли за атомную единицу массы – 1 а.е.м. (впоследствии за 1 а.е.м. приняли $1/12$ массы ядра углерода). Таким образом, масса протона равна $m_p = 1,0073$ а.е.м.

Вместе с тем, если считать, что ядра элементов состоят только из протонов, то массы ядер должны были быть равными Zm_p , однако оказалось, что массы ядер элементов были существенно больше. В 1930 году Чэдвик, бомбардируя бериллий α -частицами, обнаружил новое излучение, которое оказалось электрически нейтрально и имело необычайно высокую проникающую способность. Чэдвик доказал, что это излучение – нейтральные частицы с массой, близкой к массе протона. Их назвали нейтронами ($m_n = 1,0087$ а.е.м.).

Сразу же была предложена протонно-нейтронная модель строения ядра, которая впоследствии была подтверждена другими исследованиями.

Если обозначить число нейтронов в ядре N , то масса ядра:

$$M = N m_n + Z m_p.$$

Поскольку массы протонов и нейтронов примерно равны 1 а.е.м. можно считать массу ядра равной $M \approx (N + Z)$ а.е.м.

Суммарное число протонов и нейтронов называют массовым числом ядра и обозначают A :

$$A = N + Z.$$

Учитывая, что ядерные силы, удерживающие протоны и нейтроны в ядре, безразличны к наличию заряда, эти частицы назвали **нуклонами**, а ядра элементов – **нуклидами**.

Нуклиды обозначают символом ${}^A_Z X$, где вместо X ставится символ химического элемента. Например, ${}^4_2\text{He}$, ${}^{108}_{47}\text{Ag}$, ${}^{238}_{92}\text{U}$.

Нуклоны обозначают так: протон ${}^1_1\text{p}$ и нейтрон ${}^1_0\text{n}$. Электрон обозначают ${}^0_{-1}\text{e}$.

Масса электрона равна $m_e = 0,00055$ а.е.м. и гораздо меньше массы нуклона..

В ядрах одного и того же химического элемента число нейтронов может быть различным, но число протонов всегда одинаково. Например, в ядрах углерода число протонов всегда равно 6, а число нейтронов может быть равно 5,6,7,8,9,10. Нуклиды углерода бывают вида: ${}^{11}_6\text{C}$, ${}^{12}_6\text{C}$, ... ${}^{16}_6\text{C}$.

Химические свойства атомов определяются числом электронов в атоме или числом протонов и не зависят от числа нейтронов в ядре.

*Элементы, ядра которых имеют одинаковое число протонов, но разное число нейтронов, называют **изотопами**.*

Ядерные силы

В атомной и ядерной физике приходится иметь дело с очень малыми расстояниями, массами и энергиями. Естественно, что использовать систему измерений СИ неудобно. Выше уже сказано об измерении массы ядер и частиц в атомных единицах массы – а.е.м.:

$$1 \text{ а.е.м.} = 1,6605 \cdot 10^{-27} \text{ кг.}$$

Длина в ядерной физике измеряется в *фермиметрах* (фм), хотя физики называют ее *ферми*:

$$1 \text{ фм} = 10^{-15} \text{ м.}$$

В качестве единицы энергии используют величину *электронвольт* (эВ) – это энергия, которую приобретет покоя-

щийся электрон, если попадет в электрическое поле и пролетит область с напряжением 1 вольт:

$$1\text{эВ} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж.}$$

Используются также производные единицы – кило- и мегаэлектронвольты (кэВ и МэВ соответственно).

Между нуклонами (протонами и нейтронами) в ядре действуют силы притяжения, которые называют ядерными силами. Ядерные силы действуют на коротких расстояниях, порядка 1 фм. Они в 100 раз больше кулоновских сил отталкивания между протонами на тех же расстояниях. Но, в отличие от кулоновских сил, ядерные силы быстро уменьшаются с увеличением расстояния между нуклонами.

Связь нуклонов в ядре настолько велика, что требуется очень большая энергия, чтобы разорвать эту связь.

Энергия связи ядра – это энергия, необходимая для полного расщепления ядра на отдельные нуклоны.

Наоборот, при образовании ядра из нуклонов выделяется энергия, равная энергии связи.

В 1905 году Эйнштейн показал, что между массой m системы частиц и ее энергией покоя E_0 существует связь:

$$E_0 = mc^2,$$

где $c = 3 \cdot 10^8$ м/с – скорость света.

Если масса системы изменится на величину Δm , то и энергия покоя системы изменится на величину $\Delta E_0 = \Delta mc^2$. Можно подсчитать, что изменение массы системы на 1 а.е.м. приводит к изменению энергии системы на 931,5 МэВ.

Поскольку нуклиды состоят из протонов и нуклонов, проще всего предположить, что масса ядра равна сумме масс составляющих частиц. Однако эксперимент показал, что масса любого ядра меньше суммы масс составляющих частиц. Дефект массы для данного ядра равен:

$$\Delta m = (Nm_n + Zm_p) - M_{\text{я}}.$$

Это означает, что внутренняя энергия ядра меньше совокупной внутренней энергии нуклонов, создавших это ядро, на величину ΔE_0 . Величина $\Delta E_0 = \Delta mc^2$ равняется энергии связи $E_{св}$ ядра. Чтобы понять, о каких величинах идет речь, можно привести пример: при образовании 4 граммов гелия из тяжелого водорода выделяется энергия, равная той, что выделится при сгорании двух вагонов каменного угля.

В химических и тепловых процессах может выделяться значительная энергия. Однако при пересчете на единицу массы энергия связи ядер в миллионы раз больше энергии химических и тепловых процессов. Поэтому в химических и тепловых процессах пренебрегают изменением массы.

Методы регистрации ядерных излучений

1. Газоразрядный счетчик Гейгера (рис. 11.3) состоит из стеклянной трубки, покрытой изнутри металлическим слоем – катода и тонкой металлической нити по центру – анода. Трубка заполнена газом (аргоном). Действие счетчика основано на ударной ионизации. Заряженная частица, пролетая в газе, отрывает у молекулы аргона электроны, образуя в пространстве новые заряженные частицы. Эти частицы, раз-

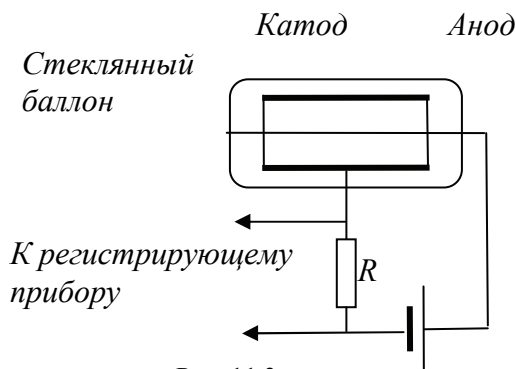


Рис. 11.3

гоняясь в электрическом поле, бомбардируют другие молекулы, ионизируют их и т.д. Возникает лавина ионов, через счетчик проходит ток, на резисторе R появляется импульс напряжения, который регистрируется прибором (в наушнике раздастся щелчок). Из-за повышения напряжения на сопротивлении, уменьшается напряжение на самом счетчике и разряд прекращается. Точно так же регистрируется следующая частица.

Счетчик Гейгера регистрирует заряженные частицы. Для регистрации α -частиц необходимо тонкостенное окно. Для регистрации незаряженных частиц и электромагнитных квантов необходимо специальное покрытие стенок внутри трубки, чтобы эти частицы могли легко выбить электроны из этого покрытия.

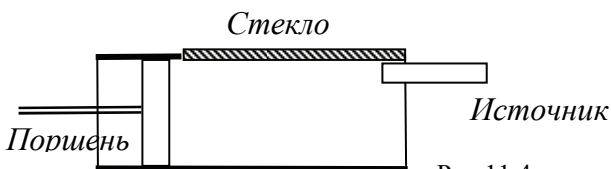


Рис.11.4

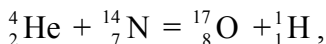
2. Камера Вильсона (рис. 11.4) представляет собой плоский сосуд со стеклянным окном. В сосуде находится водяной пар. С помощью поршня объем сосуда можно изменять. Если поршень резко выдвинуть, то пар начинает охлаждаться, становится пересыщенным и через несколько секунд внутри камеры выпадает роса в виде капелек воды. В течение этих секунд любая заряженная частица, двигающаяся близко к стеклу, ионизирует молекулы воды на своем пути. Ионизированные молекулы являются центрами конденсации паров и на стекле осаждаются микроскопические капельки воды, повторяя след частицы. Этот след называют треком и его можно сфотографировать. Через несколько секунд, не дожидаясь,

когда выпадет роса, поршень необходимо сжать до исходного состояния, пар нагревается, треки исчезают и камера готова к новой регистрации. Камеру можно помещать в электрические и магнитные поля и по характеру треков определять заряд, массу и энергию частиц.

Ядерные реакции

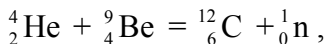
Для начала рассмотрим реакции, происходящие при радиоактивном распаде. Излучая α -частицу, ядро теряет заряд $+2e$ и превращается в химический элемент, стоящий на две клетки ближе к началу таблицы Менделеева. Излучая β -частицу (отрицательно заряженный электрон), ядро приобретает заряд $+e$ и превращается в химический элемент, стоящий на одну клетку ближе к концу таблицы. А вообще, откуда в ядре электроны? Оказывается, нейтрон ядра может превращаться в протон и выбрасывать при этом электрон. Излучая γ -кванты (кванты электромагнитных волн с очень малой длиной волны), ядро уменьшает внутреннюю энергию, не изменяя своего состава.

Рассмотрим реакции при искусственном превращении атомных ядер. Первая реакция была получена при бомбардировке α -частицами атомов азота:



где ${}^1_1\text{H}$ – ядро атома водорода или протон. Эта реакция была проведена Резерфордом и позволила получить протоны.

При бомбардировке α -частицами атомов бериллия происходит реакция:



где ${}^1_0\text{n}$ – нейтрон. Эта реакция была проведена Чедвиком и позволила получить нейтроны.

При искусственных ядерных реакциях необходимо сблизить частицу с ядром на очень малое расстояние, чтобы про-

изошел захват частицы ядерными силами. Это совсем не похоже на бомбардировку и механическое разрушение ядра.

Во всех ядерных реакциях обязательно выполняются условия сохранения зарядового и массового чисел.

При искусственных ядерных реакциях можно получить из одного химического элемента другой элемент, однако вероятность того, что все атомы вступят в контакт с налетающими частицами, крайне мала. Большинство частиц пролетает мимо ядер (вспомните бомбардировку фольги α -частицами).

При искусственных ядерных реакциях не всегда выделяется энергия. В некоторых реакциях энергия может потребляться (частицы разгоняются до очень высоких скоростей). Потребляется или выделяется энергия – зависит от совокупного дефекта масс в правой и левой частях уравнения ядерной реакции. Если в правой части дефект масс больше, то и энергия связи в образовавшихся ядрах больше, следовательно, такая реакция сопровождается выделением энергии.

Деление и синтез ядер

Важной характеристикой устойчивости ядер является удельная энергия связи.

Удельная энергия связи – энергия связи ядра данного элемента, приходящаяся на один нуклон: $E_{\text{св уд}} = E_{\text{св}} / A$.

Рассмотрим график (рис. 11.5) зависимости удельной энергии связи от числа нуклонов в ядре (от массового числа A).

Удельная энергия связи для легких ядер сначала быстро, а затем медленно растет до величины 8,7 МэВ/нуклон. Далее она мало изменяется и слабо падает у тяжелых ядер, достигая величины 7,6 МэВ/нуклон для урана.

Энергетически возможны два процесса: деление тяжелых ядер на несколько более легких с выделением энергии и слияние легких ядер с образованием ядра средней массы с еще большим выделением энергии.

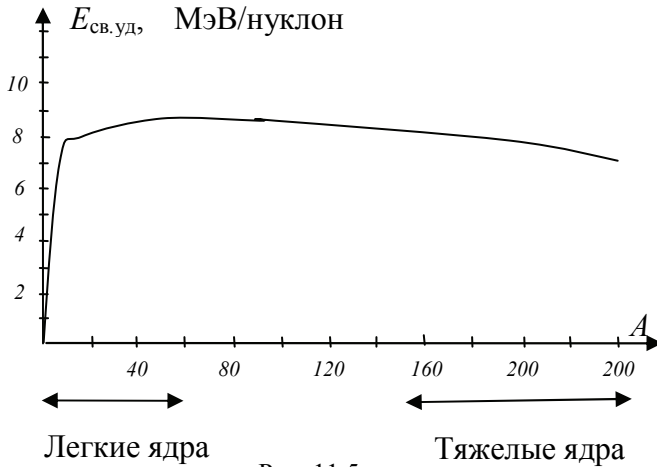


Рис. 11.5

Деление ядер на примере ${}_{92}^{235}\text{U}$ происходит при захвате тяжелым ядром урана медленного нейтрона. При этом ядро делится на два дочерних ядра примерно равной массы и 2 – 3 быстрых нейтрона. Осколки деления обладают огромной кинетической энергией, кроме того, часть энергии высвобождается в виде γ -квантов. Если уран представляет собой компактный шар диаметром 9 – 10 см, то выделившиеся нейтроны успевают поразить еще одно или два ядра и т. д. Такая реакция называется цепной реакцией, а масса вещества, в которой такая реакция возможна, называется критической массой. Для урана эта масса равна 50 кг. Такой принцип лежит в основе неуправляемой цепной реакции деления, которая используется в ядерном оружии. Использование отражателей нейтронов (бериллий) и другие изобретения, позволяют уменьшить критическую массу до нескольких сот граммов.

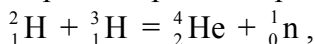
Для того чтобы управлять реакцией деления, необходимо поддерживать число нейтронов постоянным. В этом случае

равномерно выделяется энергия, которая может использоваться для полезных целей. Число нейтронов можно немного увеличить – реакция пойдет быстрее, теплоотдача увеличится и т.д.

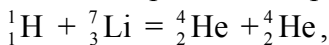
Конструктивно ядерный реактор устроен так: большой железный ящик, покрытый внутри пластинами из бериллия – отражателя нейтронов. Внутри ящика находятся стержни из урана, между которыми находятся графитовые (углерод) стержни – замедлители нейтронов. Самые главные управляющие стержни – поглотители нейтронов (содержат бор и кадмий) опускаются в реактор. Если управляющие стержни приподняты, реакция начинается, если опущены до конца – реакция полностью прекращается.

Внутри реактора высокая температура. Чтобы отвести тепло, через реактор пропускают трубы, по которым движется теплоноситель – вода или жидкий натрий. Реактор вместе с первым контуром теплоносителя помещаются в толстостенную бетонную оболочку, так как радиоактивность очень высокая. Второй контур теплоносителя (вода и пар) отбирает тепло у первого контура и подается на турбину электрогенератора.

Синтез ядер можно рассмотреть на примере таких реакций:



где дейтерий и тритий образуют гелий и нейтрон с выделением еще большей удельной энергии, чем в реакции деления:



где водород и литий образуют два ядра гелия и тоже с выделением энергии.

Чтобы осуществить такую реакцию в массе вещества (килограммы), необходимо эту смесь нагреть до температуры в несколько миллионов градусов, тогда атомы смеси начнут интенсивно двигаться, терять электроны и превратятся в ионный газ – плазму. При больших скоростях движения появля-

ется вероятность сближения ядер до расстояний, где действуют ядерные силы. Начнется реакция – она называется термоядерной, так как для ее начала требуется высокая температура. Неуправляемая термоядерная реакция осуществлена в термоядерной (водородной) бомбе. Там в качестве источника высокой температуры использован ядерный заряд.

Управляемую термоядерную реакцию в принципе можно осуществить. Вся проблема состоит в том, как разогреть плазму, как удержать высокотемпературную плазму в контейнере, не касаясь его стенок. Созданные экспериментальные установки не позволяют решить эти вопросы для использования с целью практического получения энергии.

Источники энергии Солнца и звезд

Температура Солнца и звезд очень высока – несколько миллионов градусов, что позволяет осуществлять реакции ядерного синтеза. Высвобождающаяся энергия поддерживает высокую температуру и создает условия для поддержания этой реакции. Косвенным подтверждением реакций является большое количество гелия в атмосфере солнца. Гелий – конечный продукт.

Биологическое действие ионизирующего излучения

Ионизирующим называется **излучение (радиация)**, которое при взаимодействии с веществом приводит к ионизации атомов или молекул этого вещества.

Ионизацию могут вызвать практически все заряженные частицы, а также нейтроны и γ -кванты высоких частот. Живые клетки организма, подверженные ионизации, прекращают нормальное функционирование. Если таких клеток много в каком-либо органе, то заболевает орган, так как клетки не успевают восстанавливаться. Опасность излучения в том, что оно не фиксируется органами чувств человека.

Поглощенная доза излучения равна отношению поглощенной энергии ионизирующего излучения к массе поглощающего вещества:

$$D = E/m.$$

За единицу дозы принят 1 грэй (Гр), когда на килограмм массы приходится 1 Дж поглощенной энергии излучения.

Обычно за год от естественных природных излучений человек получает дозу 2·мГр.

Допустимая годовая доза лиц, работающих с источниками, не должна превышать 50·мГр.

Смертельная доза составляет величину 3 – 10 Гр, полученную за короткий период.

В целях своевременного обнаружения источников радиации, характера ионизирующего излучения, полученной дозы существуют приборы – дозиметры. В их основе лежит счетчик Гейгера, существенно модернизированный (имеется в свободной продаже).

Задачи к разделу 11

11.1. Длина волны красного цвета $\lambda_1 = 800$ нм, желтого $\lambda_2 = 600$ нм, фиолетового $\lambda_3 = 400$ нм. Определить энергию ϵ соответствующих фотонов. Постоянную Планка принять равной $h = 6,62 \cdot 10^{-34}$ Дж·с.

11.2. Атом переходит с энергетического уровня с энергией $E_2 = -25,2$ эВ на уровень с энергией $E_1 = -26,9$ эВ. Определите частоту ν и длину волны λ испускаемого кванта. К какой области спектра относится это излучение (инфракрасное, видимое, ультрафиолетовое)?

11.3. При переходе электрона в атоме водорода с одного энергетического уровня на другой был излучен квант света с частотой $\nu = 4,57 \cdot 10^{14}$ Гц. На сколько эВ уменьшилась энергия атома ΔE ?

11.4. Формула Ридберга позволяет определить частоты излучения спектра атома водорода:

$$\nu = R \left(\frac{1}{k^2} - \frac{1}{n^2} \right),$$

где $k = 1, 2, 3, \dots$, $n = 2, 3, 4, \dots$, причем $n > k$; $R = 3,29 \cdot 10^{15}$ Гц – постоянная Ридберга.

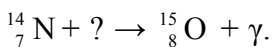
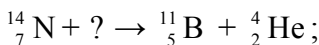
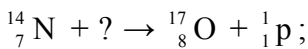
Определите частоты ν и длины волн λ испускаемых квантов для k и n , приведенных в таблице:

№	k	n
1	2	3
2	2	4
3	2	∞
4	1	2
5	3	4

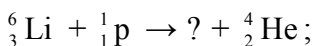
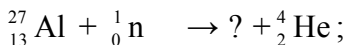
К какой области спектра относятся эти излучения (инфракрасное, видимое, ультрафиолетовое)?

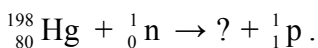
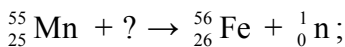
11.5. Найти значение постоянной Ридберга, если дано, что при переходе атома водорода из состояния $k = 2$ в состояние $n = 4$ излучается фотон с длиной волны $\lambda = 486,13$ нм.

11.6. Какими частицами бомбардировались ядра азота в этих реакциях?



11.7. Допишите недостающие обозначения в следующих ядерных реакциях:





11.8. При облучении изотопа меди ${}_{29}^{63}\text{Cu}$ протонами реакция происходит по следующим вариантам:

- с выделением одного нейтрона;
- с выделением двух нейтронов;
- с выделением протона и нейтрона.

Ядра каких элементов образуются в каждом случае?

11.9. Ядро урана ${}_{92}^{235}\text{U}$, поглотив один нейтрон, разделилось на два осколка и четыре нейтрона. Один из осколков оказался ядром изотопа цезия ${}_{55}^{137}\text{Cs}$. Ядром какого изотопа является второй осколок?

11.10. Критическая масса шарообразного образца изотопа урана ${}_{92}^{235}\text{U}$ равна $M = 50$ кг. Плотность урана $\rho = 18,95$ г/см³. Определить диаметр уранового шара, способного взорваться.

11.11. Принимая массу протона $m_p = 1,0073$ а.е.м., массу нейтрона $m_n = 1,0087$ а.е.м., определить дефект массы Δm , энергию связи $E_{\text{св}}$, удельную энергию связи $E_{\text{св.уд}}$ следующих изотопов (выразить в а.е.м., МэВ и МэВ/нуклон):

№	Изотоп	Масса, а.е.м.
1	${}^4_2\text{He}$	4,00260
2	${}^{12}_6\text{C}$	12,00000
3	${}^{14}_7\text{N}$	14,00307
4	${}^{27}_{13}\text{Al}$	26,98153
5	${}^{235}_{92}\text{U}$	235,04299

Ответы

1.1. 0,24 с; 4,1 Гц. **1.2.** Комар; на 24000 взмахов. **1.3.** 58 Н; 30 Н; 0.

1.4. $v_m \sqrt{m/k} = 2,8$ см. **1.6.** $a\sqrt{k/m} = 4,2$ м/с.

1.7. $A\sqrt{0,9k/m} = 4,02$ м/с. **1.8.** Второй в 2 раза дальше.

1.9. 1) 49 мДж, 0, 49 мДж, 0,60 м/с; 2) 49 мДж, 49 мДж, 0 мДж, 0;
3) 49 мДж, 27 мДж, 22 мДж, 0,40 м/с; 4) 49 мДж, 12 мДж, 37 мДж,
0,40 м/с; 5) 75 мДж, 49 мДж, 26 мДж, 0,33 м/с. **1.10.** 1) 0,782 с,
1,28 Гц; 2) 0,823 с, 1,22 Гц; 3) 0,453 с, 2,21 Гц; 4) 0,585 с, 1,71 Гц;
5) 0,913 с, 1,09 Гц. **1.11.** $\tau^2 k / (2\pi N)^2 = 7,9$ г.

1.12. $m / ((v_1/v_2)^2 - 1) = 16,7$ г. **1.13.** а) Уменьшится в 1,41 раза;
б) уменьшится в 1,15 раза.

2.1. 1) 0,75 с, 1,33 Гц; 2) 2,0 с, 0,50 Гц; 3) 1,72 с, 0,582 Гц;
4) 2,93 с, 0,342 Гц; 5) 19,9 с, 0,05 Гц. **2.2.** В 1,73 раза.

2.4. $(N_2/N_1)^2 = 9$. **2.5.** $4\pi^2 N^2 / \tau^2 = 10$ м/с. **2.6.** $gT^2 / (4\pi^2) = 0,25$ м.

2.7. $T\sqrt{g/g_0} = 2,5$ м. **2.8.** $x(N_2)^2 / [(N_1 + N_2)(N_1 - N_2)] = 18$ см; 50 см.

2.9. $x/(n^2 - 1) = 38,4$ см. **2.10.** $\sqrt{2gh} = 0,54$ м/с.

3.5. Проходит через положение равновесия. **3.8.** Нет; $v_0 = 10$ Гц.

3.9. $(L\sqrt{k/m}) / (2\pi) = 50$ км/ч.

4.1. 11,5 км/ч. **4.3.** 0,5 с; 2 Гц. **4.4.** $lN/\tau = 2,4$ м/с. **4.5.** 2,06 м.

4.6. 22,2 м/с. **4.7.** 335 км/с. **4.8.** 79 Гц; 1360 Гц. **4.9.** 3,8 м; 3,8 см.

4.10. 2 км **4.11.** 24 с; 1,5 с. **4.12.** $\tau v v_0 / (v + v_0) = 226$ м. **4.14.** 2,94 с.

4.15. 690 м. **4.16.** 250 м. **4.17.** 44 см; 17 см.

5.1. 0,36 мВб. **5.2.** 0,36 мВб. **5.3.** 0,31 мВб; 0. **5.4.** 0,22 мВб; 0;

0,11 мВб. **5.11.** 1) 7,15 мВб; 2) 2,60 Вб; 3) 34 мкВб; 4) 5,6 мкВб;

5) 10 кВб. **5.12.** 0,09 мГн.

6.1. 3,75 Кл. **6.2.** 290 кВ. **6.3.** 47 кДж; 310 м/с. **6.4.** 1) 9 Дж;

2) 1,2 мДж; 3) 16 мДж; 4) 28 мДж; 5) 35 Дж. **6.5.** 1) 0,1 Гн;

2) 0,32 Гн; 3) 69 мГн; 4) 17 мГн; 5) 0,29 Гн. **6.6.** 62 Дж.

6.8. 2,2 мДж; 0,045 мГн. **6.9.** $U_m \sqrt{C/L} = 0,1$ А. **6.10.** 150 мкДж; 10 мкДж. **6.11.** 1,0 мА; 200 В. **6.12.** 0,067 мкДж; 0,03 мкДж.
6.13. 51 пФ. **6.14.** 1) 0,31 с, 3,2 Гц; 2) 2,5 мс, 0,4 кГц; 3) 51 нс, 20 МГц; 4) 6,3 нс, 160 МГц; 5) 330 нс, 3 МГц. **6.15.** 0,56 мкГн. **6.16.** $3T^2/(4\pi^2\Delta C) = 250$ мкГн, 10 нФ. **6.17.** Увеличится в 1,25 раза. **6.18.** 3,7 м. **6.19.** 0,056 мФ. **6.20.** 500 кГц. **6.21.** 207-620 м
6.22. 500. **6.23.** 200 пФ. **6.24.** 22 км. **6.25.** 375000 км; 22500000 км.

7.1. 500 с; 1,3 с. **7.2.** $5,9 \cdot 10^9$ км. **7.4.** 200000 км/с. **7.5.** 225400 км/с; 223400 км/с. **7.6.** 2,42. **7.7.** 1,51; 1,33; 1,14. **7.8.** $3,95 \cdot 10^{14}$ Гц; $7,5 \cdot 10^{14}$ Гц. **7.9.** 0,53 мкм.

8.2. 23,5°; 66,5°. **8.3.** 62,5°. **8.5.** 10 м; увеличится на 4 м.
8.7. $h(\operatorname{tg} \beta + \operatorname{tg} \alpha)/(\operatorname{tg} \beta - \operatorname{tg} \alpha)$; 1) 1000 м; 2) 1300 м; 3) 700 м; 4) 450 м; 5) 1000 м.

9.1. 1,36. **9.2.** 19°; 63°; 30°; 22°; 32°. **9.3.** 0°; 45°; 53°. **9.6.** 34°; 50°; 70°; нет; нет; 49°. **9.7.** 30°; 22°. **9.8.** 1,7 м; 3,4 м. **9.9.** 0,15 м.
9.10. 6,1 см.

10.1. 5 см; 6 см; 9 см; -3 см. **10.2.** -1,72 см; -1,67 см; -1,25 см; -0,83 см. **10.5.** 0,22 м; -0,29 м. **10.6.** 10 дптр; 10 см. **10.7.** 20 см; -30 см; 8,75 см; -3,46 см; 4,44 см. **10.8.** 0,1 м; 0,9 м. **10.9.** -5,5 см.

11.1. 1,55 эВ; 2,07 эВ; 3,10 эВ. **11.2.** $4,11 \cdot 10^{14}$ Гц, 730 нм.
11.3. 1,89 эВ. **11.4.** $4,57 \cdot 10^{14}$ Гц, 656 нм; $6,17 \cdot 10^{14}$ Гц, 486 нм; $8,22 \cdot 10^{14}$ Гц, 365 нм; $24,7 \cdot 10^{14}$ Гц, 121 нм; $1,60 \cdot 10^{14}$ Гц, 1870 нм.
11.5. $3,2913 \cdot 10^{15}$ Гц. **11.10.** 8,6 см. **11.11.** 0,0304 а.е.м., 28,4 МэВ, 7,1 МэВ/нуклон; 0,099 а.е.м., 92 МэВ, 7,7 МэВ/нуклон; 0,112 а.е.м., 104 МэВ, 7,4 МэВ/нуклон; 0,24 а.е.м., 225 МэВ, 8,33 МэВ/нуклон; 1,92 а.е.м., 1790 МэВ, 7,6 МэВ/нуклон.

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие	3
1. Колебания пружинного маятника.....	4
Задачи к разделу 1	11
2. Колебания математического маятника	14
Задачи к разделу 2	16
3. Графики колебаний. Вынужденные колебания	17
Задачи к разделу 3	22
4. Механические волны. Звук	24
Задачи к разделу 4	30
5. Электромагнитная индукция.....	32
Задачи к разделу 5	41
6. Емкость. Колебательный контур. Электромагнитные волны.....	45
Задачи к разделу 6	57
7. Скорость света. Дисперсия света.....	61
Задачи к разделу 7	64
8. Отражение света. Плоское зеркало	65
Задачи к разделу 8.....	67
9. Преломление света. Полное внутреннее отражение.....	69
Задачи к разделу 9.....	70
10. Линзы. Построение изображений. Формула линзы.....	72
Задачи к разделу 10.....	78
11. Атом и атомное ядро.....	81
Задачи к разделу 11.....	97
Ответы.....	100

В.В. Грушин
Н.А. Добродеев
Ю.В. Самоварщиков

Пособие по физике
ОТ ПРУЖИНЫ ДО АТОМНОГО ЯДРА

В помощь учащимся 9 класса

Редактор Н.В. Шумакова

Оригинал-макет изготовлен авторами

Подписано в печать 06.07.2009. Формат 60×84 1/16
Печ. л. 6,5. Уч.-изд. л. 6,5. Тираж 4500 экз.
Изд. № 069-1 Заказ №

Национальный исследовательский ядерный университет
«МИФИ».
Типография МИФИ.
115409, Москва, Каширское шоссе, 31

**Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение
высшего профессионального образования**

**НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЯДЕРНЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ «МИФИ»**

МИФИ – базовое высшее учебное заведение России, предназначенное для подготовки инженеров: физиков, математиков, системотехников – инженеров-исследователей, обладающих глубокими знаниями физико-математических дисциплин в сочетании с серьезной инженерной подготовкой.

ФАКУЛЬТЕТЫ	телефон
Факультет экспериментальной и теоретической физики (Т)	8(495)324-84-40
Физико-технический факультет (Ф)	8(495)324-84-41
Факультет автоматике и электроники (А)	8(495)324-84-42
Факультет кибернетики (К)	8(495)324-84-46
Факультет информационной безопасности (Б)	8(495)324-84-00
Гуманитарный факультет (Г):	8(495)323-90-62
- Институт международных отношений	8(495)323-95-83
- Финансовый институт	8(495)324-03-78
- Институт инновационного менеджмента	8(495)323-90-88
- Экономико-аналитический институт	8(495)323-92-15
- Институт финансовой и экономической безопасности	8(495)323-95-27

ПРИЕМНАЯ КОМИССИЯ 8(495)324-84-17; 8(495)323-95-12

Адрес МИФИ: 115409, г. Москва, Каширское ш., д.31

По вопросам повышения квалификации учителей физики, математики и информатики, а также по работе МИФИ со школами в регионах РФ обращаться в **Центр повышения квалификации и переподготовке кадров** по тел.: 8(495)324-05-8, 8(499)725-24-60.