



В.П. ОРЕХОВ

КОЛЕБАНИЯ
и ВОЛНЫ
в курсе физики
средней
школы



В.П. ОРЕХОВ

**КОЛЕБАНИЯ
и ВОЛНЫ
в курсе физики
средней
школы**

Пособие для учителей

МОСКВА «ПРОСВЕЩЕНИЕ» 1977

Орехов В. П.

065 Колебания и волны в курсе физики средней школы.
Пособие для учителей. М., «Просвещение», 1977.
176 с, с ил.

В книге изложена методика изучения большого раздела курса физики X класса «Колебания и волны». В ней дано теоретическое освещение общности колебательных и волновых процессов различной физической природы, изучаемых в школе, раскрыты пути формирования у учащихся соответствующих обобщенных физических понятий, показаны воспитательные возможности курса и его политехническое значение.

60501 — 705
0 103 (03) — 77 149 — 77

530. 1

© Издательство «Просвещение», 1977 г.

ПРЕДИСЛОВИЕ

Учебный материал о колебаниях и волнах различной физической природы в курсе физики средней школы в настоящее время объединен в один большой раздел, на который в X классе выделяется более 60 учебных часов. Создание такого единого «волнового концентра» объясняется исключительно большим значением, которое придается в современной физике и технике учению о различных колебаниях и волнах, а также спецификой весьма широкого класса явлений, благодаря чему возникла специальная дисциплина «Физика колебаний».

Объединение в одном разделе школьного курса физики сведений о различных колебательных и волновых процессах имеет и несомненную педагогическую целесообразность, так как позволяет изучать их с единой точки зрения и тем самым дать учащимся глубокие и практически применимые физические понятия. Одновременно достигается экономия учебного времени и большая прочность знаний.

Использование перечисленных достоинств и возможностей указанного подхода требует большой методической работы. Необходима соответствующая математическая подготовка учащихся, обеспечивающая прочные знания и достаточные умения по некоторым разделам интегрального и дифференциального исчислений, дальнейшая разработка физического эксперимента, создание системы практических упражнений, требуют пристального внимания вопросы формирования диалектико-материалистического мировоззрения, политехническая направленность учебного материала и т. д.

В целях оказания учителю помощи в пособии сделана попытка дать теоретическое освещение общности колебательных и волновых процессов различной физической природы, изучаемых в школе, ответить вопросы формирования у учащихся соответствующих обобщенных физических понятий, показать мировоззренческие воспитательные возможности данного учебного материала.

С особое внимание уделено физическому эксперименту, самостоятельным ученическим опытам и наблюдениям, а также физическим

задачам, помогающим превращать знания в убеждения и первые умения в прочные политехнические навыки.

В соответствии с характером и назначением книги в ней дано описание преимущественно основного физического эксперимента с непременными, однако, ссылками на специальную литературу, в которой можно найти варианты опытов или более детальное описание методики и техники их проведения.

Научный анализ основных вопросов, изложенный непосредственно перед описанием методики их преподавания, как правило, проведен на уровне, выходящем за рамки школьной программы. При этом учтены те затруднения, которые обычно встречаются в школьной практике. Соответствующие сведения учитель сможет использовать не только при подготовке к урокам, но и на факультативных и на внеклассных занятиях, а также в индивидуальной работе со школьниками, интересующимися физикой.

При пользовании книгой нужно иметь в виду следующее.

Стоящие в скобках цифры, например [17, 23, 30, 31], означают ссылки на литературные источники в соответствии со списком, приведенным в конце пособия. Такие ссылки призваны привлечь к ним внимание читателя в целях углубленного изучения тех или иных вопросов. (В данном случае мы еще раз привлекаем внимание к соответствующим пособиям по методике и технике эксперимента 17, 23 и др.)

Ныне действующее учебное пособие по физике для IX класса¹ и учебник для X класса² из-за краткости названы «Физика-9» и «Физика-10».

Примечания вида (гл. I, 3) означают ссылку на раздел 3 главы I.

Нумерация задач и рисунков сквозная. Стоящие в скобках примечания вида (№ 12) означают ссылку на задачу № 12. Звездочкой * отмечены задачи повышенной трудности. В них, как правило, содержится та или иная дополнительная информация для учителя. Буква «э» после номера задачи показывает, что задача может быть поставлена как экспериментальная.

¹ См.: Буховцев Б. Б. и др. Физика. Учебное пособие для 9 класса средней школы. Изд. 7-е. М., 1977.

² См.: Макишев Г. Я., Буховцев Б. Б. Физика. Учебник для 10 класса средней школы. М., 1977.

ВВЕДЕНИЕ

Успешное преподавание любого предмета и курса требует творческого использования принципов дидактики, обоснованного научного определения содержания и методов обучения. Содержание раздела «Колебания и волны», как и всего курса физики средней школы, определяется следующими основными факторами:

научной значимостью отобранных для изучения материала;
важностью его практических приложений;
задачами политехнического образования;
значением учебного материала для формирования диалектико-материалистического мировоззрения и коммунистического воспитания;

межпредметными связями в преподавании физики и других учебных дисциплин в школе.

Колебательное движение — одно из наиболее распространенных движений в природе. Изучение колебаний — это мощный инструмент познания, открытое окно в микромир, и в космос. Недаром академик Л. И. Мандельштам говорил, что если посмотреть историю физики, то можно увидеть, что главные открытия по существу были колебательными.

Такими открытиями явились, например, открытие электромагнитной индукции Фарадеем, теория Максвелла о взаимосвязи электрического и магнитного полей, открытие электромагнитных волн Герцем, открытие лучей X Рентгеном и др.

В средней школе учащиеся получают сведения о механических и электромагнитных колебаниях и волнах. Расположение и содержание материала в отечественных и зарубежных курсах элементарной физики различно и непостоянно. Однако общей тенденцией является все более компактное и позднее изучение данного материала.

В советской школе такое изложение подготовлено целым рядом методических работ (см., например, [28]) и было ранее практически осуществлено в популярном «Элементарном учебнике физики» под редакцией акад. Г. С. Ландсберга [6].

Относительно порядка изучения материала в волновом концентре существуют различные мнения. Ряд методистов считает, что сначала нужно изучить механические колебания и волны, а затем электромагнитные.

Согласно другой точке зрения, принятой действующей программой¹, сначала изучают все виды колебаний, а затем все волны. По указанному плану написаны «Физика-10» и учебник Г. С. Ландсберга [6]. При таком расположении материала внутри волнового концентрата оказывается раздел по геометрической оптике. Это мотивируется необходимостью сообщения учащимся некоторых сведений об оптических явлениях до изучения волновых свойств света.

На основе накопленного опыта преподавания ряд методистов предлагают, не изменяя коренным образом программы, такое изучение данного материала, при котором важнейшие свойства колебаний и колебательных систем (закон сохранения энергии, резонанс и др.), а также свойства волн (отражение, дифракция, интерференция) рассматриваются одновременно на примерах механических колебаний и волн².

Система демонстрационного эксперимента, соответствующая такому изложению материала, разработана Н. М. Шахмаевым [30].

В данной книге материал изложен согласно программе и учебнику «Физика-10» с использованием, однако, упомянутой выше идеи о более целеустремленном изучении общих фундаментальных свойств колебаний и волн различной природы.

Данный материал наглядно иллюстрирует слова В. И. Ленина: «Единство природы обнаруживается в «поразительной аналогичности» дифференциальных уравнений, относящихся к разным областям явлений»³.

Содержание волнового концентрата позволяет убедительно показать диалектический характер развития взглядов, идей и гипотез, ограниченность тех или иных законов и вместе с тем неограниченное приближение человеческого знания ко все более сокровенным тайнам природы. Ярким подтверждением этому служит, например, история развития взглядов на природу света.

Ввиду специфики материала необходимо в полную меру использовать силу и познавательные возможности математических методов, ибо, по выражению Галилея, «книга природы написана математическими символами».

Специфика раздела требует также широкого использования аналогий. Однако применение аналогий не должно вести к упрощению понятий. Всякие аналогии верны только до определенного предела, о котором должны знать учащиеся.

Следует также подчеркнуть необходимость политехнической направленности преподавания темы, поскольку обилие сложного теоретического материала может привести к тому, что этот аспект преподавания отойдет на второй план.

¹ Здесь и в дальнейшем имеются в виду «Программы восьмилетней и средней школы на 1976/77 учебный год. Физика. Астрономия». М., 1977.

² См.: Нурминский И. И. К изучению в X классе раздела «Колебания и волны». — «Физика в школе», 1974, № 3.

³ Лепин В. И. Полн. собр. соч. Изд. 5-е, т. 18, с. 306.

Глава I

МЕХАНИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ

1. Периодические движения

К числу самых распространенных механических движений в природе относятся повторяющиеся движения. Повторяющимися движениями являются, например, вращательные движения Земли вокруг своей оси и вокруг Солнца, вращение стрелок часов и колес автомобилия. Биение сердца человека, морские приливы и отливы и даже движение «кольцевого» автобуса по своему маршруту также примеры повторяющихся движений.

Значение для науки и практики изучения повторяющихся движений можно видеть на примере изучения движения небесных светил, позволившего создать календарь, столь необходимый для хозяйственной деятельности уже в глубокой древности у вавилонян, египтян, майя, инков и других народов. Изучение закономерностей движения небесных светил увенчалось научным подвигом Николая Коперника, который опрокинул основы религиозного мировоззрения средневековья, дал «отставку теологии»¹ и открыл широкий путь научному мировоззрению нового времени. Весьма разнообразными повторяющимися движениями являются колебательные движения: колебания маятника часов, автомобиля на рессорах, крыльев птицы, корабля на волнах и т. д. (рис. 1).

Изучение колебательных движений маятника позволило Гюйгенсу (1657) создать часы, измерявшие время с невиданной для той поры точностью, что имело далеко идущие последствия для развития физического эксперимента и практической деятельности человека, например для мореплавания, нуждавшегося в точном измерении времени при определении долготы местоположения корабля.

Еще большее значение изучение колебаний имеет в наше время — время космических скоростей, огромных энергетических мощностей и гигантских сооружений. Колебания широко используют в различных технологических процессах и машинах. Примером

¹ См.: Энгельс Ф. Диалектика природы.— Маркс К., Энгельс Ф. Соч., т. 20, с. 350.

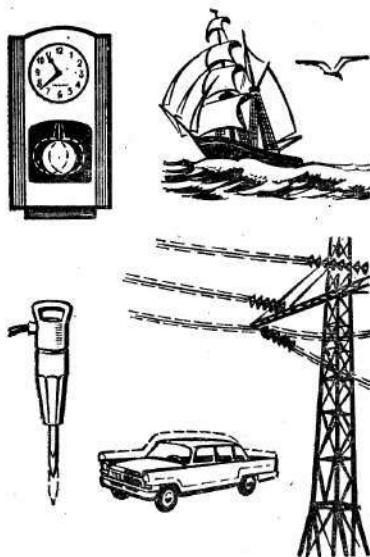


Рис. 1. Примеры колебательного движения различных тел.

Приходится учитывать возникновение колебаний и при строительстве различных, например высотных, сооружений. Так, при порывах ветра колебания верхней части заводской дымовой трубы могут достигать полуметра (рис. 2), что требует строгого расчета ее прочности.

Большой вклад в развитие учения о колебаниях внесли советские ученые академики А. А. Андронов, Л. И. Мандельштам, Н. Д. Папалекси и др.

Какими же специфическими свойствами обладают колебания? Что же повторяется при колебаниях и какие физические величины характеризуют это повторение. Нетрудно видеть, что с течением времени повторяется местоположение колеблющегося тела или его координаты.

Описание колебаний тела, как и всякого механического движения, зависит от выбора соответствующей системы координат. Так, координаты поршня двигателя автомобиля, едущего по прямой горизонтальной дороге, повторяются относительно стенок цилиндра, но не повторяются относительно Земли.

Циклы движений в одних случаях, например у маятника часов, повторяются без изменений в течение строго определенного времени, а в других — морские приливы, движение поездов, биение сердца и т. п.— значительно отличаются один от другого.

Точно повторяющиеся движения называют периодическими. Эти движения характеризуются строгой продолжительностью цикла — периодом колебаний.

¹ См.: Вибрационная техника.— «Физика в школе», 1974, № 3.

могут служить сортировочные машины, вибрационные конвейеры, вибролитье, виброрезание и т. д.¹.

Приходится учитывать и вредное действие колебаний. «Статистика показывает, что около 80% поломок и аварий в машиностроении является результатом недопустимых колебаний» [47, с. 14].

Смертельной опасностью для самолетов одно время был так называемый «флэттер». При некоторой заранее не предвиденной скорости самолет начинало «трясти» и он разваливался в воздухе. Непредвиденные крайне опасные колебания возникали и при запусках ракет. Ученым удалось найти и устранить причины этих опасностей.

Приходится учитывать возникновение колебаний и при строительстве различных, например вы-

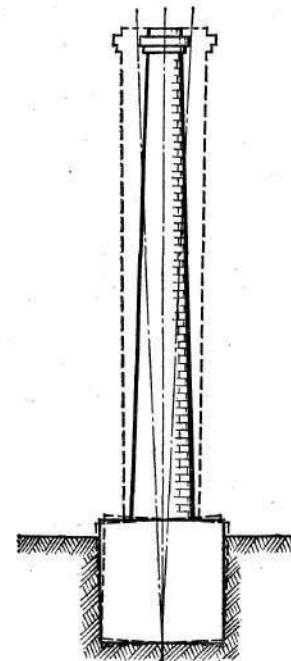


Рис. 2. Колебания заводской трубы.

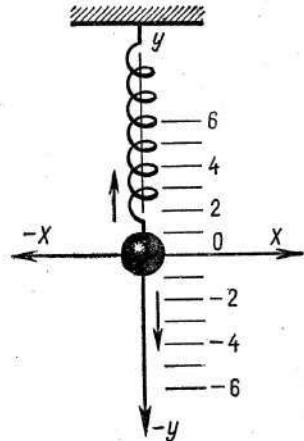


Рис. 3. Колебания шарика на пружине.

В средней школе рассматривают в основном колебания с одной степенью свободы.

Для формирования первоначального понятия о колебаниях с одной степенью свободы, следует использовать и физический эксперимент, лучше всего колебания тяжелого шарика на мягкой пружине (рис. 3), сколь бы ясными они ни представлялись учителю.

Расположив за шариком экран с нанесенной на нем системой координат, показывают периодическую повторяемость координат шарика при его колебаниях вверх и вниз по оси y . Для данного конкретного случая поясняют также понятие цикла колебаний, понимая под этим, например, совокупность движений шарика: $0 \rightarrow 4 \rightarrow 0 \rightarrow -4 \rightarrow 0$. Далее определяют период колебаний T как продолжительность одного цикла колебаний.

Следует обратить внимание на условность положения, принимаемого за начало цикла колебаний или начало отсчета времени. Оттянув пружину вниз, показывают, что совокупность движений $-4 \rightarrow 0 \rightarrow 4 \rightarrow 0 \rightarrow -4$ также представляет собой цикл и имеет тот же период T .

Таким образом, при периодическом движении колеблющееся тело через промежутки времени, равные или кратные периоду T , в любой точке своей траектории движется в одном и том же направлении.

В дальнейшем эти представления окажутся необходимыми при формировании понятия о фазе колебаний.

2. Колебательные системы. Свободные, собственные и вынужденные колебания

При изучении колебаний рассматривают свойства различных колебательных систем. Колебательная система — это тело или совокупность тел, в которых могут происходить колебательные движения, обусловленные внутренними силами. Колебания в таких замкнутых системах называют свободными. Свободные колебания называют собственными, если в колебательной системе можно пренебречь силами трения.

Следовательно, одна из первых задач при изучении колебаний — формирование понятия о колебательных системах. Решить ее можно с помощью рассмотрения конкретных постепенно усложняющихся примеров упругих колебаний и колебаний под действием силы тяжести. При этом для механических колебаний важно определить систему отсчета и выделить в ней колеблющееся тело. Далее, следуя усвоенному учащимися в VIII классе правилу, используют законы движения Ньютона и находят уравнение движения тела (материальной точки), позволяющее определить его координаты в любой момент времени.

При изучении колебательных движений важно также использовать закон сохранения импульса и особенно закон сохранения энергии.

С энергетической точки зрения колебательный процесс представляет собой периодический обмен энергией между различными элементами системы и превращение энергии одного вида, например кинетической, в энергию другого вида, например потенциальную.

С точки зрения сохранения импульса колебания в замкнутой системе происходят так, что положение центра масс системы остается неизменным, а перемещение одних частей системы непременно обуславливает соответствующее перемещение других частей в противоположном направлении. Таким образом, в колебательной системе всегда совершает колебание не одно, а несколько тел, что еще раз подчеркивает важность целесообразного выбора того или иного из них как объекта изучения в зависимости от условий и поставленной задачи.

Очевидно, колебательная механическая система должна состоять как минимум из двух взаимодействующих тел, ибо колебательное (переменное) движение тела возможно только при действии на него некоторой переменной силы (другого тела).

В идеальном случае простейшим примером такой системы служат два одинаковых шарика, соединенных упругой пружиной, в случае, если массой пружины можно пренебречь, а шарики считаются за материальные точки.

Для демонстрации можно использовать два массивных (1—2 кг) шара или цилиндра *aa* (рис. 4), соединенных между собой одной или двумя согнутыми кольцом пластинчатыми пружинами *bb*. Для компенсации силы тяжести цилиндры подвешивают на нитях *vv*.

Растянув или сжав пружины, дают возможность телам совершить эффективные слабо затухающие колебания в горизонтальной плоскости. В любой момент времени цилиндры перемещаются в противоположных направлениях таким образом, что центр масс систем остается на одном месте.

Анализируя опыт, устанавливают следующее:

движение каждого тела колебательное, поскольку оно характеризуется смещением то вправо, то влево от некоторого среднего положения равновесия;

колебательная система включает в себя тела *aa* и пружины *bb* (нити, опоры и Земля в систему не входят; колебания могли бы совершаться и без них, например, в условиях невесомости);

внутренними силами, вызывающими колебательное движение, являются силы упругости пружины;

важнейшее значение для колебательного процесса имеет инертность колеблющихся тел или их масса;

при колебаниях происходят повторяющиеся превращения потенциальной энергии пружины в кинетическую энергию цилиндров и наоборот.

Таким образом, учащиеся получают первое представление о том, что колебания характеризуются не только повторением местоположения (координат) тела, но и повторением энергетического состояния системы, периодическим перераспределением энергии и ее превращениями из одного вида в другой.

(Данное представление окажется особенно необходимым в дальнейшем, при изучении электромагнитных колебаний.)

Понятие о свойствах колебательных систем далее углубляют и закрепляют на примере колебаний маятника (рис. 5).

По той же схеме, которая использовалась при изучении упругих колебаний, устанавливают следующее:

движение маятника колебательное, так как шарик многократно смещается вправо и влево от вертикального положения нити;

колебательная система состоит из шарика, нити и Земли;

внутренними силами, вызывающими колебательное движение шарика, являются

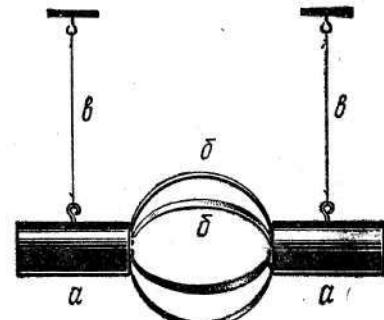


Рис. 4. Колебательная система.

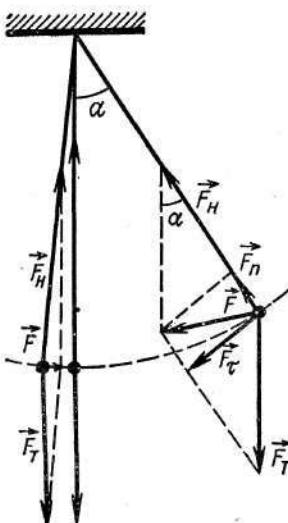


Рис. 5. Колебания маятника.



Рис. 6. Равновесие шариков.

(максимальной в среднем положении) в потенциальную энергию (максимальную в крайнем положении шарика).

Далее формируют понятие об условиях существования колебаний. При отклонении шарика от положения равновесия вниз (см. рис. 3) пружина растягивается и упругая сила действует на шарик вверх. При отклонении шарика вверх пружина сжимается и упругая сила толкает шарик вниз. В соответствии с законом Гука $F = -kx$. Смещение \vec{x} всегда противоположно по направлению силе \vec{F} . Указанную мысль поясняют и применительно к математическому маятнику (рис. 5). На шарик маятника, отклоненного на небольшой ($\approx 5^\circ$) угол, действуют две силы: сила натяжения нити \vec{F}_n и сила тяжести \vec{F}_t , равнодействующая которых \vec{F} направлена к положению равновесия; вектор смещения \vec{x} по направлению противоположен вектору силы \vec{F} .

На основе этих примеров формируют первое условие существования свободных колебаний: при отклонении тела из положения равновесия в системе должна возникать сила, стремящаяся возвратить его в положение равновесия. Для закрепления этого понятия полезно решить следующую задачу.

Задача 1. Может ли шарик совершать колебания, если он находится:
а) на дне сферической чаши (рис. 6, А); на вершине ее (рис. 6, Б).

В качестве самостоятельного задания можно предложить учащимся объяснить колебания ваньки-встаньки или куклы-неваляшки.

До сих пор при изучении свободных колебаний мы не учитывали силы трения, т. е. по существу рассматривали собственные колебания, которые могут продолжаться бесконечно долго. Фактически же свободные колебания всегда затухают. Причиной затухания служат силы трения.

Следовательно, для того чтобы в системе могли возникнуть колебания, которые с известным приближением можно было бы считать свободными, силы внутреннего и внешнего трения должны быть достаточно малы.

Влияние сил трения на колебания можно рассмотреть на следующем примере.

сила натяжения нити \vec{F}_n и сила тяжести \vec{F}_t ;

инертность шарика — обязательное условие колебаний: положение равновесия шарик проходит по инерции;

при колебаниях происходит превращение кинетической энергии (максимальной в среднем положении) в потенциальную энергию (максимальную в крайнем положении шарика).

Далее формируют понятие об условиях существования колебаний. При отклонении шарика от положения равновесия вниз (см. рис. 3) пружина растягивается и упругая сила действует на шарик вверх. При отклонении шарика вверх пружина сжимается и упругая сила толкает шарик вниз. В соответствии с законом Гука $F = -kx$. Смещение \vec{x} всегда противоположно по направлению силе \vec{F} . Указанную мысль поясняют и применительно к математическому маятнику (рис. 5). На шарик маятника, отклоненного на небольшой ($\approx 5^\circ$) угол, действуют две силы: сила натяжения нити \vec{F}_n и сила тяжести \vec{F}_t , равнодействующая которых \vec{F} направлена к положению равновесия; вектор смещения \vec{x} по направлению противоположен вектору силы \vec{F} .

На основе этих примеров формируют первое условие существования свободных колебаний: при отклонении тела из положения равновесия в системе должна возникать сила, стремящаяся возвратить его в положение равновесия. Для закрепления этого понятия полезно решить следующую задачу.

Задача 1. Может ли шарик совершать колебания, если он находится:
а) на дне сферической чаши (рис. 6, А); на вершине ее (рис. 6, Б).

В качестве самостоятельного задания можно предложить учащимся объяснить колебания ваньки-встаньки или куклы-неваляшки.

До сих пор при изучении свободных колебаний мы не учитывали силы трения, т. е. по существу рассматривали собственные колебания, которые могут продолжаться бесконечно долго. Фактически же свободные колебания всегда затухают. Причиной затухания служат силы трения.

Следовательно, для того чтобы в системе могли возникнуть колебания, которые с известным приближением можно было бы считать свободными, силы внутреннего и внешнего трения должны быть достаточно малы.

Влияние сил трения на колебания можно рассмотреть на следующем примере.

Задача * 2 (э). Шар a (рис. 7), просверленный по диаметру, свободно посажен на стержень e , укрепленный на тележке e . К шару и тележке прикреплены одинаковые пружины b и v . Благодаря нити δ пружина b ската, а пружина v расстянута. Описать качественно, как будут совершаться колебания шара и тележки без учета и с учетом внутренних сил трения, если пережечь нить. Внешними силами трения пренебречь.

Решение. Силы трения шара о стержень — это внутренние силы колебательной системы, а силы трения колес о стол внешние.

Пренебрегая внешними силами, следует заключить, что центр тяжести системы смещаться не должен. Поэтому, когда колебания шара затухнут и он займет положение примерно посередине стержня, тележка сместится влево, что наглядно обнаружится на опыте.

Помимо сил трения, которые всегда тормозят колебания, на систему могут действовать и другие силы. Под действием этих сил повторяющиеся периодические движения могут совершать и такие тела, которые не являются частью каких-либо колебательных систем. Например, щетки стеклоочистителя автомобиля не являются колебательной системой, но они совершают вынужденные колебания в результате действия на них внешней силы (электродвигателя).

3. Гармонические колебания пружинного и математического маятников

После качественного рассмотрения собственных колебаний пружинного и математического маятников ставят задачу по выводу уравнения этого движения. При ее решении может быть использована установка (рис. 8) с горизонтальным пружинным маятником [17, т. I, рис. 122], в которой вес груза компенсируется силой реакции горизонтального стержня, или еще более простая установка,

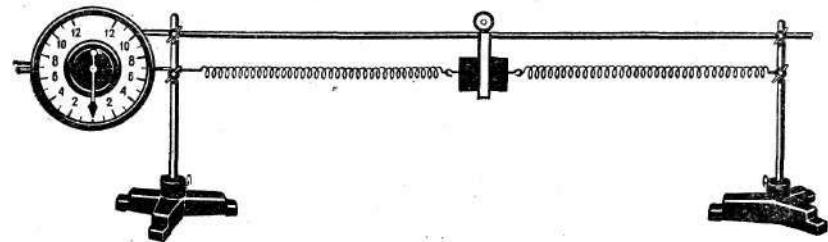


Рис. 8. Установка с горизонтальным пружинным маятником.

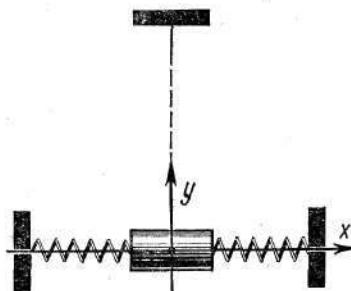


Рис. 9. Установка с горизонтальным пружинным маятником, подвешенным на нити.

можно пренебречь. Для установки можно использовать пружины от прибора «ведерко Архимеда» и груз массой 0,5—1 кг.

Можно использовать и вертикальные колебания груза на пружине (см. рис. 3). Установка в этом случае значительно упрощается, но приходится объяснять роль силы тяжести, что усложняет теорию изучаемого материала. Приведя груз в колебания, сначала вводят понятия величин, характеризующих данное движение: смещение груза от положения равновесия x ; максимальное смещение — амплитуду колебаний x_0 или A ; период колебаний $T = \frac{t}{n}$, где n —

число колебаний за время t ; частоту колебаний $v = \frac{1}{T}$.

По динамометру устанавливают, что упругая сила максимальна при максимальном (равном амплитуде) смещении тела от положения равновесия и равна нулю, когда $x = 0$.

Приступая к выводу уравнения движения $x = f(t)$, выбирают инерциальную систему координат, связанную с Землей, приняв за начало координат положение равновесия тела.

Применим к колеблющемуся на пружине телу (материальной точке) второй закон Ньютона: $\Sigma \vec{F} = m\vec{a}$. В данном случае $F_x = ma_x$. Сила F_x — это упругая сила, определяемая законом Гука: $F_x = -kx$. Следовательно, $ma_x = -kx$, откуда $a_x = -\frac{k}{m}x$, или $x'' + \frac{k}{m}x = 0$.

Для математического маятника (см. рис. 5)

$$\vec{F}_n + \vec{F}_t = m\vec{a}.$$

Сила \vec{F} равнодействующая сил \vec{F}_n и \vec{F}_t заставляет колеблющееся тело двигаться к положению равновесия. Силу \vec{F} можно разложить на тангенциальную $\vec{F}_t = m\vec{a}_t$ и нормальную $\vec{F}_n = m\vec{a}_n$ составляющие:

$$F_t = F_t \sin \alpha = mg \sin \alpha.$$

показанная на рисунке 9. В последней сила тяжести груза в среднем положении компенсируется натяжением нити. Достоинство установки — незначительное трение в системе. Недостаток ее в методическом отношении заключается в том, что в ней одновременно представлены и пружинный, и математический маятники, поскольку на груз действует не только сила упругости, но и равнодействующая сил натяжения нити и силы тяжести (см. рис. 5). Однако при «сильных» пружинах этой составляющей

для малых углов $\sin \alpha = \frac{x}{l}$ (при $\alpha = 4,5^\circ$ ошибка $\approx 0,1\%$).

При этом можно считать, что векторы $\vec{a}_t = \vec{x}''$ и \vec{x} расположены в горизонтальной плоскости на одной прямой, но имеют противоположное направление. Следовательно,

$$F_t = -\frac{mg}{l}x,$$

т. е. сила \vec{F}_t , подобно упругой силе, пропорциональна \vec{x} . (По этой причине ее называют квазиупругой.)

Пропорциональность силы \vec{F}_t смещению \vec{x} для математического маятника можно показать, выводя из равновесия с помощью демонстрационного динамометра гирю массой 2—5 кг, подвешенную на длинной нити (1—2 м).

Окончательно получают:

$$x'' + \frac{g}{l}x = 0.$$

Следовательно, колебания пружинного и математического маятников описываются аналогичными уравнениями, которые в общем виде могут быть представлены следующим образом:

$$x'' + k'x = 0.$$

Здесь по усмотрению учителя можно заметить, что, поскольку коэффициент k' — положительная величина, по этой, а также и ряду других причин, которые выяснятся позже, его обычно записывают в виде ω^2 . Тогда уравнение рассмотренных колебаний примет вид:

$$x'' + \omega^2x = 0.$$

Движения, описываемые данным уравнением, называют гармоническими колебаниями.

Согласно данному закону может изменяться не только механическая величина — смещение \vec{x} , но и электрические, оптические и другие физические величины.

Для существования механических гармонических колебаний необходимо наличие силы \vec{F} , пропорциональной смещению \vec{x} и противоположной ему по направлению.

4. Решение уравнения гармонического колебательного движения

Для определения вида функции $x = f(t)$, показывающей зависимость смещения от времени в гармонических колебаниях, необходимо решить линейное однородное дифференциальное уравнение второго порядка.

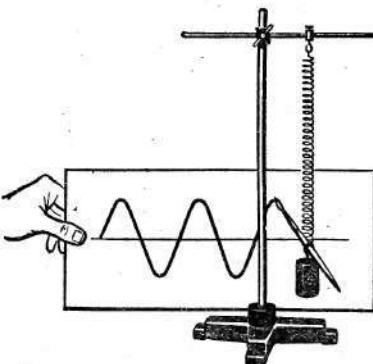


Рис. 10. Запись колебаний пружинного маятника.

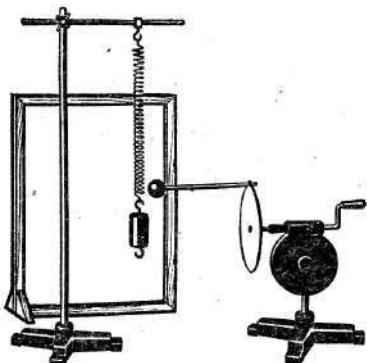


Рис. 11. Демонстрация связи гармонического движения и движения по окружности.

$= y_0 \cos k'x$. Поскольку $x = vt$, то $y = y_0 \cos \omega t$, где $\omega = k'v$ — некоторая постоянная величина.

2. Сопоставление вращательного и колебательного движения. Для установления исследуемой зависимости $x = f(t)$ можно также использовать установку, показанную на рисунке 11 [17, т. I, рис. 125]. Освещая установку, подбирают от руки такую скорость вращения шарика на центробежной машине, чтобы движение его тени в точности соответствовало гармоническим колебаниям груза на пружине. Из опыта следует, что проекция равномерно вращающейся по окружности точки также совершает гармонические колебания. Это позволяет вместо изучения колебания тела исследовать колебания проекции равномерно вращающейся точки и таким образом установить все основные кинематические соотношения гармонических колебаний. Используя чертеж, воспроизводящий схему опыта [9, рис. 13; см. также рис. 16–17], прежде всего устанавлива-

ют, что в любой момент времени $x = x_0 \cos \varphi = x_0 \cos \omega t$. Одно из достоинств данного способа — возможность интерпретации постоянной величины ω , как круговой частоты.

Учащиеся X класса не имеют достаточных математических знаний для решения дифференциальных уравнений. Тем не менее в целях устранения догматизма желательно с той или иной степенью строгости обосновать правомерность такого вывода. Для этого можно использовать следующие приемы.

1. Эмпирическое решение. Для установления на опыте синусоидальной зависимости координаты тела от времени следует получить хорошую запись колебаний маятника (рис. 10), обеспечив равномерное перемещение экрана [17, т. I, рис. 127]. Указанную зависимость подсказывает сама форма данного графика. Еще лучше взять на графике несколько характерных точек, показав измерением и расчетами, что действительно координаты x и y колеблющейся точки связаны соотношением $y =$

вают, что в любой момент времени $x = x_0 \cos \varphi = x_0 \cos \omega t$. Одно из достоинств данного способа — возможность интерпретации постоянной величины ω , как круговой частоты.

Следует, однако, иметь в виду, что практически добиться совпадения колебаний тени и груза на пружине (см. рис. 11) — нелегкое дело. Мало помогает и применение электродвигателя. Поэтому целесообразнее поставить опыт с проекцией колебания конического маятника (рис. 12). Для этого берут два маятника a и b длиной 1–1,5 м и укрепляют один у классной доски, а другой на штативе, установленном на демонстрационном столе. Установку освещают со стороны класса таким образом, чтобы движение тени от шарика конического маятника a совпадало с движением шарика плоского маятника b у доски. Вместо нитяного маятника b можно также взять пружинный маятник (см. рис. 9). Равенство периодов и амплитуд конического и пружинного маятников подбирают на опыте.

Интересный методический прием, позволяющий вывести уравнение гармонических колебаний с помощью технического примера, использован в учебнике физики для X класса школ ГДР [16]. Связь вращательного и колебательного движения в учебнике показана на примере действия кривошипа опиловочного станка (рис. 13), что позволяет вывести уравнение гармонических колебаний в виде

$$y = y_0 \sin \varphi = y_0 \sin \omega t.$$

3. Сопоставление правой и левой частей уравнения

$$x'' = -\frac{k}{m} x \quad (1)$$

с функцией синуса и ее второй производной.

Обращают внимание учащихся на то, что вторая производная функция синуса и косинуса пропорциональна самой функции, но имеет противоположный знак:

$$(\cos z)' = -\sin z; (\cos z)'' = -\cos z, \quad (2)$$

если z — независимая переменная величина.

Сопоставляя уравнения 1 и 2, по аналогии можно предположить, что координата колеблющегося тела в зависимости от времени должна изменяться по закону косинуса: $x \sim \cos \omega t$. Исходя из размерности правой и левой частей данной зависимости, следует также предположить, что в правой части должен быть множитель, имеющий размёрность длины, а величина ω должна иметь размёрность [рад/с] или [град/с], так как ωt — это угол. Окончательно

$$x = x_0 \cos \omega t. \quad (3)$$

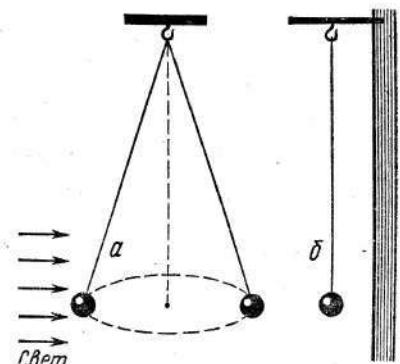


Рис. 12. Опыт с коническим и плоским маятниками.

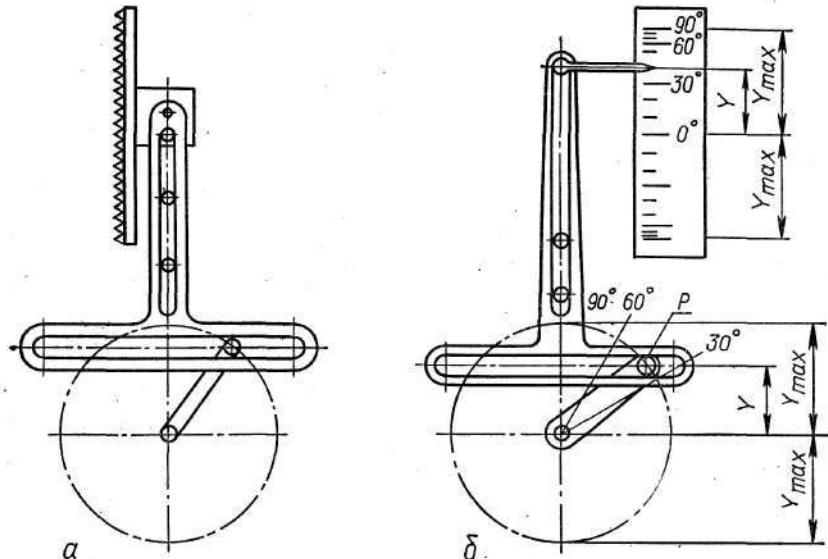


Рис. 13. Колебательное движение кривошипа опиловочного станка.

В справедливости данного решения убеждаются подстановкой, которая дает: $-x_0\omega^2 \cos \omega t = -\frac{k}{m}x_0 \cos \omega t$. Следовательно, для того чтобы выражение 3 было решением уравнения 1, необходимо выполнение равенства

$$\omega^2 = \frac{k}{m}, \text{ или } \omega = \sqrt{\frac{k}{m}}.$$

4. Приближенный численный метод решения. Этот метод полезно рассмотреть на факультативных занятиях или с учащимися, проявляющими повышенный интерес к физике и математике. Существо метода [15, т. I, с. 86—87] сводится к следующему. Рассматривают конкретный случай гармонического колебания, например пружинного маятника, уравнение движения которого записывают в виде $a = -\frac{k}{m}x$.

Задают конкретное числовое значение постоянной $\frac{k}{m}$ и начальные условия: $v_0 = 0$ и $x = x_0 = 1$. Это позволяет найти значение a_0 , которое для крайнего положения маятника равно $\frac{k}{m}$. Далее определяют значение v_1 скорости через промежуток времени $\Delta t_1 = 0,1$ с, значительно меньший периода T , приближенно считая движение равноускоренным $v_1 = v_0 + a_0 \Delta t_1$. Тогда новую координату точки определяют из соотношения

$$x_1 = x_0 + v_{cp} \Delta t_1,$$

$$\text{где } v_{cp} = \frac{v_0 + v_1}{2} = \frac{v_1}{2}.$$

Для второго промежутка времени $\Delta t_2 = \Delta t_1$ расчеты выполняют аналогично.

На основе расчетов строят график движения весьма близкий к графику функции $x = x_0 \cos \omega t$.

5. Фаза колебаний

В зависимости от конкретных условий описанные выше способы пояснения решения уравнения гармонических колебаний с той или иной полнотой обязательно найдут себе место в процессе изучения данного материала. Все они приводят к выводу, что координата колеблющейся точки изменяется по синусоидальному закону согласно соотношениям:

$$x = x_0 \sin \varphi = x_0 \sin \omega t, \text{ или } x = x_0 \cos \omega t.$$

Далее необходимо рассмотреть величину φ , называемую фазой колебаний.

В учебной и методической литературе по физике нет общепринятого определения фазы, поскольку состояние колеблющейся частицы в соответствии с формулами

$$x = x_0 \cos \varphi = x_0 \cos (\omega t + \varphi_0) = x_0 \cos \left(2\pi \frac{t}{T} + \varphi_0\right)$$

можно характеризовать, используя различные величины: x , $\frac{t}{T}$, φ .

Чаще всего фазу определяют как величину, характеризующую состояние колебательного процесса в любой момент времени и измеряемую промежутком времени, истекшим от начала колебаний, выраженным в долях периода.

Данный подход, имеющий ряд методических достоинств, страдает, однако, и серьезными недостатками.

Во-первых, выраженный в долях периода промежуток времени есть отношение $\frac{t}{T}$. Фаза же $\varphi = 2\pi \frac{t}{T}$ — это величина, пропорциональная отношению $\frac{t}{T}$.

Во-вторых, данное определение касается только частного случая, когда начальная фаза $\varphi_0 = 0$.

Поэтому определение, данное в учебнике «Физика-10», более приемлемо: «Величину, стоящую под знаком косинуса или синуса, называют фазой колебаний, описываемых этими функциями».

Это определение в дальнейшем будет расширяться и углубляться, приобретая соответствующий физический смысл.

Под знаком косинуса или синуса стоит значение угла $\varphi = \omega t$. Выясняют прежде всего физический смысл постоянной величины ω . Из рассматриваемой формулы следует, что $\omega = \frac{\varphi}{t}$.

Для нахождения значения ω можно взять любое значение угла φ и соответствующее ему времени t .

Но удобнее положить $\varphi = 2\pi$, а $t = T$. Тогда $\omega = \frac{2\pi}{T}$ есть число колебаний за 2π с. Поэтому величину ω называют циклической или круговой частотой.

После этого фазу можно записать в следующем виде:

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

Следовательно, фаза колебаний φ пропорциональна величине $\frac{t}{T}$, т. е. времени колебаний, выраженному в долях периода T .

Если же фазу записать в виде $\varphi = \frac{t}{T} - \frac{2\pi}{\omega}$, то можно просто сказать, что фаза — это мера времени, прошедшего от начала колебаний и выраженного в единицах, в 2π раз меньших, чем период T .

Следующий шаг — введение понятия начальной фазы. Нетрудно проверить с помощью подстановки, что решением дифференциального уравнения $x'' = -\omega^2 x$ является не только выражение $x = x_0 \cos \omega t$, но и выражение $x = x_0 \cos(\omega t + \varphi_0)$, где φ_0 — начальная фаза колебаний.

При формировании этого понятия полезно использовать аналогию формул: $\varphi = \omega t + \varphi_0$ (фазы гармонического колебательного движения) и $s = vt + s_0$ (перемещение равномерного прямолинейного движения). Величина s_0 показывает перемещение от начала координат в момент начала отсчета времени $t = 0$.

Величина φ_0 показывает для кругового движения значение начального угла поворота радиус-вектора, а для прямолинейного колебания частицы определяет ее начальное смещение

$$x = x_0 \cos \varphi_0 \text{ при } t = 0.$$

Сравнение формул $x = x_0 \cos(\omega t + \varphi_0)$ и $x = x_0 \cos \omega t$ позволяет также ввести понятие разности фаз. В данных случаях эта разность равна φ_0 . В этой связи следует пояснить практическую целесообразность записи уравнения гармонических колебаний в виде

$$x = x_0 \cos \omega t, \text{ или } x = x_0 \sin \omega t.$$

Обычно начало отсчета времени удобно выбирать так, чтобы смещение в этот момент времени было или максимальным, или минимальным. При записи уравнения движения в виде $x = x_0 \sin \omega t$ отсчет времени ведется с момента прохождения тела через положение равновесия (при $t = 0; x = 0$), а при записи уравнения в виде $x = x_0 \cos \omega t$ отсчет времени ведется с момента наибольшего отклонения от положения равновесия (при $t = 0, x = x_0$). Так практически и поступают, когда подсчитывают время или число колебаний маятника, поскольку трудно зафиксировать положение шарика в средней точке, где он имеет максимальную скорость.

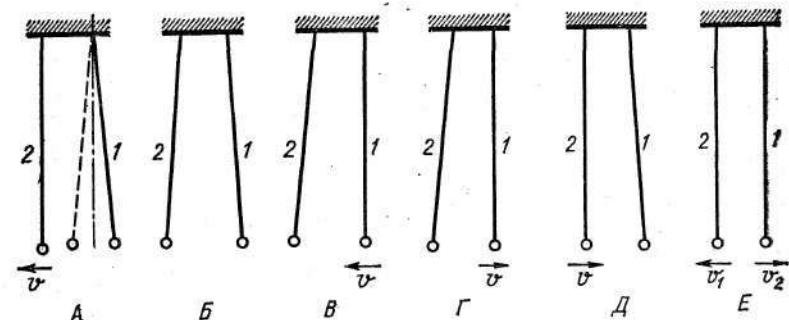


Рис. 14. Колебания маятников в разных фазах.

С математической же точки зрения обе эти функции эквивалентны, но их аргументы отличаются сдвигом фаз на $\frac{\pi}{2}$, так как $\cos \omega t = \sin \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right)$.

Понятие разности фаз столь важно и необходимо, что некоторые авторы учебных пособий считают его даже первичным и основным. Так, в учебнике под ред. Г. С. Ландсберга [6, с. 25] введено сначала понятие не фазы, а сдвига фаз.

Основанием для такого подхода служит тот факт, что понятие фазы становится наглядным именно при сравнении фаз нескольких колебаний.

Имея это в виду, следует показать учащимся и сравнить одновременное движение двух математических маятников при различной разности фаз их колебаний.

Результаты наблюдений полезно осмыслить путем решения следующей задачи.

Задача 3. Вычислите минимальное значение разности фаз колебаний маятников, изображенных на рисунке 14. Отклонение маятников от равновесия считать равным амплитуде.

Решение. Смещение x может иметь одно и то же значение при различных фазах, так как оно выражается циклической функцией косинуса. При решении этой и последующих задач, если в том нет специальной необходимости, за величину фазы (угла) будем принимать ее наименьшее значение.

Условимся также за начало координат принимать положение равновесия, если это не будет специально оговорено, а отсчет времени вести с момента начала движения тела из крайнего правого положения, когда смещение x положительно.

Для этого момента $x = x_0 \cos \omega t = x_0$ и $\varphi_0 = 0$. Разностью же фаз назовем $\Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1$, где φ_2 — фаза второго, а φ_1 — первого (правого) маятника.

Для случая, изображенного на рисунке 14, A, смещение первого маятника $x = x_0$, $\varphi_1 = 0$. Для второго маятника $x = 0$ (с переходом от положительных значений к отрицательным). Следовательно,

$$\varphi_2 = \frac{\pi}{2}; \quad \Delta\varphi = \frac{\pi}{2}.$$

Аналогично находят, что для случаев B, В, Г, Д и Е разность фаз соответственно равна: π ; $\frac{\pi}{2}$; $-\frac{\pi}{2}$; $\frac{3}{2}\pi$; $-\pi$.

Формированию понятия о фазе и разности фаз способствует также решение графических задач.

При этом вначале полезно показать графики, построенные самими колеблющимися телами — маятником-песочницей, острием камертонов на закопченном стекле и т. п. (см. рис. 10). Равномерное движение бумаги или стекла в этих опытах, перпендикулярное плоскости колебаний тела, обеспечивает временную развертку и соответствует оси времени t .

Задача 4. Постройте графики гармонических колебаний:

$$x_1 = 1 \cdot \cos \omega t \text{ (см)}; \quad x_2 = 1 \cdot \cos \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right) \text{ (см)}.$$

Период колебаний $T = 2$ с.

Решение. При решении задачи обращают внимание прежде всего на ее физическую, а не на известную учащимся «тригонометрическую» сторону. (Для этого, в частности, в условие и введена «лишняя» физическая величина — период колебаний T .)

Искомый же график должен рассматриваться как зависимость $x = f(t)$. Поэтому время t полезно в явном виде представить и на графике, и в таблице, а на оси времени отложить все три величины: время t в секундах, время в долях периода и фазу в градусах.

После этого заполняют следующую таблицу:

№ п/п	Время t , с	Время $\frac{t}{T}$, доля периода	Фаза φ , град	Перемещение x , см
1	0	0	0	1
2	0,25	1/8	45	0,71
3	0,5	2/8	90	0
4	0,75	3/8	135	-0,71
5	1	4/8	180	-1

Данные каждой строки соотносят с конкретным примером колебаний математического маятника или груза на пружине. Так, например, заполнив вторую строку, рассуждают следующим образом.

Период колебаний маятника $T = 2$ с. Следовательно, до положения равновесия маятник движется 0,5 с. В момент времени

$t = 0,25$ с маятник находится справа от вертикали.

Заполнив вторую строку таблицы, тотчас находят и соответствующую точку графика (рис. 15, A). Таким образом, построение графика идет параллельно с заполнением таблицы.

Дальнейшее заполнение таблицы не обязательно, поскольку для больших значений φ график можно построить, опираясь на соображения симметрии.

Данную таблицу используют и для построения второго графика (рис. 15, B). Но для первой точки этого графика берут данные уже третьей строки, что наглядно показывает опережение колебаний по фазе на $\frac{\pi}{2}$ или на четверть периода.

В качестве домашнего задания полезно дать задачу на построение графика зависимости $x = \cos(\omega t + \pi)$ (рис. 15, B).

В дальнейшем рассмотренные выше графики окажутся полезными при изучении формул и графиков скорости и ускорения гармонических колебаний, а также фазовых соотношений величин, характеризующих электромагнитные колебания.

Для формирования понятия фазы и разности фаз необходимо решить ряд задач [22, № 721—722].

6. Скорость при гармонических колебаниях

Проекция скорости колебательного движения на ось Ox — это первая производная координаты $x = x_0 \cos(\omega t + \varphi_0)$ по времени. При $\varphi_0 = 0$ $v = x' = -x_0 \omega \sin \omega t$.

Для того чтобы показать в явном виде сдвиг фаз между смещением и скоростью, формулу скорости целесообразно записать так:

$$v = x_0 \omega \cos \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right).$$

Формулу скорости можно вывести также следующим образом.

На чертеже (рис. 16), изображающем равномерно врачающийся радиус-вектор \vec{R} , указывают модуль и направление вектора линейной скорости \vec{v} . Проекция этого вектора на вертикальную ось и дает модуль вектора скорости гармонического колебания. (Можно также использовать разложение скорости \vec{v} на две составляющие \vec{v}_x и \vec{v}_y .) Составляющая \vec{v}_x и даст значение скорости гармонического



Рис. 15. Графики трех колебаний в разных фазах.

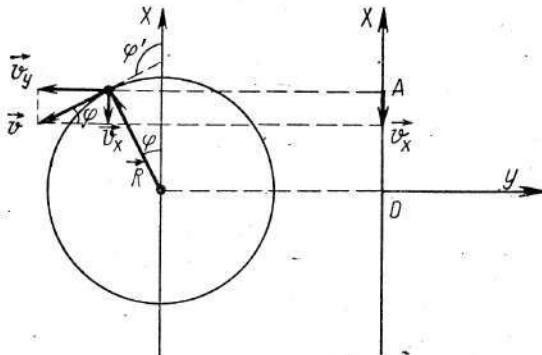


Рис. 16. К выводу формулы скорости.

опережает по фазе вектор перемещения на 90° . Этот факт должен быть обстоятельно рассмотрен и как следует осмыслен с помощью графиков (см. рис. 15) и демонстраций.

Наблюдая достаточно медленные ($T \approx 2$ с) колебания математического маятника, нетрудно качественно установить, что в соответствии с формулами и графиками скорость колеблющейся частицы максимальна в момент прохождения положения равновесия и равна нулю в крайнем положении.

Полезен также следующий прием. На шарик, вращение которого проецируется на экран (см. рис. 11), укрепляют по касательной к окружности стрелку, изображающую вектор скорости \vec{v} . Тень от стрелки на экране, соответствующая скорости гармонических колебаний, получается максимальной при прохождении тени шарика через положение равновесия и постепенно убывающей, а затем обращающейся в нуль в крайних положениях [17, т. I, с. 121].

В общем случае, когда $\varphi_0 \neq 0$,

$$v_x = v_0 \cos\left(\omega t + \varphi_0 + \frac{\pi}{2}\right).$$

Поскольку $v_0 = \omega R$,

$$v_x = \omega R \cos\left(\omega t + \varphi_0 + \frac{\pi}{2}\right).$$

7. Ускорение при гармонических колебаниях

Проекция ускорения на ось Ox :

$$a_x = v'_x = -x_0 \omega^2 \cos \omega t = x_0 \omega^2 \cos(\omega t + \pi).$$

Данную формулу можно также получить, используя чертеж (рис. 17), на котором изображают вектор \vec{a} центростремительного ускорения материальной точки, равномерно вращающейся по окружности. Проекция этого вектора на ось Ox , или составляющая \vec{a}_x , и определяет ускорение гармонического колебания.

колебания. Как видно из чертежа,

$$v_x = v_0 \cos\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) = v_0 \cos \varphi'.$$

Полученную формулу сопоставляют с формулой проекции перемещения

$$x = x_0 \cos \varphi = x_0 \cos \omega t$$

и устанавливают, что

$$\varphi' > \varphi; \varphi' = \varphi + \frac{\pi}{2},$$

т. е. вектор скорости

Поскольку вектор \vec{a} по направлению противоположен радиус-вектору \vec{R} , можно записать:

$$a_x = a_0 \cos(\varphi + \pi) = a_0 \cos(\omega t + \pi).$$

Следовательно, ускорение гармонического колебания опережает по фазе перемещение на π и скорость на $\frac{\pi}{2}$.

Для запоминания этого факта полезно рассмотреть с учащимися схему (рис. 18), показывающую взаимное расположение векторов \vec{R} , \vec{v} и \vec{a} для вращательного движения. При проецировании этих векторов на ось Ox благодаря их указанному расположению в пространстве соответственно под углом 90° один к другому и возникает разность фаз $\frac{\pi}{2}$ между смещением, скоростью и ускорением гармонического колебания. Полезно также еще раз обратиться к графикам, изображенным на рисунке 15.

Для углубления и закрепления первоначальных понятий об изученных физических величинах (x , v_x и a_x) можно решить следующие задачи, выделяя то особенное, что отличает гармонические колебания от других видов движения.

Задача 5. При колебательном движении пружинного маятника в соответствии с законом Гука на него действует сила $F = -kx$. Принимая во внимание эту формулу, ответьте на вопросы: а) В чем отличие движения маятника от равномерного прямолинейного движения? б) В чем отличие его от движения равноускоренного? в) В каком положении маятник имеет наибольшие и в каком наименьшие значения ускорения \vec{a} и скорости \vec{v} ?

Ответ. а) В отличие от равномерного прямолинейного движения скорость тела в процессе гармонических колебаний меняется.

Это следует из того, что на тело действует неуравновешенная сила, следовательно, тело движется с ускорением.

б) В отличие от равноускоренного движения ускорение колеблющегося тела не постоянно. Это следует из формулы

$$|\vec{a}| = \frac{\vec{F}}{m} = \frac{k}{m} x.$$



Рис. 17. К выводу ускорения гармонического колебания.

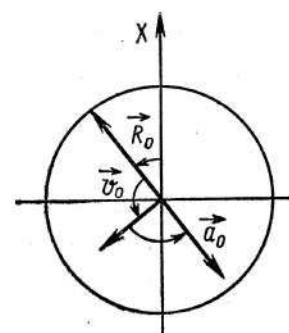


Рис. 18. Схема для пояснения разности фаз между смещением, скоростью и ускорением колебательного движения.

Ускорение \vec{a} изменяется, так как изменяется сила \vec{F} . Наибольшее по модулю ускорение тела имеет в крайних положениях при максимальном смещении, а наименьшее, равное нулю, в положении равновесия. В крайнем положении скорость тела $\vec{v} = 0$. Затем скорость возрастает, поскольку есть ускорение, достигая максимального значения в положении равновесия.

Нередко учащихся смущает тот факт, что в крайнем положении частица имеет максимальное ускорение, хотя «не имеет скорости».

В связи с этим следует пояснить, что ускорение для крайнего положения частицы $\vec{a} = \frac{\vec{v}_k - \vec{v}}{\Delta t} = -\frac{\vec{v}}{\Delta t}$ (при $\Delta t \rightarrow 0$), где \vec{v} — скорость, которую имеет частица вблизи точки наибольшего отклонения от положения равновесия. Поскольку $\vec{v} \neq 0$, то $\vec{a} \neq 0$.

На уроках математики следует рекомендовать рассмотрение этого вопроса методом нахождения экстремума функций.

Задача 6. Наблюдая за движением по экрану тени от быстро вращающегося по окружности шарика (см. рис. 11), ученик заметил, что тень хорошо видна только для крайних (верхнего и нижнего) положений шарика. Объясните почему.

Ответ. Явление объясняется тем, что в крайних положениях скорость движения наименьшая.

Задача 7. Напишите уравнение гармонического колебания, амплитуда которого $x_0 = 10$ см, период колебаний $T = 0,5$ с.

Ответ. В общем случае $x = x_0 \cos\left(\frac{2\pi}{T}t + \varphi_0\right)$. Для данных условий

$$x = 10 \cos \frac{2\pi}{0,5} t \text{ (см)} = 10 \cos 4\pi t \text{ (см)}.$$

Задача 8. По условию задачи 7 определите координаты, скорость, ускорение точки для моментов времени:

$$t_1 = 0; t_2 = \frac{1}{8} T; t_3 = \frac{1}{4} T.$$

В результате решения получатся данные, которые полезно свести в следующую таблицу, поясняющую динамику изменения величин и их фазовые соотношения:

Физическая величина	Формулы	Время в долях периода		
		$\frac{T}{4}$	$\frac{T}{8}$	0
Координата, см	$x = x_0 \cos \omega t$	0	7	10
Скорость, см/с	$v = x_0 \omega \cos (\omega t + \frac{\pi}{2})$	-126	-89	0
Ускорение, см/с ²	$a = x_0 \omega^2 \cos (\omega t + \pi)$	0	-113	-160

8. Периоды колебаний пружинного и математического маятников

Циклическая частота, колебаний пружинного маятника

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}.$$

Следовательно,

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

откуда период колебаний

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

Используя одну и ту же пружину, но значительно отличающиеся по массе гири, наглядно обнаруживаются увеличение периода T с увеличением массы m . Подвешивая одну и ту же гирю к пружинам, значительно отличающимся по жесткости, показывают уменьшение периода с увеличением жесткости.

Период колебаний пружинного и математического маятников не зависит от амплитуды. Для математического маятника этот факт установил Галилео Галилей, наблюдав в 1583 г., как писал его ученик Вивиани, раскачивание лампады в Пизанском соборе.

Для того чтобы понять важность этого открытия, заметим, что в то время не было столь привычных для нас часов. Время измеряли по вытеканию воды или струи песка, по солнечным часам, горению масла в светильниках и т. д. Сам Галилей для измерения времени в соборе пользовался биением собственного пульса, а в различных опытах по механике использовал воду, падающую тонкой струйкой из отверстия в сосуде на чашку весов. Галилей первым предложил измерять малые промежутки времени колебаниями маятника, чем тотчас воспользовались врачи для определения частоты биений пульса. Галилей также установил, что период колебаний маятника пропорционален квадратному корню из его длины. Но изготовить маятниковые часы лишенный к тому времени зрения Галилей не успел. По его поручению эту работу продолжил его сын Винченцо и ученик Вивиани, «которые и разработали первую из известных конструкций маятниковых часов» [32, с. 32] (рис. 19).

Современная законченная конструкция маятниковых часов была создана позже благодаря работам другого известного физика Христиана Гюйгенса (1673 г.). Гюйгенс же получил формулу $T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}$, для вывода которой использовал открытый им факт равенства времени одного оборота конического маятника и периода колебания математического маятника той же длины.

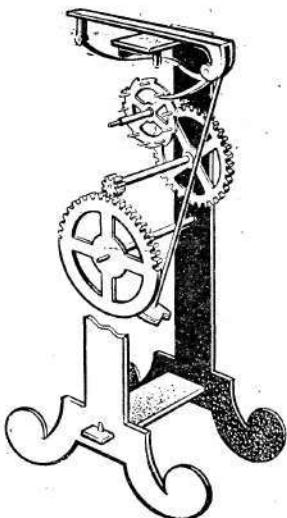


Рис. 19. Проект маятниковых часов Галилея.

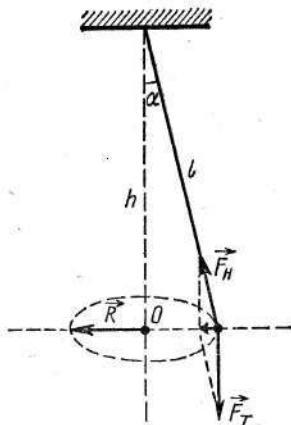


Рис. 20. К выводу формулы периода колебания маятника.

действуют сила тяжести \vec{F}_t и натяжение нити \vec{F}_n . Под действием этих сил маятник получает центростремительное ускорение $|\vec{a}| = \omega^2 R$. При этом

$$\vec{F}_t + \vec{F}_n = -m\omega^2 \vec{R},$$

или в проекции на направление радиуса

$$F_n \sin \alpha = m\omega^2 R,$$

$$F_n = \frac{F_t}{\cos \alpha} = \frac{mg}{\cos \alpha}.$$

Следовательно,

$$\frac{mg \sin \alpha}{\cos \alpha} = m\omega^2 R,$$

откуда

$$g \tan \alpha = \omega^2 R; \tan \alpha = \frac{R}{h}.$$

Для малых углов $h \approx l$. Поэтому

$$\frac{gR}{l} = \omega^2 R; \frac{g}{l} = \frac{4\pi^2}{T^2},$$

откуда

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

Поскольку периоды колебаний конического и плоского маятников равной длины l одинаковы, по данной формуле можно вычислить и период колебания плоского математического маятника.

Как следует из вывода, формула Гюйгенса справедлива только для малых углов ($3-5^\circ$), когда $\sin \alpha \approx \alpha$.

При повторении материала этот вопрос может быть рассмотрен на примере следующей задачи.

Задача 9 (э). Проверьте на опыте, что периоды колебаний плоского (математического) и конического маятников одинаковой длины (см. рис. 12) равны между собой. Пользуясь этим, выведите формулу периода колебаний математического маятника.

Решение. Сначала устанавливают на опыте, что периоды колебаний конического и плоского маятников равной длины одинаковы.

Затем выводят формулу периода колебаний конического маятника, пользуясь рисунком 20. Маятник массой m совершает движение по окружности. По второму закону Ньютона $\Sigma \vec{F} = m\vec{a}$. На маятник

для больших углов с заданной степенью точности период математического маятника может быть вычислен по формуле

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}} \left[1 + \left(\frac{1}{2} \right)^2 \sin^2 \frac{\alpha}{2} + \left(\frac{1 \cdot 3}{2 \cdot 4} \right)^2 \sin^4 \frac{\alpha}{2} + \left(\frac{1 \cdot 3 \cdot 5}{2 \cdot 4 \cdot 6} \right)^2 \sin^6 \frac{\alpha}{2} \dots \right].$$

Первое приближение дает формулу Гюйгенса:

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

Поправка к периоду в этом случае, например, при $\alpha = 1,5^\circ$ составляет всего 0,01%.

Во втором приближении

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}} \left[1 + \left(\frac{1}{2} \right)^2 \sin^2 \frac{\alpha}{2} \right].$$

Как нетрудно подсчитать, даже для угла $\alpha = 60^\circ$ поправка составит менее 6% и гармоничность колебаний нарушится незначительно.

Период колебаний математического маятника не зависит также от его массы, что может показаться непонятным при сравнении формул:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}} \quad (1)$$

и

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

Явление объясняется тем, что для математического маятника квазиупругая сила $F = ma_t = -\frac{mg}{l} x$, т. е. пропорциональна массе.

При подстановке в формулу 1 величины $k = \frac{mg}{l}$ получим формулу 2.

Зависимость периода колебаний маятника T от длины l нетрудно показать на опыте, взяв, например, маятники, отличающиеся по длине в 4, 9 и 16 раз.

Зависимость же периода T от ускорения свободного падения можно пояснить только косвенным образом, собрав установку, в которой железный шарик, подвешенный на нити, заставляют совершать колебания над полюсом магнита или электромагнита, имитирующего изменение силы тяжести и, следовательно, ускорения g .

Чем ближе шарик к магниту, тем больше сила притяжения и тем меньше период колебаний T .

Для закрепления материала программой предусмотрено проведение лабораторной работы: «Определение ускорения свободного падения при помощи маятника»¹.

В качестве дополнительных заданий в данную работу желательно включить проверку независимости периода колебаний маятника от амплитуды и массы.

Используя полученные в лабораторной работе понятия об определении ускорения свободного падения, желательно рассказать учащимся о гравиметрическом методе разведки полезных ископаемых, который широко применяют для обнаружения газовых и нефтяных месторождений и различных рудных тел. Один из способов обнаружения гравитационных аномалий — определение ускорения силы тяжести с помощью специальных маятников.

В этой связи полезно рассказать об истории открытия и изучения Курской магнитной аномалии (КМА).

В 1921 г. по указанию В. И. Ленина при Высшем совете народного хозяйства была организована Особая комиссия по проблемам Курской магнитной аномалии. Залегания руд предполагалось искать по аномалиям магнитного поля. Известный физик П. П. Лазарев для уточнения мест залегания «предложил одновременно с магнитной съемкой организовать и систематические измерения напряженности силы тяжести: он предполагал, что там обнаружится и аномалия силы тяжести. Это предположение было принято, и гипотеза Лазарева полностью подтвердилась. Так зародились первые в мире комплексные работы по разведке полезных ископаемых» [43, с. 103].

Для закрепления материала полезно решить задачи, поясняющие устройство и действие маятниковых часов [22, № 713—714].

9. Превращения энергии при гармонических колебаниях

Общее представление о превращениях энергии при гармонических колебаниях учащиеся получили при изучении предыдущего материала. Поэтому дальнейшая задача заключается в изучении соответствующих количественных соотношений.

Для этого предварительно, например, путем решения задач целесообразно повторить, как вычисляется потенциальная энергия сжатой пружины.

Задача 10 (з). Постройте график зависимости удлинения пружины от растягивающей ее силы. По графику определите работу, необходимую для растяжения пружины.

Ответ. Примерный вид графика показан на рисунке 21. Он наглядно показывает прямо пропорциональную зависимость удли-

¹ См.: Фронтальные лабораторные занятия по физике. Под ред. А. А. Покровского. Изд. 2-е. М., 1974.

нения пружины от приложенной силы. Работа силы в джоулях численно равна площади треугольника OAB . Поэтому

$$A = \frac{F}{2} x;$$

но так как $|F| = |F_y| = kx$, следовательно,

$$A = \frac{kx^2}{2} \text{ и } W_n = |A| = \frac{kx^2}{2},$$

где W_n — потенциальная энергия пружины.

После такой подготовки приступают к изучению энергетических превращений гармонических колебаний.

Для крайнего положения тела можно сразу записать:

$$W_n = \frac{kx_0^2}{2}, \text{ где } x_0 \text{ — амплитуда колебаний};$$

кинетическая энергия

$$W_k = 0.$$

Для среднего положения

$$W_k = \frac{mv_0^2}{2}; W_n = 0.$$

Согласно закону сохранения энергии

$$\frac{kx_0^2}{2} = \frac{mv_0^2}{2}.$$

В целях активизации познавательной деятельности учащихся дальнейшее углубление понятий и изучение материала можновести в процессе решения следующих задач.

Задача 11. Путем математических преобразований выражение полной энергии гармонических колебаний $\frac{kx_0^2}{2}$ приведите к виду $\frac{mv_0^2}{2}$.

Решение. Так как $v_0 = \omega x_0$, то можно записать:

$$\frac{mv_0^2}{2} = \frac{m\omega^2 x_0^2}{2}.$$

Но $m\omega^2 = k$, следовательно,

$$\frac{mv_0^2}{2} = \frac{kx_0^2}{2}.$$

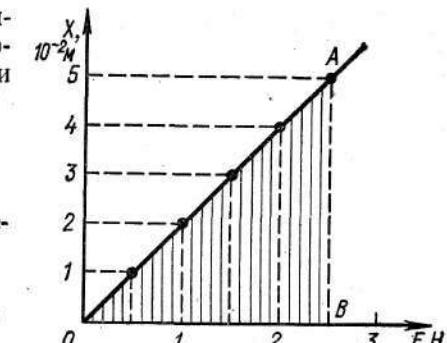


Рис. 21. График растяжения пружины.

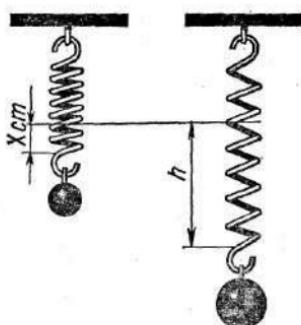


Рис. 22. Колебания груза.

Задача 12. Покажите, что для любого положения колеблющегося тела его полная энергия

$$W = \frac{kx_0^2}{2} = \frac{mv_0^2}{2}.$$

Решение. В любой точке согласно закону сохранения энергии выполняется равенство

$$W = W_n + W_k = \frac{kx^2}{2} + \frac{mv^2}{2}.$$

Так как

$$x = x_0 \cos \omega t \text{ и } v = x' = -x_0 \omega \sin \omega t,$$

можно записать:

$$W = \frac{kx_0^2 \cos^2 \omega t}{2} + \frac{m\omega^2 x_0^2 \sin^2 \omega t}{2}.$$

Известно, что $m\omega^2 = k$, поэтому

$$W = \frac{kx_0^2}{2} (\sin^2 \omega t + \cos^2 \omega t) = \frac{kx_0^2}{2}.$$

Аналогично, выразив величину k через $m\omega^2$, получим:

$$W = \frac{mv_0^2}{2}.$$

Задача 13 (э). На пружину подвесили груз и затем поддерживали его так, чтобы пружина не растягивалась. Опишите, как будет двигаться груз, если убрать поддерживающую его опору. Ответ проверьте на опыте.

Решение. Падающий груз растянет пружину на расстояние h , которое можно определить из соотношения

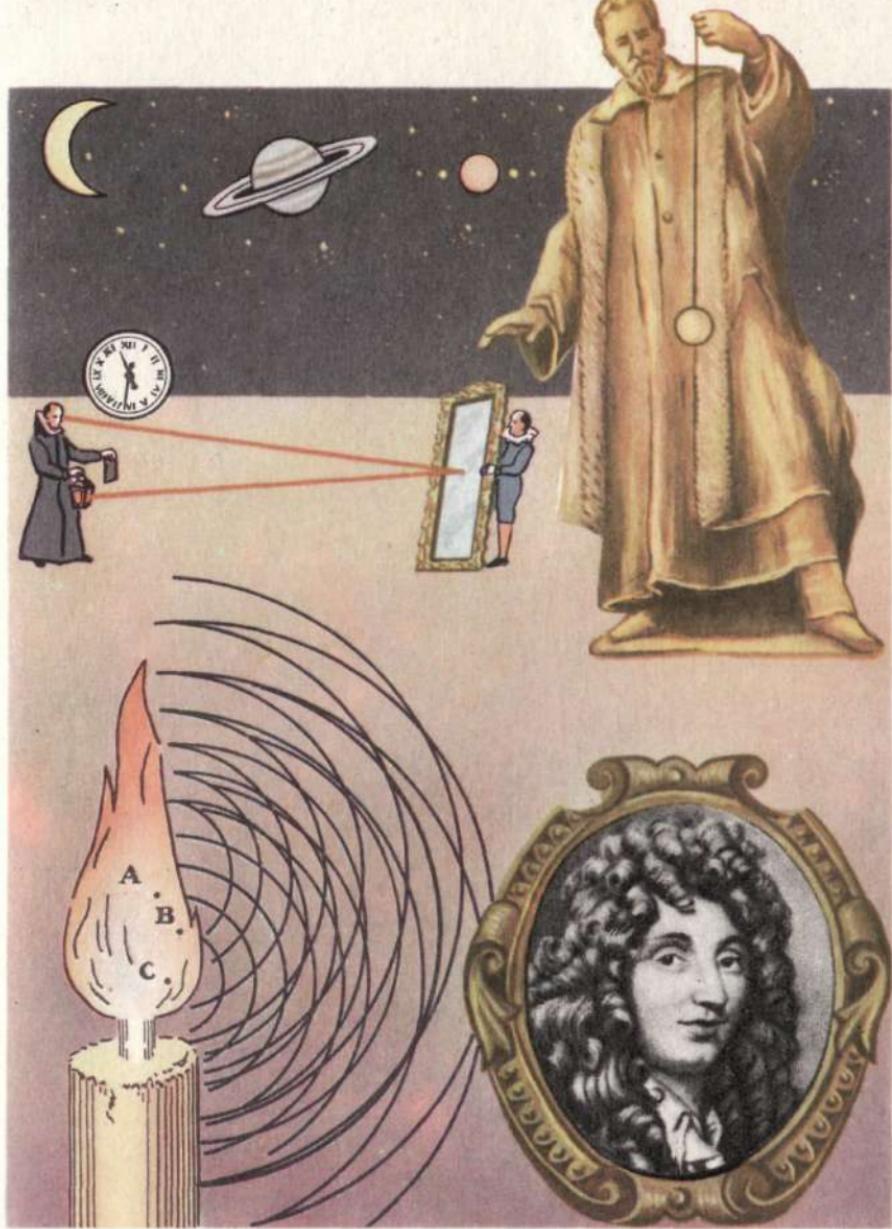
$$\frac{kh^2}{2} = mgh; \quad h = \frac{2mg}{k}.$$

По закону сохранения энергии при обратном движении вверх груз поднимется на высоту h . Если же груз подвесить на пружине, он растянет ее на длину x_{ct} (рис. 22). Так как $mg = kx_{ct}$, то $k = \frac{mg}{x_{ct}}$ и $h = 2x_{ct}$.

Следовательно, положение, в котором висит груз в состоянии покоя, служит центром, около которого совершаются колебания с амплитудой h .

10. Затухающие колебания

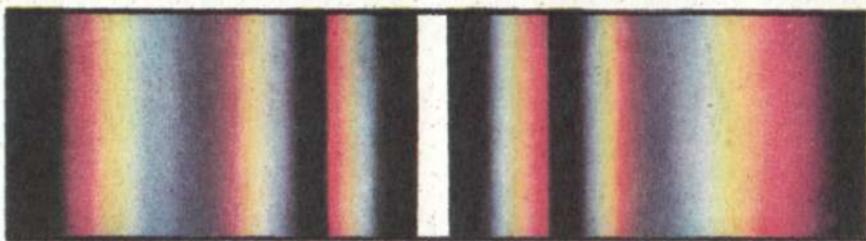
Уравнение $x = x_0 \cos \omega t$ предполагает существование колебаний неопределенно долгое время. Реальные же колебания через некоторое время прекращаются из-за действия сил внутреннего и внешнего трения.



Памятник Галилео Галилею.

Попытка определения скорости света по идее Галилея.

Христиан Гюйгенс — основатель представления о свете как распространяющемся движении в эфире.



Томас Юнг и Огюст Френель обосновали и утвердили волновую теорию света.

Для замкнутой колебательной системы справедливо уравнение $W + Q = \text{const}$, где W — механическая энергия свободных колебаний, а Q — внутренняя энергия.

Из-за несовершенства упругих свойств материала происходит постоянное превращение части механической энергии W во внутреннюю энергию тел Q .

Внутреннее трение и, следовательно, затухание колебаний для разных материалов различно. Для этого можно, например, сравнить затухание колебаний двух шариков, подвешенных на стальной и медной пружинах.

Помимо внутреннего трения, практически всегда существует и внешнее. Нередко оно может быть столь велико, что колебания быстро затухают или даже не возникают совсем.

Это нетрудно показать на опыте с маятником, шарик которого погружен в вязкую среду [9, рис. 8].

Полезно подчеркнуть, что силы внешнего трения могут быть обусловлены не только сопротивлением воздуха, воды и других тел, но и быть вызваны действием электромагнитных полей. В связи с этим можно повторить или сослаться на известный учащимся из курса физики IX класса опыт по торможению металлического маятника токами Фуко [17, т. II, рис. 251].

График затухающих колебаний нетрудно получить, используя маятник с воронкой, наполненной песком, демпфировав его листом бумаги. Наглядные графики затухающих колебаний получаются также на закопченной стеклянной пластинке с помощью камертоня с острием. Наконец, можно изготовить и использовать самодельный «камертон» больших размеров, позволяющий записывать затухающие колебания прямо мелом на доске (рис. 23).

Анализируя графики затухающих колебаний, обращают внимание на то, что данные движения не являются гармоническими колебаниями, так как амплитуда колебаний непостоянна и колебания не имеют «определенного периода». Если условно «периодом» назвать время между двумя последовательными прохождениями телом положения равновесия в одном направлении, то окажется, что эта величина также непостоянна, а увеличивается с течением времени. Правда, заметить это на глаз не удается, так как «период» увеличивается не столь резко, как уменьшается амплитуда.

Желательно, чтобы учащиеся могли записать и уравнение затухающих колебаний, используя второй закон Ньютона:

$$\Sigma \vec{F} = m \vec{a}.$$

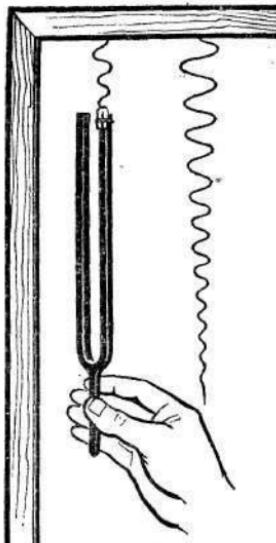


Рис. 23. Запись затухающих колебаний на классной доске.

Действующими на тело силами являются упругая сила \vec{F} и сила трения \vec{F}_{tr} . Пренебрегая силами внутреннего трения в системе, для малых колебаний можно положить, что силы трения о внешнюю среду пропорциональны скорости движения колеблющегося тела.

Следовательно, $\vec{F} + \vec{F}_{tr} = \vec{ma}$. В проекции на ось Ox (направление движения) можно записать:

$$-kx - rv = ma,$$

или

$$x'' + \frac{r}{m}x' + \frac{k}{m}x = 0,$$

откуда

$$a = -\frac{k}{m}x - \frac{r}{m}v.$$

Для свободных колебаний, подчиняющихся уравнению $a = -\frac{k}{m}x$, период

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

Решение же данного дифференциального уравнения дает следующее значение «периода» затухающих колебаний:

$$T_s = \frac{2\pi}{\sqrt{\frac{k}{m} + \frac{r^2}{4m^2}}}; \quad T_s > T.$$

Качественно это вполне понятно: трение тормозит движение, уменьшает его скорость и, следовательно, увеличивает период. При очень большом трении в вязкой среде движение вообще может стать апериодическим.

Из практических применений затухающих колебаний можно рассказать о демпфировании подвижных частей электроизмерительных приборов, аналитических весов, применении масляных амортизаторов в мотоциклах и автомашинках и др.

Полезно также решить следующую экспериментальную задачу.

Задача 14 (э). Изготовьте маятник и проверьте на опыте, как изменяется при увеличении затухания «период» его колебания. На что расходуется механическая энергия при затухающих колебаниях?

Решение. Для опыта можно использовать затухание колебаний маятника, имеющего кисточку, трущуюся о стол, затухание колебаний маятника (в том числе пружинного), опущенного частично или полностью в воду, и т. д.

В одном из опытов были получены следующие данные. Длина маятника $l = 90$ см, масса $m = 100$ г (гири из набора по механике). «Период» колебания маятника в воздухе $T_1 = 1,9$ с. «Период» колебания маятника, когда гиря находилась в воде, $T_2 = 2,3$ с.

11. Вынужденные колебания

Наряду со свободными затухающими колебаниями в природе и технике широко распространены и используются колебания, которые при определенных условиях являются незатухающими. Примерами таких колебаний могут служить качка корабля на волнах, вибрация корпуса троллейбуса при работающем двигателе, колебание мембранны громкоговорителя во время радиопередачи и т. д.

Нетрудно заметить, что в случае незатухающих колебаний на колеблющееся тело, помимо сил упругости и трения, всегда действует также некоторая периодически меняющаяся внешняя сила.

В приведенных примерах такими силами служат аэродинамическая сила ветра, биения неуравновешенного ротора, электромагнитные силы. С энергетической точки зрения действие внешней периодической силы при установившихся колебаниях заключается в том, что работа этой силы восполняет потери энергии, вызванные трением.

Допустим, на колеблющееся тело действуют упругие (или квазиупругие) силы ($\vec{F} = -k\vec{x}$), силы трения, пропорциональные скорости тела ($\vec{F}_{tr} = -r\vec{v}$) и внешняя периодическая сила, изменяющаяся по гармоническому закону ($\vec{F}' = \vec{F}_0 \cos \omega t$).

Действие первых двух сил вызывает затухающие колебания, которые прекращаются с течением времени. Следовательно, при установившемся режиме, когда потери энергии станут равными ее пополнению, тело будет совершать колебания, определяющиеся силой \vec{F}' .

Такие колебания, которые совершаются за счет работы внешней периодической силы, называют вынужденными.

Применение второго закона динамики ($\vec{F} = \vec{ma}$) к этому случаю дает уравнение

$$\vec{F} + \vec{F}_{tr} + \vec{F}' = \vec{ma}$$

(его могут записать сами учащиеся) или в проекции на ось Ox (направление движения): $-kx - rv + F_0 \cos \omega t = ma$.

В дифференциальной форме это уравнение имеет вид:

$$x'' + \frac{r}{m}x' + \frac{k}{m}x = \frac{F_0}{m} \cos \omega t.$$

Решение данного уравнения:

$$x = x_0 \cos(\omega t + \Phi_0).$$

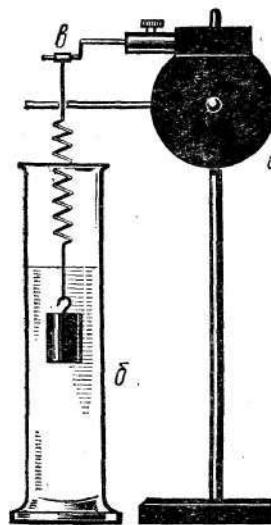


Рис. 24. Демонстрация вынужденных колебаний.
чего его лучше поместить в воду или в не очень вязкое масло.

Вначале работа внешней силы, пропорциональная амплитуде колебаний груза, будет превышать потери энергии на трение в системе, и груз будет раскачиваться все интенсивнее, приобретая кинетическую энергию.

Но с увеличением амплитуды и скорости колебаний потери энергии будут все время расти пропорционально и амплитуде, и силе трения. Сила же трения в том случае, когда она пропорциональна скорости, также растет пропорционально амплитуде, т. е. потери энергии растут пропорционально квадрату амплитуды, и потому наступит такой момент, когда работа внешней силы станет равной потерям энергии на трение. При установившемся режиме и синусоидальной внешней силе тело начнет совершать гармонические колебания с частотой вынуждающей силы.

На примере этого опыта также видно важнейшее отличие свободных колебаний от вынужденных: при свободных колебаниях система получает энергию только один раз, когда она выводится из положения равновесия, а при вынужденных колебаниях энергия пополняется все время за счет работы вынуждающей силы.

Амплитуда вынужденных колебаний пропорциональна амплитуде вынуждающей силы [12, т. I]. Качественно это можно пояснить на том же опыте (см. рис. 24), изменив размер кривошипа ϑ , к которому привязана пружина. Амплитуда зависит также от соотношения частоты собственных колебаний и частоты вынуждающей силы, что подробно рассматривается в следующей теме.

Следовательно, вынужденные колебания в данном случае являются гармоническими. Но фаза вынужденных колебаний не совпадает с фазой внешней силы.

Знание этого уравнения не обязательно. Оно может быть сообщено только в ознакомительном плане или на внеклассных занятиях. Но качественно основные сведения, вытекающие из этого уравнения, необходимо учащимся сообщить, опираясь на демонстрацию с прибором, показанным на рисунке 24 [6, § 12; 9, § 11].

Первоначально при вращении ручки центробежной машины движение груза b сложное. Установление же вынужденных колебаний требует такого времени, которое необходимо для затухания колебаний свободных. Для колебаний груза на пружине в воздухе это время составляет несколько минут. Опыт будет нагляднее при большем затухании колебаний груза, для

12. Резонанс

Решение дифференциального уравнения вынужденных колебаний дает следующее значение амплитуды:

$$x_0 = \frac{F_0}{m \sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4\beta^2\omega^2}},$$

откуда, приравняв нулю производную подкоренного выражения, можно найти, что максимум амплитуды (резонанс) наступает при $\omega_{\text{рез}} = \sqrt{\omega_0^2 - 2\beta^2}$, где β — показатель затухания, равный $\frac{r}{2m}$.

При малом сопротивлении среды значение r мало, затухание невелико и $\omega_{\text{рез}} \approx \omega_0$. Поэтому явлением резонанса и называют возрастание амплитуды вынужденных колебаний при условии, что частота вынуждающей силы близка к частоте собственных колебаний системы.

Часто на практике в первом приближении можно считать, что $\omega_{\text{рез}} = \omega_0$. Данное условие резонанса обычно и сообщают учащимся.

Анализ формулы для амплитуды вынужденных колебаний позволяет сделать ряд важных выводов. Учащимся эти выводы дают на основе качественных опытов (см. рис. 24).

1. При малом затухании колебаний, если $\omega \ll \omega_0$, амплитуда приближенно равна статическому смещению. Это нетрудно показать на опыте, очень медленно вращая ручку прибора. Груз будет медленно подниматься и опускаться при практически неизменном статическом растяжении пружины.

2. Если $\omega \gg \omega_0$, то амплитуда колебаний при очень больших частотах в соответствии с формулой $x_\infty = \frac{F_0}{m\omega^2}$ стремится к нулю. Качественно это можно объяснить инертностью колеблющегося тела, «не успевающего следовать за изменениями силы».

Во всех случаях (кроме резонанса), когда частота внешней силы ω отличается от собственной частоты колебаний системы ω_0 , внешняя сила бывает направлена то по направлению движения тела (работа силы положительна), то против него (работа отрицательна). Сила, как говорят, действует «не в тakt» колебаниям. Поэтому в целом работа силы незначительно пополняет механическую энергию системы.

При $\omega = \omega_0$ вынуждающая сила направлена по направлению скорости, и поэтому создаются наиболее благоприятные условия для пополнения энергии системы. При постоянной амплитуде внешней силы получается максимальная амплитуда колебаний. Сила трения в этом случае компенсируется внешней силой, и тело движется только под действием внутренних сил. Колебания поддерживаются с максимальной амплитудой при минимальных затратах энергии. Характер вынужденных колебаний в большой мере зависит также и от сил трения, что наглядно видно на графике (рис. 25).

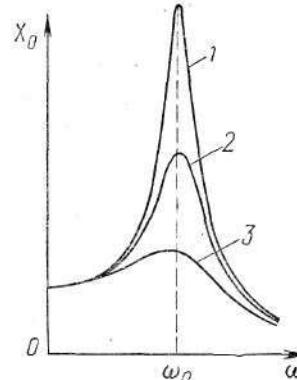


Рис. 25. Графики резонансных кривых при различном трении.

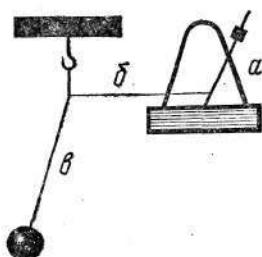


Рис. 26. Опыт по резонансу маятника с помощью метронома.

Явление резонанса тем выразительнее, чем меньше трение в системе (графики 1 и 2, рис. 25).

Явление резонанса следует продемонстрировать на опыте [17, т. I, опыт 63]. Выразительна также демонстрация, предложенная И. И. Казанцевым¹ (рис. 26). Основание маятника метронома a соединяют нитью b с нитью маятника b . Маятник качается с наибольшей амплитудой, когда его период совпадает с периодом колебаний метронома. После этого шарик маятника помещают в воду и наблюдают, как «острый» резонанс заменяется «тупым», слабо выраженным.

В рассмотренных ранее примерах резонанса на колеблющееся тело действовала сила, изменяющаяся по синусоидальному закону. Но резонанс может вызываться и негармоническими периодическими силами. Примером этого служит раскачивание качелей, которые подталкиваются отдельными толчками в такт колебаниям. Толчки при этом могут действовать на качели и не при каждом их размахе, а, например, через один или через несколько качаний. В этом случае период негармонической периодической силы может быть равен или превышать в целое число раз период собственных колебаний системы.

В ознакомительном плане или на внеклассных занятиях сведения о резонансе при действии негармонической периодической силы можно расширить, используя учебник Г. С. Ландсберга [6, § 16]. Там приводится теорема Фурье: «Всякое периодическое колебание периода T может быть представлено в виде суммы гармонических колебаний с периодами $T, T/2, T/3, T/4$ и т. д., т. е. с частотами $(1/T), 2n, 3n, 4n$ и т. д.» [6, с. 49].

Поэтому «периодическая негармоническая сила сильно раскачивает колебательную систему тогда, когда в резонанс с собственной частотой системы попадает какое-либо из гармонических колебаний, входящих в состав силы» [6, с. 50].

Это положение наглядно демонстрируется с помощью набора маятников, периоды которых отличаются в целое число раз. При толчках, следующих, например, с частотой $1/2$ Гц, раскачивается

не только маятник, имеющий такую же частоту, но и другие с частотами $1, \frac{3}{2}$ и 2 Гц.

Наконец, следует иметь в виду и при необходимости объяснить учащимся, что явление резонанса, т. е. резкое возрастание амплитуды колебаний, может возникнуть и без непосредственного воздействия внешней силы на колебательную систему, если периодически изменять какой-либо параметр системы, например ее массу, размеры и т. д. Такой резонанс называют параметрическим.

Впервые на механические колебания такого рода указал в 1859 г. Мельде.

Общая теория резонанса в системах с периодически меняющимися параметрами была разработана советским физиком Г. С. Гореликом.

Общеизвестным примером параметрических колебаний и параметрического резонанса служит раскачивание самим качающимся качелей (рис. 27). При раскачивании человек приседает в тот момент, когда качели отклоняются на наибольший угол, и выпрямляется, когда они проходят положение равновесия. При подъеме

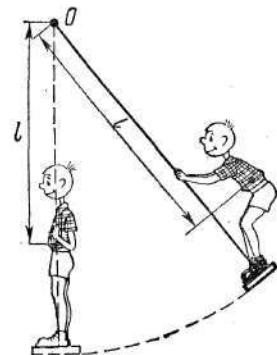


Рис. 27. Раскачивание качелей.

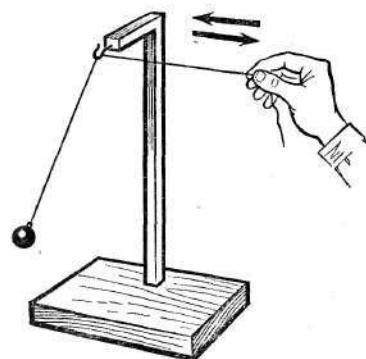


Рис. 28. Опыт с параметрическим раскачиванием маятника.

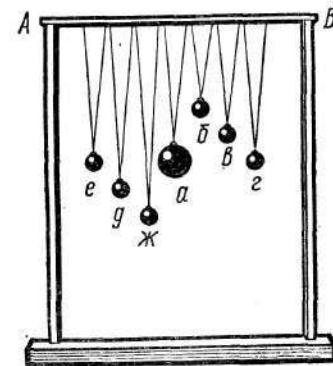


Рис. 30. Демонстрация резонанса с помощью маятников разной длины.

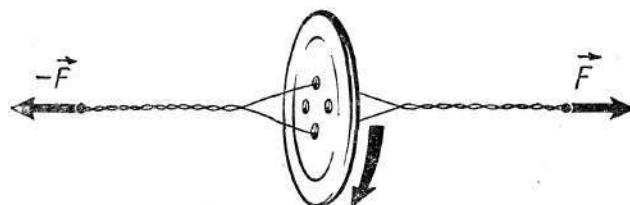


Рис. 29. Параметрические колебания диска.

¹ См.: Казанцев И. И. Демонстрация вынужденных колебаний с помощью метронома.— «Физика в школе», 1968, № 5.

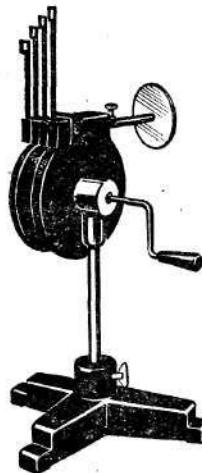


Рис. 31. Демонстрация резонансного тахометра.

тела в среднем положении затрачивается большая работа, чем при опускании в крайнем, так как в среднем положении натяжение веревок больше. В результате этого энергия колебательного движения увеличивается. При этом изменяется и один из параметров — длина качелей, которая увеличивается в крайнем и уменьшается в среднем положении. Этот процесс подобен тому, как если бы при качаниях стоящего на качелях человека длину веревок периодически уменьшали в среднем и увеличивали в крайнем положении. Эквивалентную схему параметрических колебаний качелей можно показать на опыте (рис. 28).

Примером параметрических колебаний служат также крутильные колебания пуговицы, которая быстро крутится, когда в такт ее врашению руками натягивают нити (рис. 29).

Для пояснения практического использования явления резонанса сначала в качестве вводного полезно показать известный опыт с резонансом маятников (рис. 30) [6, с. 42; см. также 17, т. I, опыт 64].

Вынуждающая сила создается маятником *a*, масса которого должна быть значительно больше массы всех остальных маятников, с тем чтобы передача им энергии не сказалась заметно на его колебаниях.

Наибольшую амплитуду колебаний будут иметь маятники *e* и *g*, имеющие тот же период колебаний, что и маятник *a*.

Этот опыт подготовит учащихся к пониманию действия язычкового частотомера или резонансного тахометра (рис. 31).

Необходимо также привести примеры вредных и полезных действий колебаний.

«Так, в 1750 г. близ города Анжера во Франции через мост длиной 102 м шел в ногу отряд солдат (487 человек). Мост был цепной. Частота шага как раз совпадала с частотой собственных колебаний моста. Размахи колебаний моста увеличились настолько, что цепи оборвались и мост с колонной солдат обрушился в реку, погибло 226 человек» [47, с. 165].

Опасные вибрации могут возникать у самолетов, например, у хвостового оперения при совпадении собственной частоты их колебаний с частотой толчков от двигателей, а также с частотой срыва вихрей, сбегающих с крыла и ударяющихся в органы управления.

Но явление резонанса может быть не только вредным, но и полезным. Так, например, в технике широко используют резонансные машины, предназначенные для испытания прочности материалов при многократных нагрузках.

13. Автоколебания

Термином «автоколебания», введенным в науку академиком А. А. Андроновым в 1928 г., называют самовозбуждающиеся незатухающие колебания в нелинейных автономных системах.

Рассмотренные ранее вынужденные колебания происходят под действием внешней периодической силы. Но оказывается, что незатухающие колебания могут возникать и без действия внешних сил, т. е. в замкнутых системах, которые обычно можно разделить на три основных элемента: собственно колебательную систему в узком смысле этого слова, источник энергии и регулирующее устройство, обеспечивающее соответствующее поступление энергии для компенсации ее неизбежных потерь при колебаниях (рис. 32).

Вынужденные колебания происходят под действием периодической силы, характер которой и определяет вид колебаний. Автоколебания же могут происходить при действии постоянной силы (силы тяжести, давления пара, воздуха и т. д.), и потому их характер определяется главным образом свойствами самой колебательной системы. При этом существенную роль играет значение потерь энергии.

При малых потерях энергии и, следовательно, незначительном воздействии на собственно колебательную систему ее колебания близки к собственным, например гармоническим (колебания маятника часов). При значительных потерях энергии автоколебания уже значительно отличаются от собственных.

Если потери энергии за «период» таковы, что колебания становятся апериодическими, то автоколебания резко отличаются от синусоидальных и носят специальное название релаксационных.

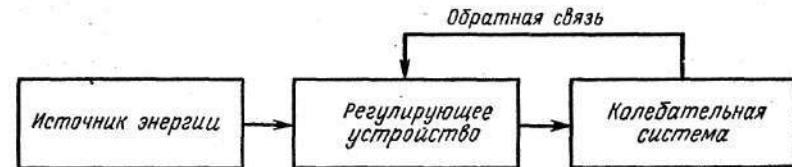


Рис. 32. Схема автоколебаний.

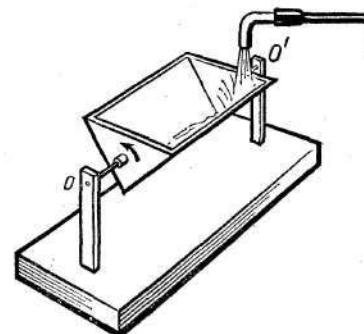


Рис. 33. Автоколебания конусообразного сосуда.

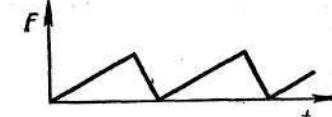


Рис. 34. График автоколебаний сосуда.

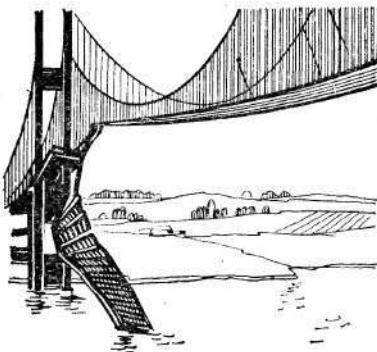


Рис. 35. Катастрофа Тахомского моста.

рассмотреть действие электромагнитного звонка или прерывателя высоковольтного индуктора (катушки Румкорфа, рис. 103).

Наглядные установки для демонстрации колебаний пружинного маятника, в том числе с применением фотореле, описаны в книге «Демонстрационный эксперимент по физике» [17, т. I].

Понятие о релаксационных колебаниях можно дать на примере следующей задачи.

Задача 15 (9). Объясните, почему и как совершает колебания сосуд, показанный на рисунке 33, если известно, что он опрокидывается, когда наполняется доверху водой. Начертите график зависимости силы, действующей на сосуд, от времени.

Решение. Центр тяжести пустого сосуда расположен ниже оси OO' , и сосуд находится в устойчивом положении. При наполнении сосуда водой его центр тяжести перемещается выше оси и сосуд опрокидывается.

При равномерном наполнении сосуда водой масса воды и, следовательно, сила тяжести, действующая на сосуд, пропорциональна времени. При опрокидывании сосуда сила резко уменьшается до нуля (рис. 34). Сосуд совершает релаксационные колебания [47, § 32].

Широко распространены фрикционные колебания. Этими колебаниями, в частности, объясняются различные скрипы дверей, визг тормозов и т. д. Наконец, заметим, что в различных частях машин и сооружений одновременно могут происходить механические колебания различных типов. Недостаточный их учет может привести к тяжелым последствиям. Примером этому служит разрушение в 1940 г. висячего моста современной конструкции длиной 1662 м через пролив Тахома в США (рис. 35), произшедшего из-за чрезмерных горизонтально-боковых и вертикальных колебаний (поперечных и крутильных).

Понятие об автоколебаниях в X классе вводится в основном на примере устройства и действия часов с тяжелым маятником и анкерным спуском.

Используя модель маятника в часах, находят собственно колебательную систему — маятник, источник энергии — поднятую гирю, создающую постоянную по модулю силу натяжения нити (цепочки), действующей в конечном итоге на маятник, регулирующее устройство — зубчатое колесо с анкером.

В качестве примера автоколебательной системы полезно также

Глава II

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ КОЛЕБАНИЯ

В данной теме рассматриваются свободные электромагнитные колебания и автоколебания в колебательных контурах, а также вынужденные колебания в электрических цепях под действием синусоидальной ЭДС. Все эти вопросы имеют большое значение для физического и политехнического образования учащихся. На их основе затем изучаются электромагнитные волны с их научными и практическими приложениями — вопросы передачи и использования электрической энергии, успехи и перспективы электрификации, радиофикации, автоматизации производственных процессов и т. д.

Для методики изучения электромагнитных колебаний особенно важны следующие положения:

использование аналогий механических и электромагнитных колебаний;

широкое применение физического эксперимента;

изучение и объяснение существа явлений на основе полученных в IX классе знаний об электрическом и магнитном полях и электромагнитной индукции.

1. Понятие об электромагнитном поле. Идеи Фарадея и Максвелла

Введение в физику понятия поля Эйштейн считал самым важным достижением со временем Ньютона.

В XVII—XIX вв. существовали два основных взорения на физическую картину мира — картезианское и ньютонианское. Приверженцами первой были последователи известного французского ученого Рене Декарта (Картезия) (1596—1650). Весь мир, по Декарту, заполнен материей, которая находится в вихревом движении. В этом мире отсутствует пустота. «Дайте мне материю и движение, и я построю мир» — таково боевое знамя картезианской физики [37, т. I, с. 146]. При этом движение материи понималось только как механическое перемещение тел. Это была теория механического материализма.

Следствием картезианской теории было отрицание действия на расстоянии, т. е. без посредства промежуточной среды.

Одним из сторонников теории «близкодействия» был Христиан Гюйгенс (1629—1695).

Ньютонианцами называли физиков, которые пытались объяснить все явления природы, используя, притом формально-математически, механику Ньютона. Они были дуалистами и считали, что в природе существует материя и пустота, разделяющая тела, которые взаимодействуют на расстоянии.

Именно в таком духе ньютонианцы трактовали, например, закон всемирного тяготения Ньютона: $F = \gamma \frac{m_1 m_2}{r^2}$.

Следует заметить, что сам Ньютон не разделял этой точки зрения.

«Теория» ньютонианцев, казалось бы, находила все новые подтверждения.

Шарль Огюст Кулон (1736—1806) установил закон взаимодействия постоянных магнитов: $F_m = k' \frac{m_1 m_2}{r^2}$, где m_1 и m_2 — так называемые магнитные массы, и закон взаимодействия электрических зарядов: $F_e = k \frac{q_1 q_2}{r^2}$, который лег в основу электростатики.

Эти законы были аналогичны закону всемирного тяготения.

Неожиданные затруднения возникли в связи с опытом Эрстеда, показавшим, что «сила, действующая между магнитным полюсом и элементом тока, направлена не по соединяющей их прямой, а по нормали к этой прямой, т. е. она, как тогда говорили, является «силой поворачивающей» [41, с. 249]. Ньютоновская же физика знала только центральные силы. Андре Мари Амперу (1775—1836), какказалось, удалось разрешить данное противоречие, сведя к центральным силам взаимодействие элементов токов $I_1 ds_1$ и $I_2 ds_2$. В современной векторной форме формула Ампера имеет вид:

$$d\vec{F} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I_1 I_2}{r_{12}^3} [\vec{ds}_1 \cdot [\vec{ds}_2 \vec{r}_{12}]],$$

где μ_0 — абсолютная магнитная проницаемость среды, а \vec{r}_{12} — вектор, направленный от отрезка ds_1 к отрезку ds_2 . Однако, как было показано позже, это не сняло проблемы «вращательных сил» и, более того, привело к новым трудностям. Из опытов Роуланда (1876) следовало, что электромагнитные силы зависят от скорости движения электрических зарядов. А это уже никак не укладывалось в рамки классической механики. Теперь на такую зависимость явно указывает и формула Ампера, так как, по современным представлениям, сила тока $I = jS = envS$.

Таким образом, старания физиков середины XIX в. вывести все законы электричества на основе законов Ньютона должны были неизбежно столкнуться с непреодолимыми трудностями. Нужен был принципиально иной подход и иные физические идеи. Эти

идеи и выдвинул М. Фарадей. Он писал: «Материя присутствует везде, и нет промежуточного пространства, не занятого ею»¹.

Отличие взглядов Фарадея, бывшего в свое время почти в одиночестве, от господствовавших в то время убеждений математиков образно характеризует Максвелл: «...Фарадей своим мысленным оком видел силовые линии, проходящие по всему пространству там, где математики видели центры сил, притягивающие на расстоянии. Фарадей видел промежуточную среду там, где они ничего не видели, кроме расстояния. Фарадей искал сущность явлений в том, что в действительности происходит в среде, другие удовлетворялись тем, что находили эту сущность в способности действия на расстояния, которой одарены электрические жидкости» [37, т. I, с. 455—456].

Максвелл понимал, что представления Фарадея о механических свойствах силовых линий поля, позволяющие плодотворно решать многие задачи электричества и магнетизма, отражают по принципу аналогии какие-то глубинные процессы и свойства открытой Фарадеем материальной среды.

Поэтому как метод своих исследований Максвелл и избрал физическую аналогию. «Под физической аналогией,— говорил Максвелл,— я разумею частное сходство между законами двух каких-либо областей науки, благодаря которому одна является иллюстрацией для другой» [37, т. II, с. 135]. Аналогом электрических взаимодействий он принял взаимодействия в движущейся жидкости.

Это позволило надеяться по аналогии с уже известными уравнениями гидродинамики (уравнения Эйлера и Лапласа) найти и уравнения электродинамики. Максвелл применял и другие механические аналогии, постоянно сверяя полученные с их помощью выводы с тем, что давал опыт.

Примером строго объективного подхода Максвелла к фактам может служить, например, и его определение электрического тока. Во времена Максвелла не было еще строгого доказательства того, что электрический ток — это движение электрических зарядов, поэтому Максвелл исходил из опытного факта: «Ток — это то, что создает магнитное поле» [37, т. II, с. 144]. При этом, опираясь на идеи Фарадея, Максвелл впервые ввел понятие поля как носителя электромагнитной энергии, которая обнаруживается на опыте.

В современной интегральной форме уравнения Максвелла имеют следующий вид, поражающий своей «симметрией» и внутренней гармонией:

$$\oint H_t dl = \int_s j_n dS + \frac{\partial}{\partial t} \int_s D_n dS; \quad (1)$$

$$\oint E_t dl = - \frac{\partial}{\partial t} \int_s B_n dS; \quad (2)$$

¹ Фарадей М. Экспериментальные исследования по электричеству, т. II. М., 1951, с. 400—401.

$$\oint_S D_n dS = q; \quad (3)$$

$$\oint_S B_n dS = 0. \quad (4)$$

В связи с тем что в средней школе не вводят понятия напряженности магнитного поля \vec{H} и вектора электрической индукции \vec{D} , в дальнейшем при анализе уравнений Максвелла будем пользоваться их записью с использованием магнитной индукции \vec{B} и напряженности электрического поля \vec{E} , имея в виду, что

$$\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu_0}, \quad \vec{D} = \epsilon_0 \vec{E} \text{ и } \epsilon_0 \mu_0 = \frac{1}{c^2}.$$

В той или иной мере, в основном качественно, учащиеся знакомятся с каждым из уравнений Максвелла.

Первое уравнение Максвелла показывает, что и как создает вихревое магнитное поле. Можно видеть, что $\oint_S j_n dS$ — это ток проводимости I . Следовательно, во-первых, вихревое магнитное поле создается токами проводимости, что хорошо известно учащимся из опыта Эрстеда.

Для магнитных полей, созданных токами проводимости, первое уравнение принимает вид: $\oint B_l dl = \mu_0 I$. Справедливость этого уравнения нетрудно пояснить на примере бесконечного прямолинейного проводника с током, для которого линии магнитной индукции представляют собой концентрические окружности:

$$B = \mu_0 \frac{l}{2\pi R}; \quad dl = R d\alpha;$$

$$\oint B_l dl = \frac{\mu_0 l}{2\pi} \int_0^{2\pi} R d\alpha = \mu_0 l.$$

В том случае, когда нет токов проводимости, можно записать

$$\oint B_l dl = \frac{\mu_0}{c^2} \frac{\partial}{\partial t} \int E_n dS.$$

Эта зависимость и является наиболее важной в теории Максвелла и новой для учащихся X класса. Она утверждает, что вихревое магнитное поле создается также изменяющимся электрическим полем.

Поскольку, по Максвеллу, понятие магнитного поля неотделимо от понятия тока, следовало и в этом случае предположить, что магнитное поле создано особого рода электрическим током, названным током смещения.

Второе уравнение обобщает закон электромагнитной индукции (Фарадея — Ленца — Неймана), известный учащимся в виде

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

В самом деле,

$$-\frac{\partial}{\partial t} \int B_n dS = -\frac{\partial \Phi}{\partial t}, \text{ а } \oint E_i dl = \mathcal{E}_i.$$

Таким образом, вихревое электрическое поле создается изменяющимся магнитным полем, и циркуляция вектора напряженности E_i стороннего поля равна ЭДС сторонних источников. Это наглядно видно на примере электрической цепи с гальваническим элементом, для которой $E_i dl$ — элементарная работа сторонних сил на участке dl по перемещению единичного положительного заряда, а $\oint E_i dl$ — работа по его перемещению по всей замкнутой цепи.

Третье уравнение говорит об известном учащимся факте, что электрическое поле образуется также электрическими зарядами. Но это (электростатическое) поле не вихревое. Его силовые линии начинаются и кончаются на зарядах.

На основе четвертого уравнения можно заключить, что свободных магнитных зарядов нет, а линии магнитной индукции замкнуты.

Теория Максвелла опередила свое время и не была понята и принята его современниками. Помимо формы, методов изложения и сложности теории многим казались сомнительными и ее основные выводы, не подтвержденные еще на опыте: предсказание существования токов смещения, электромагнитных волн, электромагнитной природы света, светового давления и др.

Одними из первых теорию Максвелла приняли и поддержали своими исследованиями русские физики Н. Н. Шиллер (1848—1910), П. А. Зилов (1850—1921), А. Г. Столетов (1839—1896), Н. А. Умов (1846—1915). Работы Зилова и Шиллера были известны Максвеллу [37, т. II, с. 185]. Значительный вклад в утверждение этой теории внесли и работы П. Н. Лебедева (1866—1912) с короткими волнами и особенно экспериментальное открытие и изменение им светового давления.

Физикам открылась бездонная глубина фундаментальных идей теории Максвелла.

Генрих Герц писал: «Трудно избавиться от чувства, что эти математические формулы живут независимой жизнью и обладают своим собственным интеллектом, что они мудрее, чем мы сами, мудрее даже, чем их первооткрыватели, и что мы извлекаем из них больше, чем заложено в них первоначально» [39, с. 119].

А в «Феймановских лекциях по физике» дана такая оценка: «В истории человечества (если смотреть на нее, скажем, через десять тысяч лет) самым значительным событием XIX столетия, несомненно, будет открытие Максвеллом законов электродинамики. На фоне этого важного научного открытия гражданская война в Америке в том же десятилетии будет выглядеть мелким провинциальным происшествием» [13, т. 5, с. 27].

Оставив на совести автора прием сравнения «разнородных величин», следует признать, что в отношении значения работ Максвелла

для физики XIX в. преувеличения нет. Являясь гениальным обобщением опыта, они служат для электричества и магнетизма таким же краеугольным камнем, как законы Ньютона для механики.

2. Колебательный контур

В 1826 г. Савари обнаружил, что при намагничивании стальной спицы внутри катушки при разряде через нее лейденской банки не удается заранее предсказать, какой конец спицы будет северным, а какой — южным. В 1842 г. Генри и в 1847 г. Гельмгольц пришли к выводу, «что разряд лейденской банки состоит не из одного перехода электричества с одной обкладки на другую, а из целой серии быстро затухающих электрических колебаний» [41, с. 267]. Это явление с 1858 по 1862 г. вновь было подвергнуто внимательному анализу Вильгельмом Федерсеном (1832—1918). Он заметил, что если две обкладки конденсатора соединены небольшим сопротивлением, то разряд носит колебательный характер. Рассматривая искру в быстро вращающемся зеркале, он обнаружил прерывистый характер ее свечения (рис. 36).

Опыт позволял определить период колебаний в искре, который оказался пропорциональным корню квадратному из емкости конденсатора. А в 1855 г. Томсон теоретически нашел формулу $T = 2\pi \sqrt{LC}$, которая носит теперь его имя.

Для демонстрации электромагнитных колебаний собирают установку по схеме, показанной на рисунке 37. Периоды колебаний стрелки и контура должны быть одного порядка. Широко распространенной ошибкой является показ опыта без соответствующего подбора значений L и C . Этот опыт всегда «получается», поскольку стрелка гальванометра действительно приходит в колебание от первого импульса тока в контуре, но совершает колебания с собственной частотой, не успевая вследствие своей значительной инертности следовать за колебаниями в контуре, которые, как правило, имеют несравненно большую частоту.

Используя батарею конденсаторов Главучтехпрома емкостью $C = 60 \text{ мкФ}$ для получения колебаний с периодом $T \approx 0,5 \text{ с}$, как следует из формулы Томсона, нужно взять катушку с индуктивностью $L \approx 100 \text{ Г}$. При $T = 0,2 \text{ с}$ $L \approx 16 \text{ Г}$.

В первом случае можно использовать вторичную обмотку высоковольтного индуктора ИВ-100 ($L \approx 700 \text{ Г}$), а во втором — две дроссельные катушки большой индуктивности, соединенные последовательно и надетые на замкнутый железный сердечник от универсального трансформатора. Гальванометр в этом случае присоединяют к клеммам однослоиной

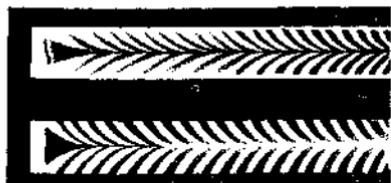
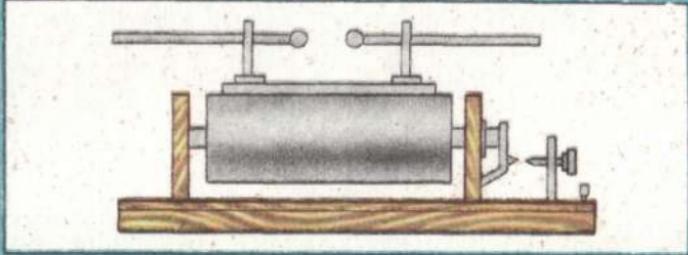
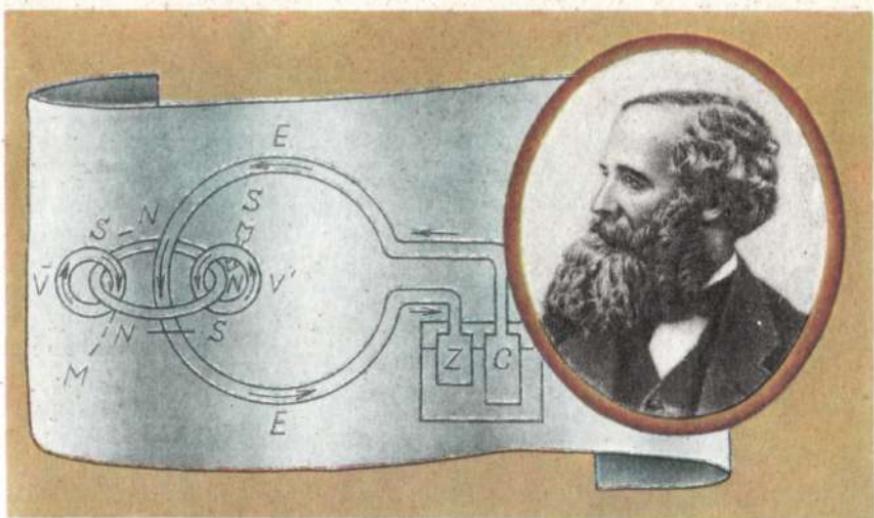


Рис. 36. Фотография искр во вращающемся зеркале.



Джеймс Клерк Максвелл предсказал существование электромагнитных волн.

Генрих Рудольф Герц получил электромагнитные волны и исследовал их свойства.

Александр Степанович Попов открыл радио [поставив электромагнитные волны на службу человечества].



Радио и телевидение на Земле и в космосе — важнейшая часть научно-технического прогресса.

Большая антенна, предназначенная для приема телевизионных изображений с борта метеоспутников; эти метеосводки с орбиты помогают более точно прогнозировать погоду.

обмотки, навитой сверху дроссельной катушки.

При этом лучше использовать гальванометр от демонстрационного амперметра с внутренним сопротивлением 385 Ом. Это сопротивление ближе к сопротивлению «генератора», т. е. к сопротивлению обмотки, где создается переменная ЭДС, и потому гальванометр будет отбирать от нее наибольшую мощность¹.

Напряжение анодной батареи или кенотранса ($U \approx 100$ В) подбирают так, чтобы при первом импульсе тока стрелка гальванометра отклонялась на всю шкалу, не ударяясь об упоры.

Изменяя индуктивность L (используют сначала две, а затем одну катушку) и емкость конденсатора C , показывают качественно зависимость от этих величин периода электромагнитных колебаний T .

Наглядным вариантом опыта может также служить следующий.

Стрелку прибора с помощью корректора переводят, например, на правый край шкалы и подбирают период контура таким, чтобы он был в несколько раз меньше периода собственных колебаний стрелки. При первом импульсе тока стрелка отклоняется влево на всю шкалу, а затем под действием пружин начинает возвращаться вправо. Однако под действием электромагнитных колебаний где-то посередине шкалы она снова отклоняется влево и так несколько раз.

Достоинство этого варианта опыта заключается в том, что здесь собственные механические колебания наглядно «отделяются» от электромагнитных.

Теорию колебаний целесообразно рассмотреть сначала для более простого случая «идеального» контура, в котором активным сопротивлением и, следовательно, потерями энергии на джоулево тепло можно в первом приближении пренебречь. Колебания рассматривают в основном с энергетической точки зрения, используя аналогию с колебаниями маятника, лучше пружинного.

В пружинном маятнике «наглядным» носителем потенциальной энергии служит деформированная пружина, а носителем кинетической энергии — колеблющееся тело. Аналогами соответственно являются заряженный конденсатор и катушка с током.

При замыкании конденсатора на катушку индуктивности L (рис. 37) в последней возникает электрический ток и, следовательно, магнитное поле. Согласно закону сохранения энергии энергия конденсатора убывает, а энергия магнитного поля на столько же увеличивается. В тот момент, когда энергия конденсатора становится

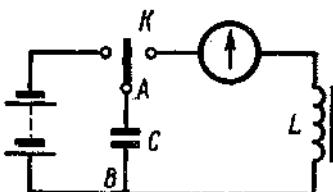


Рис. 37. Схема для демонстрации электромагнитных колебаний в контуре.

¹ Как известно, во внешней цепи потребляется наибольшая мощность при равенстве ее сопротивления внутреннему сопротивлению генератора.

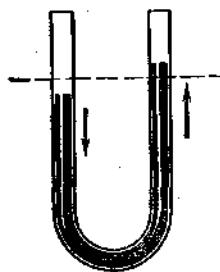


Рис. 38. Колебания воды в сообщающихся сосудах.

равной нулю, энергия магнитного поля, очевидно, достигает максимума и выражается формулой $W_m = \frac{LI^2}{2}$.

Механической аналогией служит полное превращение потенциальной энергии пружины в кинетическую энергию колеблющегося тела: $W_k = \frac{mv^2}{2}$. Из сопоставления данных формул следует, что аналогом индуктивности L является масса m , а аналогом силы тока I — скорость тела v .

Но так как $v = x'$, а $I = q'$, то для колебательного процесса в контуре аналогом смещения x служит величина заряда q .

В таком случае из трех известных учащимся формул энергии заряженного конденсатора:

$$\Pi = \frac{qU^2}{2}, \quad \Pi = \frac{CU^2}{2}, \quad \Pi = \frac{q^2}{2C}$$

аналогом формулы $\frac{kx^2}{2}$ является последняя, а не вторая формула, как можно было бы предположить по ее виду. Поэтому и аналогом коэффициента k служит величина, обратная электроемкости, т. е. $\frac{1}{C}$.

Из энергетических соображений далее следует, что конденсатор должен перезарядиться и процесс будет повторяться: в контуре возникнут электромагнитные колебания.

Если позволяет время, полезно более обстоятельно рассмотреть колебания и с электродинамической точки зрения.

Под действием электростатических сил поля конденсатора электроны приходят в упорядоченное ускоренное движение, которое будет таковым до тех пор, пока не разрядится конденсатор. В этот момент скорость электронов станет максимальной, хотя на них уже не будут действовать электростатические силы. Окажется максимальным и ток $I = JS = e\eta vS$. При дальнейшем движении электронов начинается перезарядка конденсатора. Электростатические силы тормозят движение электронов, и ток уменьшается, что в свою очередь приводит к уменьшению магнитного поля.

По закону Ленца в проводнике возникает ЭДС самоиндукции, которая препятствует уменьшению тока. Ток будет течь еще некоторое время в прежнем направлении, что и приведет к перезарядке конденсатора. Далее процесс пойдет аналогичным образом с той разницей, что направление тока изменится на противоположное.

Сопоставляя колебания электронов и груза на пружине, следует предостеречь учащихся от буквального понимания электромагнитных колебаний в том смысле, что те электроны, которые

были на одной обкладке конденсатора, перейдут через время $t = \frac{T}{2}$ на другую обкладку, подобно тому как маятник переходит из крайнего левого в крайнее правое положение. Согласно формуле $j = -env$ скорость электронов v составляет доли сантиметра в секунду. И они только колеблются около некоторых положений равновесия с весьма небольшой амплитудой. Более верной в этом смысле является аналогия с колебанием воды в сообщающихся сосудах (рис. 38), где каждая частица совершает колебания около некоторого положения равновесия.

3. Уравнение свободных электромагнитных колебаний

Следуя принятой методике рассмотрения прежде всего энергетических превращений в контуре, уравнение свободных электромагнитных колебаний можно вывести, как это сделано в учебнике «Физика-10», исходя из закона сохранения энергии.

В любой момент времени, если пренебречь потерями, полная энергия контура

$$E = \frac{Li^2}{2} + \frac{q^2}{2C} = \text{const.}$$

Следовательно,

$$E' = Li' + \frac{q}{C} = 0,$$

или

$$q'' = -\frac{1}{LC} q.$$

По аналогии с уравнением для механических гармонических колебаний следует заключить, что заряд на обкладках конденсатора изменяется со временем по закону косинуса или синуса

$$q = q_0 \cos \omega t.$$

Вывод уравнения электромагнитных колебаний в контуре возможен и на основе электродинамических соотношений.

В колебательном контуре при $R \approx 0$ ЭДС самоиндукции $\mathcal{E} = -Li'$ всегда равна и противоположна по знаку напряжению на конденсаторе $U_C = \frac{q}{C}$, что качественно уже было рассмотрено выше. Значение ЭДС в цепи берут со знаком «+», когда направление соответствующей ей напряженности \vec{E} совпадает с направлением движения положительных зарядов (током), и со знаком «-», когда направление \vec{E} противоположно ему. В указанном смысле ради краткости обычно говорят: ЭДС «направлена» по току или \mathcal{E}/C «направлена» против тока, хотя и ЭДС, и ток — скалярные величины.

Рассмотрим для определенности процесс разрядки конденсатора; ЭДС самоиндукции в этом случае направлена против тока.

Поэтому можно записать:

$$-Li' = \frac{q}{C}, \text{ или } q'' = -\frac{1}{LC}q. \quad (1)$$

С математической точки зрения уравнение 1 отличается от уравнения для гармонических колебаний

$$mx'' = -kx \quad (2)$$

только обозначением переменных и постоянных величин.

Для обобщения и закрепления материала величины-аналоги полезно занести в следующую таблицу:

Механические величины	Электромагнитные величины
Масса m	Индуктивность L
Жесткость пружины k	Обратная величина емкости $\frac{1}{C}$
Координата $x = x_0 \cos \omega t$	Заряд $q = q_0 \cos \omega t$
Скорость $v = v_0 \cos (\omega t + \frac{\pi}{2})$	Сила тока $i = I_0 \cos (\omega t + \frac{\pi}{2})$
Ускорение $a = a_0 \cos (\omega t + \pi)$	Скорость изменения силы тока i'
Кинетическая энергия $\frac{mv^2}{2}$	Энергия магнитного поля $\frac{LI_0^2}{2}$
Потенциальная энергия $\frac{kx^2}{2}$	Энергия электрического поля $\frac{q^2}{2C}$

Следует также отметить, что ЭДС самоиндукции

$$\mathcal{E} = Li' = \mathcal{E}_0 \cos(\omega t + \pi).$$

Для уяснения фазовых соотношений величин q , I и \mathcal{E} полезно еще раз с помощью формул проанализировать происходящие в контуре процессы.

1. В момент начала разрядки конденсатора (при $t = 0$)

$$q = q_0 \cos \omega t = q; \quad I = I_0 \cos \frac{\pi}{2} = 0; \quad \mathcal{E} = \mathcal{E}_0 \cos \pi = -\mathcal{E}_0.$$

2. Через четверть периода

$$q = q_0 \cos \frac{\pi}{2} = 0; \quad I = I_0 \cos \pi = -I_0; \quad \mathcal{E} = \mathcal{E}_0 \cos \frac{3}{2}\pi = 0.$$

3. Через половину периода

$$q = q_0 \cos \pi = -q; \quad I = I_0 \cos \frac{3}{2}\pi = 0; \quad \mathcal{E} = \mathcal{E}_0 \cos 2\pi = \mathcal{E}_0.$$

Итак, в начале разрядки конденсатора ток мал, а изменение его велико. Велика и ЭДС самоиндукции. Через четверть периода ток достигает наибольшего значения, а ЭДС самоиндукции равна

нулю. Через полпериода конденсатор перезаряжается ($q_1 = -q_2$), ток падает до нуля, а ЭДС самоиндукции достигает максимума по абсолютной величине, но имеет противоположный знак.

Указанные фазовые зависимости следует также пояснить с помощью графиков, подобных показанным на рисунке 15.

В заключение темы по аналогии выводят формулу Томсона. Для механических упругих колебаний $T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}}$. Аналог m — L , а аналог k — $\frac{1}{C}$. Поэтому $T = 2\pi \sqrt{LC}$.

Для закрепления материала и подготовки к изучению следующих тем полезно решить задачи [22, № 736—740].

4. Вынужденные электромагнитные колебания. Переменный ток

Логическим переходом к новой теме служит обсуждение вопроса о неизбежных потерях энергии свободных колебаний в контуре и их быстром затухании. По аналогии с механическими колебаниями нетрудно заключить, что для получения пезатухающих электромагнитных колебаний необходимо компенсировать потери энергии в контуре. Это можно сделать, пополняя энергию периодически, лучше всего в резонансном режиме.

В промышленных цепях применяют синусоидальную ЭДС и, следовательно, синусоидальный переменный ток. Синусоидальный переменный ток имеет ряд преимуществ перед другими видами переменных токов, главное из которых заключается в возможности получения с его помощью постоянного по модулю вращающегося магнитного поля (синусоидальный характер тока осветительной сети нетрудно показать с помощью электронного осциллографа).

После этого, рассматривая вращение рамки в магнитном поле (рис. 39), поясняют принцип получения синусоидального тока. Пронизывающий рамку поток магнитной индукции

$$\Phi = BS \cos \alpha = BS \cos \omega t \text{ и } \mathcal{E}_i = -\frac{d\Phi}{dt}.$$

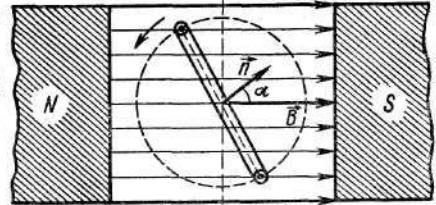


Рис. 39. Схема получения переменного тока во вращающейся рамке.

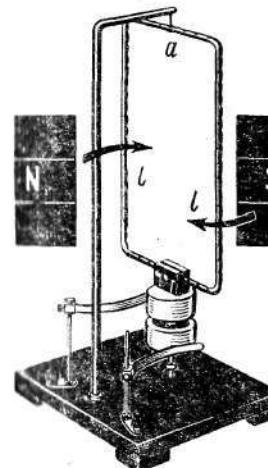


Рис. 40. Вращение рамки в магнитном поле.

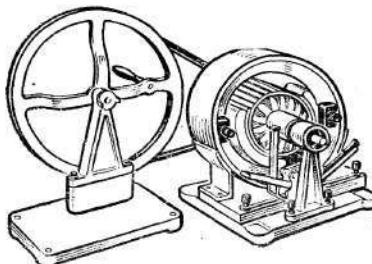


Рис. 41. Электрическая машина Главучтехпрома.

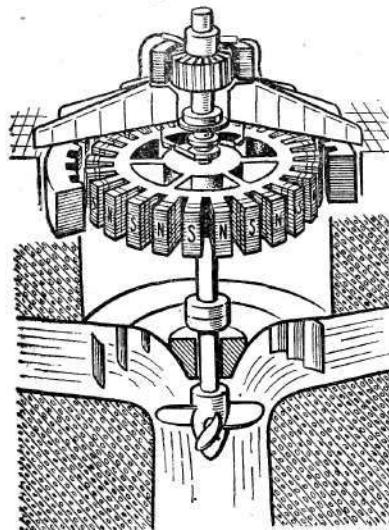


Рис. 42. Схема гидрогенератора.

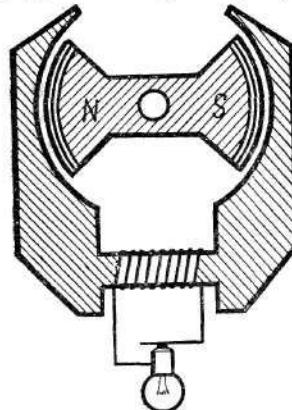


Рис. 43. Генератор карманного фонарика «жучок».

Следовательно,

$$\mathcal{E}_i = -BS \cos(\omega t + \frac{\pi}{2}) = \\ = \Phi_0 \omega \sin \omega t = \mathcal{E}_0 \sin \omega t.$$

Под действием синусоидальной ЭДС ток в цепи также изменяется по синусоидальному закону, но в общем случае отличается от ЭДС по фазе $i = I_0 \sin(\omega t + \varphi)$. Получение переменного тока следует также пояснить на опыте с помощью рамки, вращающейся в поле постоянных магнитов (рис. 40). Переменный ток в рамке обнаруживаются с помощью демонстрационного магнитоэлектрического вольтметра. Нужно также обратить внимание на следующее:

$$\mathcal{E}_i = \Phi_0 \omega \sin \omega t = SB\omega \sin \omega t = \\ = laB\omega \sin \omega t,$$

где l и a — высота и ширина рамки (рис. 40). Очевидно, что $S = la = 2l \cdot \frac{a}{2}$, но $\frac{a}{2}$ это радиус окружности. Поэтому

$$\mathcal{E}_i = 2lB \frac{a}{2} \omega \sin \omega t = 2lvB \sin \omega t,$$

где v — линейная скорость движения по окружности активного проводника l , пересекающего линии индукции B . Следовательно, ЭДС индукции \mathcal{E}_i будет тем больше, чем длиннее обмотка ротора и чем быстрее он вращается.

Как следует из принципиальной схемы (рис. 40), генератор переменного тока должен иметь следующие основные части: магнитную систему, создающую магнитное поле (индуктор машины); вращающуюся часть машины, содержащую витки, в которых индуцируется ЭДС (ротор); контактные кольца и щетки для подачи тока во внешнюю цепь.

Действующей моделью такого генератора служит учебная магнитоэлектрическая машина с ручным приводом и более совершенная модель электрической машины Главучтехпрома (рис. 41).

После этого с помощью схемы, например гидрогенератора (рис. 42), учащимся сообщают, что в генераторах значительной мощности обмотка располагается в пазах неподвижной части машины-статора, который представляет собой полый цилиндр, изготовленный из специальной стали, а вращающейся частью (ротором) является электромагнит. Примером простейшего генератора такого типа служит генератор карманного фонарика «жучок» (рис. 43). Полезно также показать магнето трактора. Двухполюсные роторы имеют обычно генераторы тепловых электростанций, поскольку они приводятся в движение быстроходными паровыми турбинами. Сравнительно тихоходные гидротурбины приводят в движение генераторы с большим числом пар полюсов (см. рис. 42). Так, например, генераторы Братской ГЭС им. 50-летия Великого Октября имеют 24 пары полюсов, а Волжские ГЭС им. В. И. Ленина и им. XXII съезда КПСС — 44 пары полюсов. Это позволяет при меньшей скорости вращения получать ЭДС заданной промышленной частоты 50 Гц.

5. Действия переменного тока. Действующие значения силы тока и напряжения

Как было показано выше, мгновенные значения напряжения и силы тока в промышленных цепях являются переменными синусоидальными величинами: $U = U_0 \sin \omega t$; $i = I_0 \sin(\omega t + \varphi)$.

Дальнейшая задача заключается в том, чтобы выяснить, как и с помощью каких величин можно характеризовать различные действия электрического переменного тока.

В ряде случаев эти действия определяются мгновенными значениями напряжения (пробой диэлектриков, зажигание дуги и неоновых ламп, образование короны). В других случаях важно знать среднюю за полпериода силу переменного тока ($I_{cp} = 0,637I_0$).

Среднее значение тока и напряжения применяется при анализе работы электрических приборов и машин, особенно когда форма кривых отличается от синусоиды. Среднее за полпериода значение силы тока определяет некоторые химические действия тока и действия выпрямленного нефильтрованного тока.

Однако в технике переменных токов чаще всего приходится иметь дело с тепловыми и механическими действиями тока. Тепловое же и во многих случаях механическое действие тока пропорционально среднему за период значению квадрата силы тока.

Среднее квадратичное значение силы тока называют действующим значением.

Для синусоидального тока

$$\bar{I}^2 = \frac{1}{T} \int_0^T i^2 dt = \frac{1}{\omega T} \int_0^{2\pi} I_0^2 \sin^2 \omega t \cdot (d\omega t) = \frac{I_0^2}{2}.$$

Следовательно, $I = \frac{I_0}{\sqrt{2}} \approx 0,707I_0$. Пропорциональными среднему квадратичному значению силы тока являются силы взаимодействия двух проводников, обтекаемых одним и тем же током; до известных пределов сила взаимодействия тока с железным якорем.

На этой основе действуют электродинамические и электромагнитные приборы, которые градируют в действующих значениях силы тока или напряжения.

Для формирования у учащихся понятий о свойствах переменного тока и характеризующих его величинах крайне желательно вначале рассмотреть различные действия переменного тока в сравнении с действиями тока постоянного (рис. 44, А, Б, В, Г), как это рекомендовал Е. Н. Горячkin [20, с. 454—455]. Кроме того, необходимо сравнить электромагнитные действия токов (рис. 44, Д). Можно привести и другие примеры, сравнив, например, горение электрической дуги, питаемой постоянным и переменным током (рис. 44, Е).

Отличия тепловых действий постоянного и переменного тока во многих случаях не существенны (рис. 44, А). На этом основании говорят об эквивалентности переменного и постоянного тока и вводят понятие действующего значения силы переменного тока, которое по определению равно значению силы такого постоянного тока, который в течение одинакового времени выделяет в цепи такое же количество теплоты, что и переменный ток.

Используя это определение, установим зависимость между действующим и амплитудным значениями силы переменного тока.

Для этого найдем выражения для равных количеств теплоты, выделяемых переменным и постоянным током за одинаковое время, равное, например, периоду переменного тока T .

Для постоянного тока $Q = I^2 RT$. Сила тока I как раз и равна действующему значению переменного тока, выделяющего за время T такое же количество теплоты Q . Для переменного тока, поскольку сила тока $i = I_0 \sin \omega t$ — величина переменная, джоулево тепло по аналогичной формуле можно найти только для бесконечно малого промежутка времени dt : $dQ = i^2 R dt$. Для промежутка времени, равного периоду T ,

$$Q = \int_0^T i^2 R dt,$$

$$i^2 = I_0^2 \sin^2 \omega t = \frac{I_0^2}{2} (1 - \cos 2\omega t).$$

Поэтому

$$Q = \frac{I_0^2 R}{2} \int_0^T (1 - \cos 2\omega t) dt = \frac{I_0^2 R}{2} T.$$

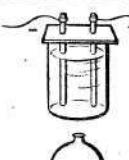
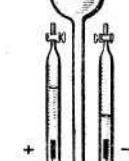
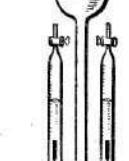
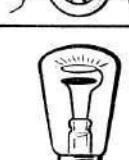
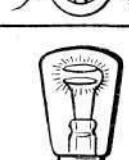
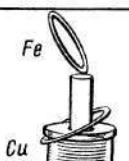
Постоянный ток	Сравнение действий постоянного и переменного тока	Переменный ток
	Тепловые действия одинаковы: накаливание волокна электрической лампочки может быть вызвано как переменным током, так и постоянным.	
	Химические действия тока неодинаковы: при электролизе раствора медного купороса постоянный ток вызывает выпадение меди на аноде; при пропускании через тот же раствор переменного тока выпадение меди незаметно. При электролизе раствора серной кислоты постоянный ток вызывает выпадение на аноде кислорода (1 часть по объему) и на катоде водорода (2 части). При электролизе того же раствора переменным током на аноде и катоде выпадают одинаковые смеси кислорода и водорода.	
	У неоновой лампы, включенной в цепь постоянного тока, светится один электрод, при переменном токе — попеременно оба электрода.	
	Электромагнитные действия неодинаковы: катушка с железным сердечником притягивает железные и не притягивает медные кольца. При использовании переменного тока кольца „висят“ в воздухе.	
	В электрической дуге, питаемой постоянным током, скорее сгорает электрод, соединенный с положительным полюсом источника тока. При переменном токе оба электрода сгорают одновременно.	

Рис. 44. Сравнение действий постоянного и переменного тока.

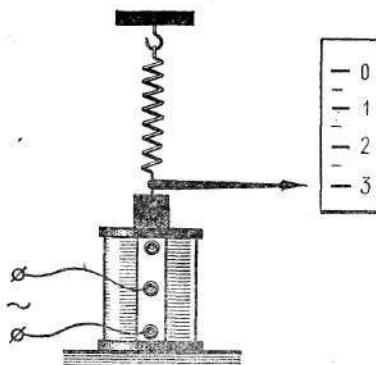


Рис. 45. Модель электромагнитного измерительного прибора.

Амперметры и вольтметры переменного тока градуируют на действующее значение измеряемых величин. Приборы электромагнитной системы применяют для измерения как постоянного, так и переменного тока. Но обычно градуировка их шкал для переменного и постоянного тока различна. Очевидно, что отклонение подвижной системы приборов переменного тока не должно зависеть от изменения его направления в течение периода. По этой причине магнитоэлектрические приборы для измерения переменного тока (без дополнительных приспособлений — выпрямителей) не применяются.

Полезно продемонстрировать учащимся упрощенную модель электромагнитного прибора, например амперметра (рис. 45), включив ее в цепь постоянного, а затем переменного тока. Следует также показать электроизмерительный прибор той же системы фабричного изготовления. В кабинете желательно иметь образцы электроизмерительных приборов в разобранном виде, смонтированные на панелях, что позволяет познакомиться с их конструктивными особенностями.

Рассматривая шкалу прибора, устанавливают, какую величину (силу тока или напряжения) он измеряет, в каких применяется цепях (для переменного или постоянного тока), какова система прибора, пределы измерения, класс точности, каковы указания относительно установки прибора (в горизонтальном или вертикальном положении).

Важнейшие условные обозначения желательно свести в специальную таблицу.

6. Активное сопротивление в цепи переменного тока

Под действием синусоидальной ЭДС электроны совершают вынужденные колебания. Эти колебания электронов, в результате которых они в течение каждого полупериода приобретают упорядо-

ченное движение, аналогичны упорядоченному движению электронов в цепи постоянного тока. Следовательно, переменный ток тоже должен испытывать некоторое сопротивление в проводнике и нагревать его.

$$\frac{I_0^2 R}{2} T = I^2 R T, \text{ отсюда } I = \frac{I_0}{\sqrt{2}}.$$

Формулу для действующего значения напряжения и ЭДС вводят по аналогии с формулой силы тока:

$$U = \sqrt{\bar{U}^2} = \frac{U_0}{\sqrt{2}};$$

$$\mathcal{E} = \sqrt{\bar{\mathcal{E}}^2} = \frac{\mathcal{E}_0}{\sqrt{2}}.$$

Сопротивление, в котором электрическая энергия необратимо превращается во внутреннюю энергию проводника, называют активным. Нужно иметь в виду, что активное сопротивление, вообще говоря, зависит от частоты тока. При большой частоте начинает сказываться влияние поверхностного эффекта, благодаря которому плотность тока проводника становится наибольшей на его поверхности, уменьшаясь к центру. А это эквивалентно уменьшению площади поперечного сечения проводника и, следовательно, приводит к увеличению его активного сопротивления. Данный эффект находит свое применение в поверхностной закалке деталей с помощью токов высокой частоты. Но для токов промышленной частоты этим эффектом можно пренебречь. Рассматривая колебания в контуре, мы обращаем внимание на то, что сила тока в различных участках контура, вообще говоря, неодинакова (см. рис. 104). Поэтому применение технических приборов для измерения силы тока, напряжения и мощности целесообразно только в том случае, если размеры r исследуемых участков цепей удовлетворяют условию: $r \ll \lambda$, где $\lambda = CT$ — длина электромагнитной волны, соответствующей периоду T переменного тока. Это требование в обычных условиях заведомо выполняется для переменного тока в 50 Гц ($r \ll 6000$ км).

При активном сопротивлении цепи сдвига фаз между током и напряжением не происходит: изменения тока пропорциональны изменению напряжения. (Этот факт нетрудно показать на опыте с помощью двухлучевого осциллографа.) Таким образом, в цепи с активным сопротивлением для мгновенных значений силы тока и напряжения оказывается справедливым закон Ома: $i = \frac{U}{R}$. Но так как $i = I_0 \sin \omega t$, а $U = U_0 \sin \omega t$, то закон Ома можно записать также с помощью амплитудных и действующих значений силы тока и напряжения:

$$I_0 = \frac{U_0}{R}; \quad I = \frac{U}{R}.$$

7. Цепь переменного тока с индуктивностью

Изложение темы можно начать с постановки проблемного опыта (рис. 46). Лампочка на 127 (220) В, подключенная к источнику постоянного тока последовательно с катушкой индуктивности L , например, от разборного школьного трансформатора светит ярко, а при подключении к источнику переменного тока такого же действующего напряжения светит с меньшим накалом или даже не светит совсем.

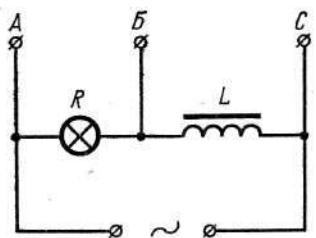


Рис. 46. Активные и индуктивные сопротивления в цепи переменного тока.

Пренебрегая активным сопротивлением катушки индуктивности L , явление объясняют следующим образом. Под действием переменного синусоидального напряжения электрической сети U в катушке возникает синусоидальный ток, мгновенное значение которого $i = I_0 \sin \omega t$. В результате изменения магнитного поля в катушке наводится ЭДС самоиндукции U_L , равная в любой момент времени, но противоположная по знаку напряжению сети U . Поскольку

$$U_L = -L \frac{di}{dt} = -\omega L I_0 \cos \omega t,$$

напряжение

$$U = \omega L I_0 \cos \omega t = \omega L I_0 \sin \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right).$$

Величину $\omega L I_0$ можно считать амплитудным значением напряжения U , а величину ωL по аналогии с законом Ома для цепи постоянного тока индуктивным сопротивлением R_L . Тогда $I_0 = \frac{U_0}{\omega L}$.

Поскольку $I_0 = \sqrt{2} I$, а $U_0 = \sqrt{2} U$, то это соотношение справедливо и для действующих значений силы тока и напряжения:

$$I = \frac{U}{\omega L} = \frac{U}{2\pi\nu L}.$$

Из сравнения формул для i и U также видно, что явление самоиндукции приводит к тому, что ток в цепи нарастает постепенно и при чисто индуктивном сопротивлении отстает от напряжения по фазе на $\frac{\pi}{2}$.

Зависимость сопротивления R_L от индуктивности L демонстрируют, изменяя в катушке положение железного сердечника и включая различное число ее витков. Зависимость R_L от частоты переменного тока ν показывают, подключив цепь (рис. 46) к звуковому генератору. Обе демонстрации качественно поясняют, что $R_L \sim \omega L$. Для пояснения проблемного опыта полезно также подчеркнуть, что при $L = 10 \text{ ГГц}$ $R_L = 3140 \text{ Ом}$.

Для показа сдвига фаз между током и напряжением лучше всего использовать двухлучевой осциллограф. Можно взять также однолучевой осциллограф в соединении с электромеханическим или электронным коммутатором [17, т. II, опыт 101].

Кривые на экране осциллографа покажут наличие разности фаз между током и напряжением.

При отсутствии коммутатора можно рекомендовать следующий упрощенный вариант опыта. Экран осциллографа закрывают про-

зрачной пленкой. Напряжение с клемм AB (рис. 46) подают на осциллограф и получают на экране синусоиду, которую рассматривают как кривую силы тока в катушке индуктивности L , поскольку фазы колебаний силы тока одинаковы во всех последовательно соединенных участках цепи. Кривую обводят на пленке, используя для этого фломастер. Затем вместо клемм AB к осциллографу присоединяют клеммы BC и обнаруживают, что напряжение на катушке индуктивности отличается по фазе от кривой тока. Для анализа кривой полезно перерисовать ее в большем масштабе на классную доску.

8. Цель переменного тока с емкостным сопротивлением

Изложение материала так же, как и при изучении индуктивного сопротивления, можно начать с проблемного опыта, заменив в схеме (см. рис. 46) катушку индуктивности L конденсатором C . Подключая цепь сначала к источнику постоянного, а затем переменного тока наблюдают, что лампочка в первом случае не светит, а во втором — светит, но неполным накалом.

Существование переменного тока в цепи с конденсатором объясняют следующим образом. Ток в проводах a и b , присоединенных к пластинам конденсатора, имеет одно и то же направление и величину (рис. 47). Это значит, что к одной из пластин переносится столько же зарядов, сколько их уносится с другой. Уподобим конденсатор источнику тока и будем считать положительным ток, текущий от обкладки, а положительным то напряжение, которое «направлено по току» (гл. II, 3).

В любой момент времени напряжение на обкладках конденсатора равно и противоположно по знаку напряжению генератора U : $U = -U_C$. Но известно, что $U_C = \frac{q}{C}$, а $U = U_0 \sin \omega t$. Следовательно, заряд

$$q = U_C C = -CU_0 \sin \omega t,$$

а ток

$$i = q' = -\omega CU_0 \cos \omega t = I_0 \sin \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right),$$

где $I_0 = \omega C U_0$. Величина ωC аналогична проводимости, а величина $\frac{1}{\omega C}$, как это следует из сравнения с законом Ома для постоянного тока, играет роль сопротивления. Переходя к действующим значениям силы тока и напряжения закон Ома для цепи переменного тока с емкостью

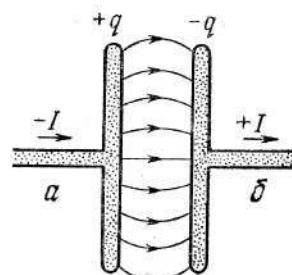


Рис. 47. Разрядка и зарядка конденсатора.

можно записать в виде

$$I = \frac{U}{R_C} = \frac{U}{\frac{1}{\omega C}} = U \omega C.$$

Важно заметить, что в цепи с емкостным сопротивлением ток опережает напряжение на $\frac{\pi}{2}$. Качественно это можно объяснить следующим образом.

Допустим, что вначале конденсатор не заряжен. Тогда растущее по синусоидальному закону даже очень малое вначале напряжение создает большой ток. Когда же напряжение сети возрастет, на конденсаторе уже накопятся значительные заряды и возникнет разность потенциалов U_C , препятствующая перемещению зарядов. Ток уменьшится.

При максимальном значении напряжения сети будет максимальным и напряжение на конденсаторе. При этом $U_0 = -U_C$. Ток в цепи станет равным нулю. Таким образом, ток опережает напряжение сети по фазе на $\frac{\pi}{2}$. Поэтому мгновенные значения напряжения и тока можно записать в виде

$$u = u_0 \sin \omega t; \quad i = I_0 \sin \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right).$$

На опыте фазовые соотношения тока и напряжения в цепи с емкостью устанавливают, используя установку, схема которой показана на рисунке 46, заменив катушку индуктивности L конденсатором C . Аналогично тому, как это делалось для катушки индуктивности L , на опыте также показывают, что $R_C \sim \frac{1}{\omega C}$.

9. Полная цепь переменного тока. Метод векторных диаграмм

В рассмотренных выше идеальных случаях цепи ей приписывалось какое-либо одно сопротивление: активное, индуктивное или емкостное, что имеет смысл лишь в том случае, когда все остальные виды сопротивления играют незначительную роль по сравнению с избранным. Однако фактически любой участок цепи обладает всеми видами сопротивления, и это часто бывает необходимо учитывать. Соответствующие зависимости между напряжением, силой тока и сопротивлением для полной цепи проще всего найти с помощью метода векторных диаграмм. Этот метод, известный учащимся из курса математики IX класса, по существу уже использовался нами для вывода формул смещения, скорости и ускорения точки, совершающей гармонические колебания (см. рис. 16—18). Особенно удобны векторные диаграммы для сложения и вычитания синусоидальных величин, а также для нахождения и изображения сдвига фаз между ними.

Допустим, что нам надо найти суммарное напряжение на двух последовательно соединенных участках цепи, напряжения на которых выражаются синусоидальными функциями:

$$U_1 = U_{01} \sin (\omega t + \varphi_1) \text{ и}$$

$$U_2 = U_{02} \sin (\omega t + \varphi_2).$$

Для этого на диаграмме (рис. 48) изображаем врачающиеся против часовой стрелки радиус-векторы, модули которых в избранном масштабе равны амплитудным значениям напряжений U_{01} и U_{02} . Проекции этих векторов на вертикальную ось для любого момента времени дадут значения U_1 и U_2 , а сумма этих проекций будет равна, как это видно из рисунка 49, OC , т. е. проекции результирующего вектора U_0 .

Следовательно, суммарное напряжение $U = U_1 + U_2 = U_0 \sin (\omega t + \varphi_0)$

Амплитудное значение суммарного напряжения U_0 можно найти из треугольника $OA'C'$:

$$U_0 = \sqrt{U_{01}^2 + U_{02}^2 + 2U_{01}U_{02} \cos(\varphi_1 - \varphi_2)}.$$

Значение же начальной фазы φ_0 определяется по формуле

$$\operatorname{tg} \varphi_0 = \frac{DC'}{OD} = \frac{U_{01} \sin \varphi_1 + U_{02} \sin \varphi_2}{U_{01} \cos \varphi_1 + U_{02} \cos \varphi_2}.$$

Таким образом, суммарное напряжение последовательно соединенных участков цепи можно найти как геометрическую (а не алгебраическую!) сумму напряжений на этих отдельных участках.

В этом смысле иногда записывают: $\vec{U} = \vec{U}_1 + \vec{U}_2$, помня, однако, об условности такой записи, поскольку напряжение — величина скалярная. Для отличия данных векторов, применяемых в диаграммах, от векторов физических в некоторых пособиях их отмечают не стрелкой, а точкой: $\dot{U} = \dot{U}_1 + \dot{U}_2$.

В зависимости от конкретных условий преподавания данные сведения могут быть сообщены учащимся с различной полнотой.

Для формирования понятия о геометрическом сложении напряжений на последовательно соединенных участках цепи переменного

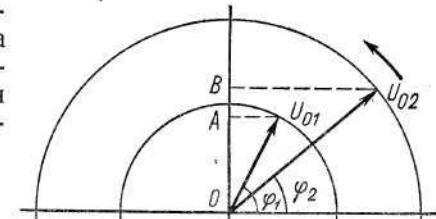


Рис. 48. Векторная диаграмма.

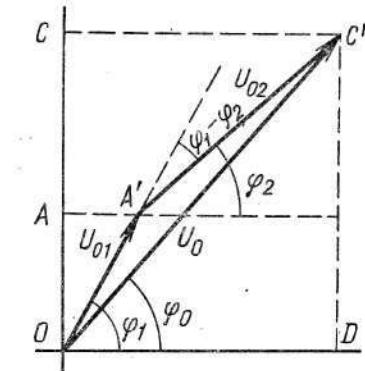


Рис. 49. Сложение двух колебаний с помощью векторной диаграммы.

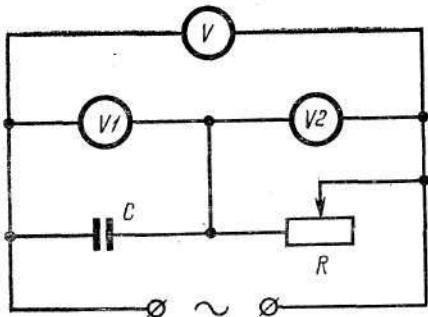


Рис. 50. Схема для проверки правила сложения напряжений при переменном токе.

Ток $i = I_0 \sin \omega t$ в последовательно соединенных участках цепи всюду одинаков. Напряжение $U_R = I_0 R \sin \omega t$ на сопротивлении R совпадает по фазе с током, а напряжение на конденсаторе C отстает по фазе на $\frac{\pi}{2}$:

$$U_C = I_0 R_C \sin \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right).$$

Поэтому в любой момент времени t общее напряжение

$$U = I_0 R \sin \omega t + I_0 \frac{1}{\omega C} \sin \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right). \quad (2)$$

Формулы 1 и 2 наводят на мысль о том, что графически напряжение на активном и емкостном сопротивлении можно изобразить в виде взаимно перпендикулярных векторов, а общее напряжение U должно находиться как их геометрическая сумма (рис. 51):

$$U = IZ_{RC},$$

где Z_{RC} — общее сопротивление цепи. Поэтому

$$I^2 Z_{RC}^2 = I^2 R^2 + I^2 \frac{1}{\omega^2 C^2}.$$

Отсюда

$$Z_{RC} = \sqrt{R^2 + \frac{1}{\omega^2 C^2}}.$$

Заменив в схеме (рис. 50) конденсатор C катушкой индуктивности, аналогично находят, что

$$U^2 = U_R^2 + U_L^2.$$

Заметим, что при проверке данного соотношения пренебрегать активным со-

тока полезно, например, вначале поставить проблемный опыт, показав, что общее напряжение в цепи (рис. 50), измеряемое вольтметром V , не равно алгебраической сумме напряжений на емкостном и активном сопротивлении, измеряемых соответственно вольтметрами $V1$ и $V2$. На числовых примерах, взятых из опыта, следует показать, что

$$U^2 = U_R^2 + U_C^2,$$

или

$$U = \sqrt{U_R^2 + U_C^2}. \quad (1)$$

противлением катушки индуктивности обычно нельзя, так как это вносит в расчеты значительную погрешность. Поскольку на участке цепи с индуктивным сопротивлением напряжение по фазе опережает ток на $\frac{\pi}{2}$, векторная диаграмма для данного случая имеет вид, показанный на рисунке 52, используя который находят, что

$$Z_{RL} = \sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}.$$

Для того чтобы показать различие активного и индуктивного сопротивления катушки L , полезно, пользуясь законом Ома, методом амперметра и вольтметра, сначала определить активное сопротивление катушки на 220 В универсального трансформатора Главвуттехпрома, а затем ее полное сопротивление ($R = 14$ Ом; $Z_{RL} = 1300$ Ом).

Векторная диаграмма для полной цепи имеет вид, показанный на рисунке 53, из которого следует, что

$$\begin{aligned} U^2 &= U_R^2 + (U_L - U_C)^2; \\ I^2 Z^2 &= I^2 R + I^2 \left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right)^2; \\ Z &= \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right)^2}. \end{aligned}$$

10. Резонанс напряжений

Изложение можно начать с проблемного опыта, собрав цепь по схеме, показанной на рисунке 54. В опыте используют электролампу на 150 Вт, катушку индуктивности L от универсального трансформатора и батарею конденсаторов переменной емкости на 58 мФ. Перемещая ярмо трансформатора и изменения емкость конденсатора, заранее до демонстрации устанавливают в цепи примерно резонансный режим.

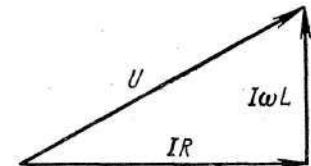


Рис. 52. Векторная диаграмма для сложения напряжений в цепи с активным и индуктивным сопротивлениями.

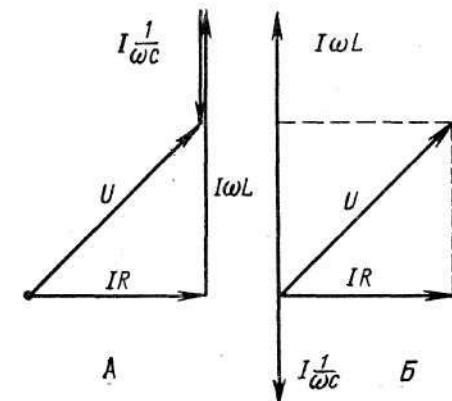


Рис. 53. Векторная диаграмма для сложения напряжений в цепи с активным, индуктивным и емкостным сопротивлениями.

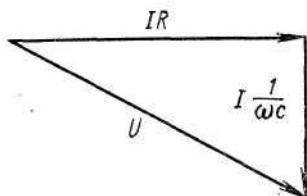


Рис. 51. Векторная диаграмма сложения напряжений в цепи с активным и емкостным сопротивлениями.

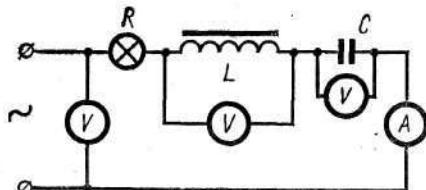


Рис. 54. Схема цепи для демонстрации резонанса напряжений.

взрастет. После этого поочередно замыкают проводом накоротко R_L и R_C и, к удивлению школьников, обнаруживают, что сила тока резко уменьшается.

Явление объясняют тем, что напряжения на емкости и индуктивности находятся в противофазе и поэтому частично или полностью компенсируют друг друга.

В том случае, когда $R_L = R_C$, полное сопротивление цепи минимально и равно его активному сопротивлению. Ток же в цепи $I = \frac{U}{R}$ максимален. Наступает явление резонанса (напряжений).

Для этого случая $\omega L = \frac{1}{\omega C}$; $T = 2\pi\sqrt{LC}$. Но это известная учащимся формула Томсона для периода свободных колебаний в контуре с малым активным сопротивлением.

Следовательно, резонанс в электрической цепи наступает при совпадении ее собственной частоты с частотой внешнего переменного напряжения.

Настройку колебательного контура в резонанс при заданной частоте $v = 50$ Гц сначала показывают, изменяя параметры L и C . Затем при неизменных параметрах L и C добиваются резонанса, изменяя частоту переменной ЭДС. Для этого цепь подключают к генератору звуковой частоты, а в качестве индикатора используют лампочку от карманного фонаря. На выход звукового генератора присоединяют также динамик. Изменяя частоту, обнаруживают на слух и по свечению лампочки, что при частотах большей или меньшей некоторой определенной (резонансной) частоты сила тока в цепи уменьшается.

Поскольку сила тока во время резонанса при заданном значении приложенного напряжения зависит только от активного сопротивления, резонансные кривые для различных значений R располагаются аналогично кривым при механическом резонансе (см. рис. 25). Следовательно, роль R аналогична роли трения.

Важным следствием наступления резонанса является резкое возрастание напряжения на катушке индуктивности и емкости:

$$U_L = I\omega L = I \frac{L}{\sqrt{LC}} = I \sqrt{\frac{L}{C}}.$$

Включив в процессе демонстрации данную цепь, спрашивают у учащихся, как изменится в цепи ток (накал лампочки), если выключить катушку индуктивности или конденсатор. Как правило, учащиеся единодушно заявляют, опираясь на известные опыты для цепей с R и R_L ; R и R_C , что сила тока возрастет.

Аналогично $U_C = I\sqrt{\frac{L}{C}}$; $U = IR$. Если $R \ll \sqrt{\frac{L}{C}}$, то $U_L = U_C \gg U$.

Этот факт следует подтвердить на опыте (рис. 54), измеряя и сравнивая напряжение на реостате, катушке индуктивности и конденсаторе.

Как следует из самого существа явления, резонанс в электрической цепи может быть использован для усиления электрических колебаний, например, в различных радиоустройствах и должен учитываться при расчете проводов на определенную силу тока, расчете изоляции на пробойное напряжение и т. д.

11. Мощность в цепи переменного тока

В общем случае мгновенная мощность переменного тока

$$P = ui = I_0 U_0 \sin \omega t \cdot \sin (\omega t + \varphi),$$

где φ — сдвиг фаз между током и напряжением.

Тригонометрические преобразования и нахождение среднего за период значения полученных величин дают следующее выражение: $P = \bar{P} = UI \cos \varphi$ [9, § 28]. Множитель $\cos \varphi$ называют коэффициентом мощности.

По данной формуле вычисляют активную мощность, т. е. ту часть энергии генераторов, которая необратимо переходит непосредственно во внутреннюю энергию проводников в результате их нагревания или же переходит во внутреннюю энергию благодаря изменяющемуся магнитному полю (механическая работа, токи Фуко). Но в цепи происходят и обратимые превращения энергии. Так, например, в цепи (см. рис. 54) в течение полупериода конденсатор C заряжается, получая энергию от генератора, а в течение другого полупериода разряжается, возвращая энергию своего электрического поля генератору. Аналогично происходят превращения и энергии магнитного поля в катушке индуктивности L .

Электрические машины, например генераторы и трансформаторы, так же как и линии электропередач, рассчитаны на определенное номинальное (максимально допустимое) значение силы тока и напряжения. При $\cos \varphi = 1$ генератор отдает в цепь максимальную мощность $P = I_n U_n$. Допустим теперь при тех же значениях I_n и U_n , что $\cos \varphi = 0,5$. Это значит, что генератор отдает потребителю только половину той энергии, которую способен вырабатывать. Но сила тока I_n в генераторе и в сети, а следовательно, и потери на джоулево тепло будут максимальными, что отрицательно скажется на КПД всей энергетической системы.

Для того чтобы при $\cos \varphi = 0,5$ и принятом напряжении U_n подать потребителю полную мощность P , нужно вдвое увеличить силу тока. Но увеличение силы тока в 2 раза согласно закону

Джоуля — Ленца $Q = I^2Rt$ вызывает увеличение в 4 раза потерь энергии на нагревание.

Следует предупредить нередкую ошибку учащихся, смешивающих разные физические величины: коэффициент мощности ($\cos \varphi$) и коэффициент полезного действия (КПД). Коэффициент мощности ($\cos \varphi$) показывает, какая часть электрической энергии превращается необратимо во внутреннюю или механическую энергию и в какой мере используется силовая установка, приводящая в действие генератор (паровая турбина, гидротурбина, дизель и др.), а КПД — ту часть выработанной электроэнергии, которая используется полезно в тех или иных целях, например для нагревания. Коэффициент мощности ($\cos \varphi$) оказывает влияние на КПД электропередач переменного тока в том смысле, что с увеличением $\cos \varphi$ уменьшается доля энергии, напрасно потерянной в электрических машинах и линиях электропередач по сравнению с полной энергией, которуюрабатывает генератор.

Для промышленных предприятий минимальный $\cos \varphi = 0,85$. Повышение $\cos \varphi$ в энергосистемах страны даже на доли процента может дать экономию в сотни миллионов киловатт-часов электроэнергии.

Обычно сдвиг фаз в цепях переменного тока вызывается ненагруженными трансформаторами и электродвигателями; большое влияние оказывает также индуктивность и электромемкость длинных линий электропередач.

Борьба со сдвигом фаз, как следует из формулы

$$\cos \varphi = \frac{R}{Z} = \frac{R}{\sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}},$$

заключается в уменьшении сопротивления Z за счет максимально возможного приближения цепи к условиям резонанса. В том числе, поскольку $\cos \varphi$ часто обусловлен значительным индуктивным сопротивлением, прибегают к включению в цепь емкостей. Так, например, параллельно электродвигателям подключают конденсаторы.

В заключение крайне желательно познакомить учащихся с ваттметром, поворот подвижной системы которого пропорционален величинам I , U , $\cos \varphi$ и, следовательно, мощности P .

Используя ваттметр, вольтметр и амперметр, полезно найти $\cos \varphi$, например, для цепи, показанной на рисунке 54:

$$\cos \varphi = \frac{P}{IU}.$$

Заметим, что величину $S = IU$ называют полной мощностью и измеряют в вольт-амперах ($V \cdot A$) или киловольт-амперах ($kV \cdot A$). Номинальная полная мощность, выраженная в киловольт-амперах, указывается, например, в паспортах генераторов переменного тока и трансформаторов.

12. Трансформация тока. Передача электроэнергии

Принцип трансформации тока имеет своим началом открытия Фарадея и Максвелла. Однако по-настоящему вопросы трансформации тока были поставлены и решены в середине второй половины XIX в. в связи с началом практического использования переменного тока. Немалую роль при этом сыграло изобретение П. Н. Яблочковым (1847—1894) электрической дуги, которая с триумфом обошла весь мир под названием «русского света». Первоначально для питания свечей П. Н. Яблочков использовал наиболее распространенный в то время постоянный ток. Но при этом уголь, соединенный с положительным полюсом генератора, сгорал быстрее (см. рис. 44, E). Поэтому П. Н. Яблочков решил питать свечи переменным током. Но это потребовало решения задачи, как тогда говорили, «дробления электричества», т. е. получения большего или меньшего напряжения и силы тока для питания различных свечей, подключенных одновременно к одному и тому же генератору переменного тока. В связи с этим в 1876—1882 гг. П. Н. Яблочков выдвинул и осуществил идею трансформации переменного тока.

По существу П. Н. Яблочковым была разработана система, включающая все основные элементы электрических цепей переменного тока (генератор, трансформаторы, сеть, потребители). Не случайно именно Яблочкову принадлежат пророческие слова о том, что электричество будут вырабатывать на особых «фабриках» и распределять по домам, как водопровод распределяет воду [36, с. 334].

В 1882 г. на московской промышленной выставке трансформатор своей конструкции демонстрировал И. Ф. Усагин (1855—1919), убедительно показавший возможности распределения с его помощью электроэнергии переменного тока между потребителями, дающими различный эффект (электрические свечи, нагревательные приборы, электродвигатели и др.). Трансформаторы Яблочкова и Усагина имели разомкнутую магнитную цепь. Их сердечник состоял из пучка железных проволок. Внешне они напоминали катушку Румкорфа. Трансформатор с замкнутой магнитной системой и, следовательно, с большим КПД предложили в 1884 г. англичане братья Гопкинсоны.

После того как свечи Яблочкова были вытеснены лампами на-каливания, изобретение которых связано с именами А. Н. Лодыгина (1847—1923) и Т. Эдисона (1847—1931), переменный ток почти полностью прекратили применять. Использовали хорошо изученный постоянный ток и в двигателях постоянного тока, с которыми не могли конкурировать двигатели однофазного переменного тока.

К переменному току обратились вновь в связи с задачей повышения напряжения при передаче электроэнергии на большие расстояния, так как получать достаточно высокие напряжения непосредственно с помощью генераторов постоянного тока оказалось сложно (искрение щеток, пробой изоляции и т. п.). В цепях же

переменного тока эта задача решалась надежно и просто с помощью трансформаторов. Решающую роль сыграло также изобретение в 1889 г. русским инженером М. О. Доливо-Добровольским (1862—1919) асинхронного двигателя трехфазного тока.

Интересно отметить, что целый ряд авторитетных физиков и электротехников того времени, например В. Томсон и Т. Эдисон, возражали против применения переменного тока. Эдисон говорил, например, что прокладка по улицам кабелей переменного тока высокого напряжения подобна закладке под мостовую динамида.

Необходимость повышения напряжения при передаче электроэнергии по проводам на большие расстояния может быть объяснена следующим образом.

Определенная мощность $P = IU$, отдаваемая генераторами в электросеть, может быть получена при малом токе I_1 и большом напряжении U_1 или же при большом токе I_2 и малом напряжении U_2 .

Перед учащимися ставят вопрос, какой способ экономически целесообразнее.

По закону Джоуля — Ленца $Q = I^2Rt$ в линии электропередачи расходуется энергия на нагревание проводов. Поскольку в данную формулу входит квадрат силы тока, то уменьшение силы тока в линии электропередач и лежит в основе уменьшения потерь энергии на нагревание проводов. Уменьшение же сопротивления R , приводящее при данном материале проводников к их утолщению, целесообразно и необходимо только в той мере, которая диктуется допустимой плотностью тока. Следовательно, в целях уменьшения потерь энергии в линиях электропередач необходимо использовать ток небольшой силы, но высокого напряжения. Повышение же напряжения (так же как и его понижение при последующей подаче тока потребителям) легче всего осуществить при переменном токе с помощью трансформаторов.

Принцип действия трансформатора может быть объяснен так. Переменный электрический ток, проходящий по первичной обмотке трансформатора, создает переменный магнитный поток Φ , который порождает вихревое электрическое поле:

$$\mathcal{E}_i = -\frac{d\Phi}{dt}; \quad (\oint B_i dl = -\frac{\partial}{\partial t} \int B_n dS).$$

Вихревое электрическое поле в отличие от поля электростатического непотенциального: работа по перемещению заряда по замкнутому пути в этом поле не равна нулю. Работа по перемещению единицы положительного заряда по замкнутому пути (одному витку) равна электродвижущей силе индукции \mathcal{E}_i . При n_1 витках первичной и n_2 витках вторичной обмотки справедливо:

$$\mathcal{E}_1 = -n_1 \frac{d\Phi}{dt}; \quad \mathcal{E}_2 = -n_2 \frac{d\Phi}{dt}.$$

Следовательно, чем больше число n_2 витков вторичной катушки, тем больше ее ЭДС.

Для демонстрации этого явления берут изолированный провод длиной 1—2 м и замыкают его концы на лампочку от карманного фонаря. Затем навивают на сердечник трансформатора виток за витком, как показано на рисунке 55, и наблюдают постепенное увеличение накала лампочки [20, § 57].

Следующая задача — обосновать целесообразность применения замкнутого магнитопровода. Для этого наблюдают едва заметное свечение лампочки при разомкнутой магнитной цепи (см. рис. 55) и ее яркое свечение, когда П-образный сердечник трансформатора замыкается ярмом. Увеличение ЭДС индукции объясняют уменьшением рассеяния магнитного потока.

При холостом ходе трансформатора (разомкнутой вторичной цепи) приложенное внешнее напряжение U_1 компенсирует падение напряжения на активном сопротивлении R и индуктивном сопротивлении Z_L обмотки: $\bar{U} = I_1 R_1 - \mathcal{E}_i$.

Активное сопротивление обмотки трансформатора R_1 мало, а индуктивное сопротивление ненагруженного трансформатора ωL велико. Сила тока $I_1 = \frac{U_1}{\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}}$ мала. Поэтому величиной $I_1 R_1$ в приведенном выше уравнении можно пренебречь, приняв, что $U_1 \approx -\mathcal{E}_i = n_1 \frac{d\Phi}{dt}$, т. е. ЭДС самоиндукции \mathcal{E}_i на концах первичной катушки нагруженного трансформатора примерно равна по модулю, но противоположна по знаку (фазе) приложенному к ней напряжению U_1 .

Таким образом, для холостого хода трансформатора, если не учитывать потери энергии на джоулево тепло в его обмотках (а также и потери энергии в стали и др.), можно записать: $\frac{U_1}{\mathcal{E}_i} \approx \frac{n_1}{n_2} \approx k$, где k — коэффициент трансформации. В паспортных данных (на щитках трансформаторов) коэффициент k указывается в виде отношения номинального высшего напряжения к низшему, например 6000/230 В.

В лабораторных условиях и в демонстрационных опытах ЭДС может быть с достаточной точностью измерена вольтметром, сопротивление которого Z_b значительно больше сопротивления Z_2 катушки, что практически всегда имеет место для силовых трансформаторов.

Вторичная катушка играет для подключенной к ней нагрузки роль источника тока, ЭДС которого равна \mathcal{E}_2 . Сила тока, протекаю-

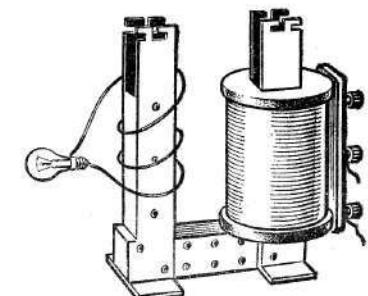


Рис. 55. Опыт, поясняющий действие трансформатора.

щего через вольтметр, $I_b = \frac{\mathcal{E}_2}{Z}$, где Z — геометрическая сумма сопротивления Z_b и Z_2 . Поскольку $Z_b \gg Z_2$, то $I_b Z_b \approx \mathcal{E}_2$. Но величина $I_b Z_b$ — это напряжение U_2 , измеряемое вольтметром. Следовательно, $U_2 \approx \mathcal{E}_2$ и $k \approx \frac{U_1}{U_2} \approx \frac{n_1}{n_2}$. Данное соотношение выполняется тем точнее, чем ближе режим работы трансформатора к холостому. Обычно считают, что с достаточным для практических целей приближением данное соотношение выполняется при номинальных значениях U_1 и U_2 .

Рассмотрим режим нагруженного трансформатора.

По закону Ленца ток во вторичной катушке имеет такое направление, что его магнитное поле препятствует изменению поля магнитопровода. Докажем, что это приводит к увеличению тока в первичной обмотке трансформатора.

Допустим, что мы рассматриваем такую четверть периода переменного тока, когда он нарастает. Увеличивающийся магнитный поток индуцирует во вторичной обмотке ток такого направления, при котором его магнитная индукция \vec{B}_2 противоположна магнитной индукции \vec{B}_1 первичной катушки. В результате поток магнитной индукции Φ в первый момент уменьшается. Уменьшается и ЭДС самоиндукции \mathcal{E}_1 в первичной катушке, а ток возрастает. Сила тока I_1 увеличивается до тех пор, пока суммарный поток магнитной индукции Φ не становится равным потоку магнитной индукции при холостом ходе.

Следовательно, увеличение тока I_2 во вторичной катушке автоматически приводит к увеличению тока I_1 в первичной катушке. Соответственно увеличивается потребляемая первой катушкой мощность $P_1 = I_1 U_1 \cos \varphi_1$ и мощность P_2 , которая отдается вторичной катушкой нагрузке: $P_2 = I_2 U_2 \cos \varphi_2$. Это желательно показать на опыте, замкнув вторичную катушку на активное сопротивление R (реостат) и измерив силы токов и напряжения I_1 , U_1 , I_2 , U_2 при различном значении R .

В паспорте трансформатора указывается его номинальная мощность в вольт-амперах (В · А или кВ · А). Объясняется это тем, что отдаваемая трансформатором мощность зависит от $\cos \varphi$ в цепи потребителей. Даже при небольшой мощности P_2 сила тока I_2 может стать такой большой, что будет способной вызвать перегрев обмотки из-за выделения джоулева тепла. Поэтому важно знать не только потребляемую мощность P_2 , но и силу тока I_2 . Например, мощность регулятора напряжения школьного (РНШ) — 2 кВ · А. Пределы регулирования напряжения 0 — 220; 220 — 250 В. Соответственно допустимые для этих пределов значения силы тока — 9 и 8 А.

Коэффициент полезного действия трансформатора

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + P_m + P_{ct}}$$

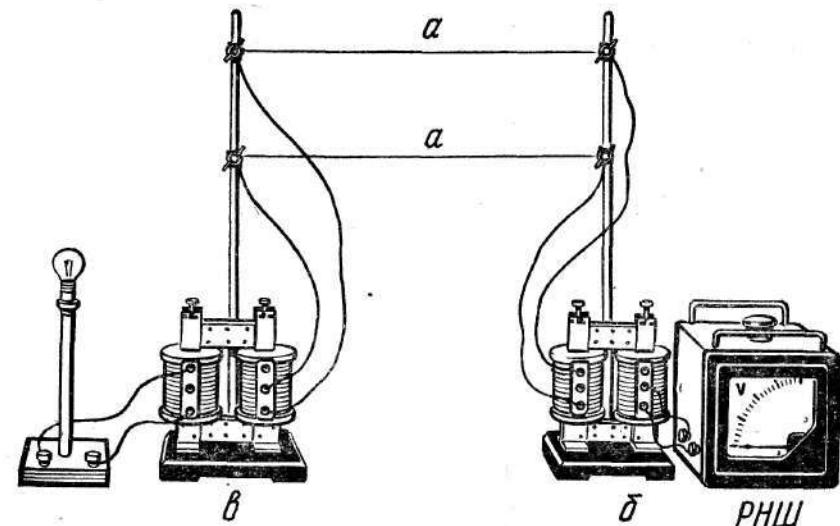


Рис. 56. Демонстрация модели электропередачи с применением ЛАТРа.

где P_m — мощность «потерь в меди», т. е. на активном сопротивлении обмоток, а P_{ct} — мощность «потерь в стали» в результате возникновения токов Фуко и перемагничивания.

КПД современных мощных трансформаторов весьма высок (порядка 98%). Поэтому при активной нагрузке приближенно можно принять, что $P_1 = P_2$; $U_1 I_1 \cos \varphi_1 \approx U_2 I_2 \cos \varphi_2$; $\cos \varphi_1 \approx \cos \varphi_2 \approx 1$ и $U_1 I_1 \approx U_2 I_2$. Отсюда следует, что $\frac{U_1}{U_2} \approx \frac{I_2}{I_1}$, следовательно, увеличивая с помощью трансформатора напряжение, мы во столько же раз уменьшаем силу тока и наоборот.

Для демонстрации передачи электроэнергии на большие расстояния с помощью трансформаторов можно поставить следующий опыт.

На штативах (рис. 56) натягивают два проводника aa , изображающие линию дальней электропередачи. Сопротивление проводников подбирают таким, чтобы подключенная к ним лампочка на 12 В едва светила, когда на другой конец линии подается напряжение 12 В от РНШ, условно принимаемого за генератор электростанции. После этого на вход «линии электропередачи» включают повышающий $б$, а на выход понижающий $в$ — универсальные трансформаторы. Клеммы на 12 В первого трансформатора присоединяют к РНШ. На выход второго трансформатора присоединяют электролампочку на 12 В и наблюдают ее яркое свечение. Удивительное для учащихся в этом опыте заключается в том, что, несмотря на прежнее (12 В) напряжение генератора и включение последовательно с «линией электропередачи» катушек трансформаторов,

представляющих дополнительное сопротивление, накал лампочки не только не уменьшается, но резко возрастает.

Вариант может служить опыт с трансформаторами на панелях и магнитоэлектрической машиной [20, рис. 10—141].

Для закрепления и углубления изученного материала полезно решить следующую задачу.

Задача 16. Один ученик сказал, что потери энергии в проводах на джоулево тепло тем меньше, чем выше напряжение и меньше сила тока, так как $Q = I^2Rt$. Второй же возразил ему: $Q = \frac{U^2}{R} t$, и поэтому, по его мнению, при высоком напряжении потери энергии в проводах больше. Объясните, кто из них прав.

Ответ. Прав первый ученик. Второй ученик путает понятие напряжения на вторичной обмотке трансформатора U_2 с падением напряжения U_n на подводящих проводах. Известно, что $U_2 = U_n + U_h$, где U_n — падение напряжения на потребителях. По закону Джоуля — Ленца $Q = I^2Rt$, где R — сопротивление линии передач. Допустим, что трансформатор отдает нагрузке мощность $P_2 = I_2U_2 \cos \varphi$. Тогда $I_2 = \frac{P_2}{U_2 \cos \varphi}$ и $Q = \frac{P_2^2 R t}{U_2^2 \cos^2 \varphi}$. Следовательно, при заданной мощности потери энергии в подводящих проводах обратно пропорциональны квадрату напряжения и квадрату $\cos \varphi$.

В связи с решением этой задачи полезно сообщить учащимся, что потери энергии и напряжения дальних электропередач достигают порядка 10%. Допустимыми потерями напряжения в осветительных сетях являются 1—2%, а в силовых линиях производственных установок (электропечей, электродвигателей и т. п.) — 2—5%. Следует иметь в виду, что, помимо нагревания проводов, имеются и другие причины потери энергии в линиях электропередач, и прежде всего — «утечка» энергии за счет коронных разрядов, которая может при высоких напряжениях даже превышать потери энергии на джоулево тепло.

13. Ламповый генератор. Токи высокой частоты

Наряду с переменным током промышленной частоты $v = 50$ Гц в технике, медицине, различных областях научных исследований и т. д. все большее значение приобретает использование токов высокой частоты ввиду ряда их специфических свойств.

В технике до частоты 10 кГц переменные токи получают с помощью машинных генераторов, а для получения больших частот используют ламповые генераторы. Принцип действия машинных генераторов токов высокой частоты тот же, что и токов промышленной частоты. В нашей стране уже в первые годы Советской власти проф. В. П. Вологдин создал машинный генератор на 150 кВт с частотой 150 кГц.

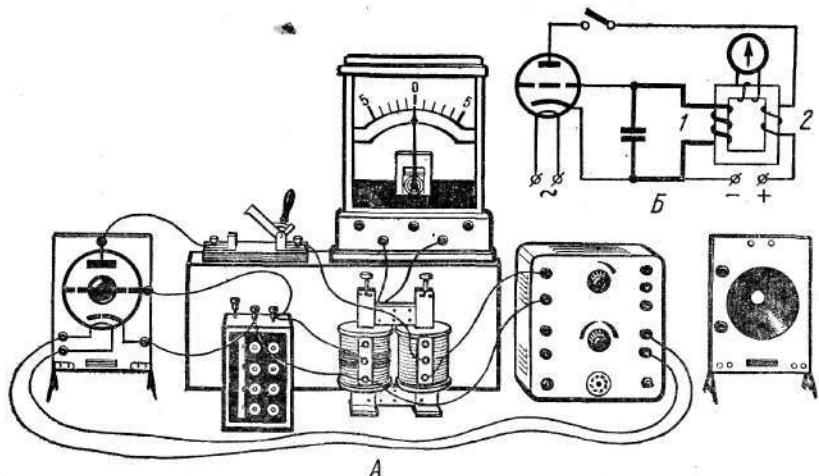


Рис. 57. Схема и установка для демонстрации действия лампового генератора.

Для ознакомления учащихся с принципом действия лампового генератора следует собрать демонстрационную установку [рис. 57; 17, т. II, опыт 110]. Для опыта используют дроссельную катушку 1 и катушку 2 от универсального трансформатора на 220 В, надетые на железный сердечник, батарею конденсаторов переменной емкости на 58 мФ и радиолампу 6Н7С (со сдвоенными электродами).

В качестве индикатора колебаний используют гальванометр, а также электронный осциллограф и громкоговоритель.

Изменяя индуктивность L и емкость C в колебательном контуре, наблюдают изменение частоты электромагнитных колебаний, вплоть до столь высоких, что стрелка гальванометра уже не успевает в силу большой инерции следовать за ними. Увеличение частоты наглядно показывает также синусоиду на экране осциллографа и увеличение высоты звука, издаваемого громкоговорителем.

Генератор рассматривают как автоколебательную систему, обращая особое внимание при объяснении его действия на «обратную связь», т. е. на влияние колебаний в контуре на анодный ток. Объяснению помогает аналогия с анкерным механизмом часов [9, § 31].

В нашей стране применение токов высокой частоты начало разрабатываться уже в 1918 году в радиолаборатории, созданной в Нижнем Новгороде (ныне город Горький). В. И. Ленин уделял этой лаборатории особое внимание. В лаборатории разрабатывались, в частности, мощные генераторные лампы, из которых надо было удалять захваченные электродами газы. Для нагрева электродов в вакууме с целью удаления газов и были применены ТВЧ. Затем ТВЧ были применены для ковки, сварки и плавки металлов, в том числе стали в печах, вмешавших несколько тонн металла. Во всех этих случаях используют токи Фуко.

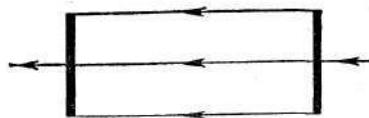


Рис. 58. Схема для пояснения поверхностного эффекта.

Нередко при изучении токов Фуко преимущественно подчеркивают их вредное действие. Первоначально только на отрицательное действие этих токов обращали внимание и в технике. Но с течением времени токи Фуко нашли и свое очень важное промышленное применение. Особенно это оказалось перспективным для ТВЧ, так как тепловое действие переменного тока при прочих равных условиях тем сильнее, чем выше его частота v , так как ЭДС индукции $\mathcal{E} = -\frac{d\Phi}{dt}$ при синусоидальном токе пропорциональна величине $I_0 \omega = I_0 2\pi v$.

Тепловое действие токов Фуко можно показать с помощью несложных, но выразительных опытов по нагреванию и даже плавлению металлов, используя набор к универсальному разборному трансформатору [18, с. 178].

В 1935 г. В. П. Вологдин для закалки стальных деталей предложил использовать «поверхностный эффект». Существо этого эффекта можно пояснить на следующем примере. Пропустим ТВЧ по трем совершенно одинаковым, включенным параллельно прямолинейным проводникам (рис. 58). Согласно правилу Ленца переменный ток каждого из проводников наведет в двух других ЭДС, препятствующую протеканию по ним тока. Наибольшая ЭДС наведется в среднем проводнике, поскольку расстояние до него соседних проводников меньше, чем среднее расстояние двух других проводников до каждого крайнего. Следовательно, сила тока в крайних проводниках будет больше, чем в среднем. При высоких частотах ток практически идет только в тонком поверхностном слое проводника, толщина которого исчисляется долями миллиметра.

Для демонстрации поверхностного эффекта изготавливают катушку (рис. 59) из оплетки бронированного кабеля или тонкой медной трубы с продетой сквозь нее изолированной проволокой [17, т. II, опыт 112]. К концам трубы и концам провода припаивают лампочки на 1 В, 0,075 А.

Надев катушку на сердечник включенного в сеть переменного тока универсального трансформатора, наблюдают свечение обеих лампочек. При поднесении же катушки к колебательному контуру генератора УВЧ обнаруживают, что светит только лампочка, замыкающая медную трубку.

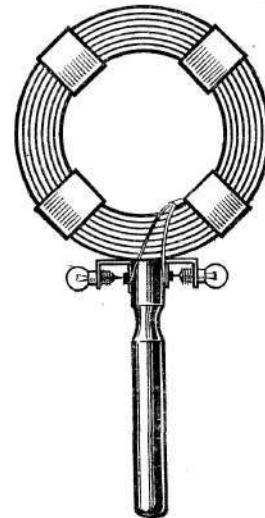


Рис. 59. Катушка для демонстрации поверхностного эффекта.

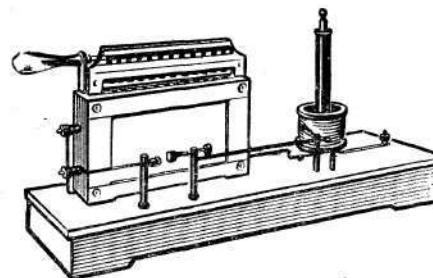


Рис. 60. Трансформатор Тесла.

При обработке стальных деталей (с последующей закалкой) ТВЧ создается твердая поверхность при мягкой и гибкой сердцевине. Это важно, например, для шеек коленчатых валов, зубьев стальных шестерен, рельсов и т. д.

Ряд выразительных опытов с ТВЧ можно показать, используя трансформатор Тесла, хотя как генератор высокой частоты он в настоящее время представляет преимущественно исторический интерес. Трансформатор Тесла (рис. 60) состоит из колебательных контуров с параметрами L_1 , C_1 и L_2 , C_2 . Катушка 2 состоит из нескольких тысяч витков, поэтому $L_2 \gg L_1$, а $C_1 \gg C_2$. Пренебрегая потерями энергии при ее передаче от контура 1 к контуру 2, можно записать: $\frac{C_1 U_1^2}{2} = \frac{C_2 U_2^2}{2}$. Поскольку $C_1 \gg C_2$, то $U_2 \gg U_1$. С помощью мощных трансформаторов Тесла на концах катушки можно получить напряжение до нескольких миллионов вольт и искры до 14 м длиной.

С помощью школьного трансформатора Тесла показывают свечение газосветных трубок, свечение лампы дневного света, свечение газа в осветительной лампе накаливания, получение искр, достигающих тела человека.

Последний опыт вызывает, пожалуй, наибольшее удивление учащихся. Если взять в руки какой-либо металлический предмет, например, гвоздь, и поднести его к шарику на конце катушки, то между шариком и острием гвоздя будут проскакивать сильные искры, не причиняющие неприятных ощущений и вреда.

Явление объясняется тем, что при токах высокой частоты за время одного полупериода ионы успевают переместиться на очень незначительные расстояния, что приводит только к нагреванию тканей. Эффект используют в медицине (диатермия).

14. Электрификация СССР

В. И. Ленин указывал, что коммунизм — это Советская власть плюс электрификация всей страны. По инициативе В. И. Ленина в 1921 г. был принят Государственный план электрификации России

(ГОЭЛРО). Даже известный английский писатель-фантаст Г. Уэллс считал этот план «электрической утопией». В своей книге «Россия во мгле» (М., Госполитиздат, 1959) Уэллс писал: «Он видит, как вместо разрушенных железных дорог появляются новые, электрифицированные, он видит, как новые шоссейные дороги прорезают всю страну, как подымается обновленная и счастливая, индустриальная коммунистическая держава»... «Приезжайте снова через десять лет и посмотрите, что сделано в России за это время», — сказал Владимир Ильич в ответ на сомнения Уэллса. И когда в 1934 г. Уэллс вновь посетил Советский Союз, его спор с Лениным уже был решен историей.

Ленинский план электрификации — план ГОЭЛРО — был осуществлен в кратчайшие сроки. Уже на полную мощность работали сотни промышленных гигантов, десятки крупных электростанций, в том числе крупнейшая в то время в мире гидростанция на Днепре, носящая имя великого Ленина¹.

Уже в 1947 г. Советский Союз вышел по производству электроэнергии на первое место в Европе и на второе, после США, в мире.

К 1980 г., как указано в решениях XXV съезда КПСС [3] производство электроэнергии составит 1340—1380 млрд. кВт · ч (более 150 планов ГОЭЛРО!).

Основную долю электроэнергии для народного хозяйства в настоящее время и в ближайшем будущем будут давать тепловые электростанции. Притом будет продолжено строительство гигантских тепловых электростанций мощностью 4—6 млн. кВт (мощность 7—10 Днепрогэсов!). Предприятия энергетического машиностроения будут выпускать турбины и генераторы мощностью 500, 800 и 1000—1200 МВт, парогазовые установки мощностью до 250 МВт.

Знамением времени и показателем научно-технического прогресса в нашей стране является опережающее развитие атомной энергетики в европейской части СССР. Из 67—70 млн. кВт новых мощностей 13—15 млн. кВт составит мощность атомных электростанций, на которых будут устанавливаться реакторы единичной мощностью до 1—1,5 млн. кВт, в том числе будут осваиваться реакторы на быстрых нейтронах.

Дальнейшее развитие получает строительство гидроэлектростанций, в том числе гидроаккумулирующих. Особенно велики запасы гидроэнергии сибирских рек. Самая крупная гидроэлектростанция в мире — Красноярская ГЭС им. 50-летия СССР. Ее мощность — 6 млн. кВт. Высота плотины — 130 м. Это высота сорокаэтажного дома. Еще более мощной будет Саяно-Шушенская ГЭС. Уникальная ГЭС создается на реке Ингуре. Ее арочная плотина имеет высоту 272,5 м! Это почти высота Эйфелевой башни.

Ученые и инженеры разрабатывают проекты строительства приливных электростанций (ПЭС). Успешно работает (Кислогубская)

ПЭС на Баренцевом море. Это хорошее начало освоения энергии морских приливов.

Ведутся также работы по созданию мощных и принципиально новых для энергетики источников тока: полупроводниковые термогенераторы, магнитогидродинамические генераторы, термоэмиссионные элементы, реакторы, работающие на управляемых термоядерных реакциях. В 10-й пятилетке планируется работа по созданию мощных генераторов с использованием принципа сверхпроводимости. Устройство и принципы действия этих генераторов могут быть рассмотрены позднее, при изучении соответствующих тем курса физики X класса.

Важным является также вопрос создания энергосистем.

Мало вырабатывать электроэнергию, нужно еще умело распределить и доставить ее потребителю. В СССР ведутся работы по созданию Единой энергетической системы страны путем объединения энергосистемы Сибири и Средней Азии с Европейской энергетической системой. При этом будут использованы линии электропередачи переменного тока напряжением до 1150 кВ и постоянного тока напряжением до 1500 кВ. Это позволит полнее, экономнее и надежнее использовать мощности электростанций, учитывая разницу наступления светового дня на огромной территории Советского Союза, разницу времени наступления паводков в северных и южных частях страны, сезонные изменения в потреблении энергии в различных отраслях промышленности и сельском хозяйстве и т. д.

Вопрос о передаче электроэнергии на большие расстояния с помощью постоянного тока высокого напряжения может быть темой внеклассного занятия.

¹ Из «Предисловия» Г. Кржижановского к книге Г. Уэллса, с. 6—7.

Глава III

МЕХАНИЧЕСКИЕ ВОЛНЫ. ЗВУК

1. Распространение импульса в упругой среде

Наряду с механическими колебаниями отдельных изолированных тел: маятников, камертонов и т. д., рассмотренными в I главе, в природе широко распространены механические колебания сплошных, твердых, жидких и газообразных упругих сред.

Главная особенность таких колебаний заключается в том, что они не остаются на том месте, где возникают, а распространяются в пространстве. Объясняется это силовыми связями между отдельными частицами среды. Наглядную картину распространения таких колебаний дает волна на поверхности воды.

Для более детального рассмотрения процесса распространения колебаний в упругой среде полезно прибегнуть к следующим опытам.

Для демонстрации распространения поперечного импульса желательно изготовить прибор (рис. 61), представляющий собой веревочную «лестницу», состоящую из двух параллельно натянутых шнурков, продетых сквозь концы деревянных перекладин. Необходимо также иметь 2—3 набора шариков или цилиндров, которые можно надеть на концы перекладин для изменения их массы и лучшей видимости колебаний. Обратив перекладины шариками к классу, отклоняют один из них в сторону и затем предоставляют самому себе. В результате все шарики поочередно, начиная с ближайшего, приходят в колебательное движение, импульс которого тем медленнее распространяется от места возбуждения колебаний, чем больше масса шариков.

Понятие о продольном импульсе можно ввести с помощью прибора, показанного на рисунке 62. Отклонение любого шарика от положения равновесия вдоль цепочки порождает импульс, при прохождении которого шарики смещаются вдоль направления его распространения.

Имея два прибора с различными шариками и пружинами, можно показать, что, чем «жестче» пружина и меньше масса шариков, тем больше скорость распространения импульса.

Формулу для скорости C_{\parallel} распространения продольного импульса можно дать учащимся в ознакомительном плане при решении следующей задачи.

Задача * 17. Скорость продольных волн в твердом теле можно вычислить по следующей приближенной формуле:

$$C = \sqrt{\frac{E}{\rho}},$$

где E — модуль упругости (модуль Юнга), а ρ — плотность среды. Проверьте данную формулу с помощью наименований единиц, входящих в нее величин. Рассчитайте по формуле скорость звука в алюминии.

Решение. Для алюминия

$$C_{\parallel} = \sqrt{\frac{0,70 \cdot 10^{11} \frac{Н}{м^2}}{2,7 \cdot 10^3 \frac{кг}{м^3}}} = 5,2 \cdot 10^3 \frac{м}{с},$$

что совпадает со значением скорости звука в алюминии, которое указывают в таблицах.

Заметим, что скорость распространения поперечного импульса в шнуре зависит от его натяжения, а в неограниченной упругой среде от модуля сдвига G и плотности среды ρ согласно формуле $C_{\perp} = \sqrt{\frac{G}{\rho}}$; $E > G$, поэтому скорость распространения продольного импульса больше скорости распространения импульса поперечного в $\sqrt{\frac{E}{G}}$ раз.

Учащимся достаточно сообщить, что скорость распространения поперечного и продольного импульсов различна и что $C_{\parallel} > C_{\perp}$.

В обычных условиях между слоями жидкостей и газов при их сдвиге не возникает сил упругости. Поэтому поперечные импульсы в жидкостях и газах возникать и распространяться не могут. В таких средах распространяются только продольные импульсы,

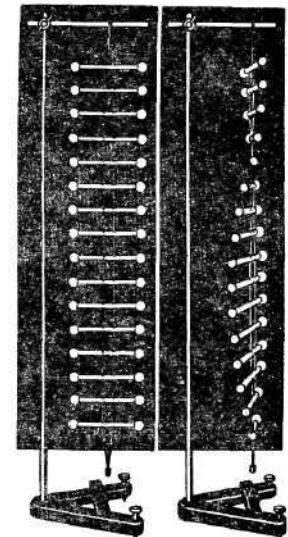


Рис. 61. Прибор для демонстрации поперечной волны.

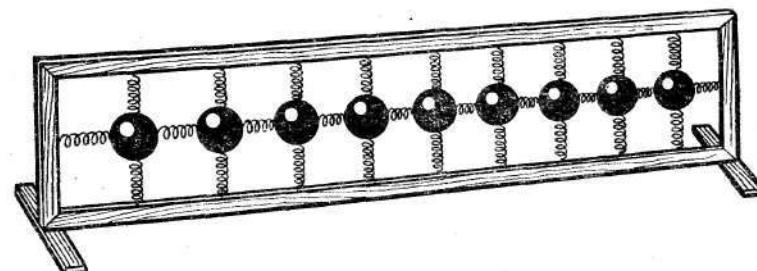


Рис. 62. Прибор для демонстрации поперечной и продольной волн.

обусловленные сжатиями и разряжениями, т. е. силами упругости, возникающими при изменении объема.

Скорость распространения импульса в газах и жидкостях соответственно определяется по формулам $C_r = \sqrt{\gamma \frac{p_0}{\rho_0}}$; $C_{ж} = \sqrt{\frac{k}{\rho}}$, где p_0 — давление; ρ_0 — плотность газа; $\gamma = \frac{C_p}{C_V}$; k — объемный модуль адиабатической сжимаемости.

Во всех этих формулах, так же как и в формуле $C_{||} = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$, обращает на себя внимание зависимость скорости распространения импульса от плотности среды и, следовательно, от массы и числа частиц, а также от сил взаимодействия между ними, с которыми связаны модуль Юнга E , давление p_0 и объемный модуль адиабатической сжимаемости k . При этом полагают, что упругие силы пропорциональны смещениям частиц, что справедливо для небольших импульсов.

В ознакомительном плане с формулой для C_r можно познакомить учащихся в процессе решения следующей задачи.

Задача * 18. Скорость распространения импульса в газе можно вычислить по формуле $C = \sqrt{\gamma \frac{p_0}{\rho_0}}$, где $\gamma = \frac{C_p}{C_V}$. Рассчитайте скорость распространения импульса в водороде при 0°C , если $\gamma = \frac{5}{3}$.

Ответ. $C = 1380$ м/с.

2. Бегущие волны

Рассмотрим частный случай, когда частица упругой среды совершает вынужденные синусоидальные колебания. Уравнение движения этой частицы имеет вид: $x = A \cos \omega t$. Постепенно по мере распространения импульса аналогичные вынужденные колебания начнут совершать и другие частицы. Но их колебания будут запаздывать по времени на $t = \frac{l}{C}$, где l — расстояние от места возбуждения колебаний до рассматриваемой частицы, а C — скорость импульса. Следовательно, уравнение движения данной частицы имеет вид¹: $x = A \cos \omega \left(t - \frac{l}{C} \right)$.

Данное уравнение называют уравнением бегущей волны. Оно показывает, что смещение колеблющихся точек в волне является функцией двух переменных — времени t и расстояния l до источника колебаний.

Уравнение волны не нужно смешивать с уравнением гармониче-

¹ Обязательное изучение данного уравнения программой не предусмотрено.

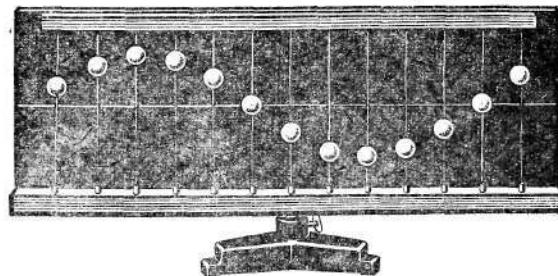


Рис. 63. Волновая машина.

ского колебательного движения $x = A \cos (\omega t + \varphi)$, которое описывает смещение одной и той же точки от положения равновесия, в то время как уравнение волны говорит об отклонении от положения равновесия различных точек по направлению распространения волны в избранный момент времени t . Это своего рода моментальная фотография волнового движения (рис. 63). Уравнение волны рисует картину, которую в ряде случаев можно наглядно увидеть в природе (волны в шнуре, очень короткие волны на воде и т. д.), а уравнение гармонического колебания — только математическое выражение зависимости смещения x от времени t .

Для детального рассмотрения процессов образования продольных и поперечных волн следует также использовать волновую машину (рис. 63) [17, т. I, опыт 68].

Опираясь на демонстрации (см. рис. 61—63), вводят следующие величины, характеризующие волну:

λ — длина волны — это расстояние между двумя ближайшими точками, колеблющимися с одинаковыми фазами (или, точнее, расстояние между ближайшими точками, имеющими разность фаз, равную 2π).

T — период колебания частицы. Поскольку за время T с волной распространяется на расстояние, равное λ , то $\lambda = CT$. Поэтому можно также сказать, что длина волны — это расстояние, на которое распространяется волна за время, равное периоду колебания частицы.

В сознании учащихся нужно четко разграничить два понятия: скорость гармонического колебания точки v и скорость распространения волны C .

Скорость гармонического колебательного движения $v = = A \omega \cos (\omega t + \varphi)$. Это мгновенная скорость колебания точки для времени t .

Скорость же C для данной среды — величина постоянная. Ее называют также фазовой скоростью, поскольку она характеризует скорость распространения какой-либо фазы волны в пространстве.

Как показывает опыт, скорость волны в какой-либо твердой, жидкой или газообразной среде не зависит от частоты (или длины) волны. Дисперсия обнаружена только для многоатомных газов

и жидкостей в области ультразвуковых частот, что не является предметом изучения в средней школе.

Но скорость распространения волн в широких пределах зависит от среды, что уже было рассмотрено выше.

Многие понятия о волновом процессе, в частности о поперечных волнах, хорошо иллюстрируются на примере волн на воде. Однако надо иметь в виду, что волны на поверхности воды не являются, строго говоря, поперечными. Частицы воды движутся не под действием сил упругости, а под действием сил тяжести и поверхности натяжения и перемещаются не в вертикальном направлении, а примерно по эллиптическим или круговым траекториям. Форма волн на поверхности воды отличается от синусоидальной: для нее характерны длинные пологие впадины и крутые короткие горбы.

В отличие от упругих волн скорость распространения волн на поверхности воды и любой другой жидкости зависит от длины волны (дисперсия волны). Скорость распространения волн возрастает с увеличением их длины. Это надо иметь в виду при решении и особенно при составлении задач.

Следует также особо подчеркнуть, что при распространении волны не происходит переноса вещества: колеблющиеся частицы не изменяют положения своего равновесия. Однако передача энергии при волновом движении происходит. Впервые представление о распространении энергии волной было введено известным русским физиком Н. А. Умовым (см. задачу, № 19).

3. Стоячие волны

Стоячие волны возникают при сложении двух колебаний, вызванных падающей и отраженной волной. Образование стоячих волн демонстрируют, приводя шнур в колебание с помощью электродвигателя с эксцентриком или просто рукой (рис. 64).

Для пояснения свойств стоячей волны и ее отличий от волны бегущей полезно использовать следующую модель (рис. 65).

Тонкую и длинную трубку *a* изгибают по синусоиде и продевают сквозь нее шнур *b*. Натянув шнур, двигают по нему трубку, например

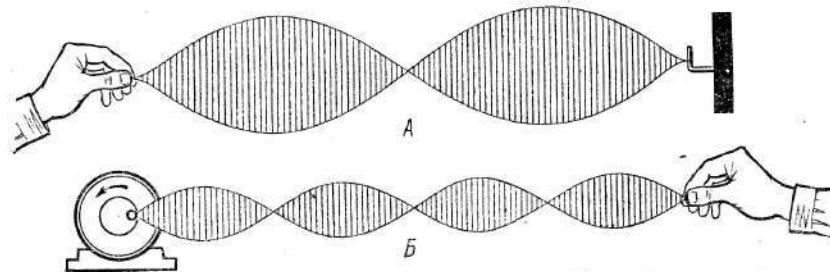


Рис. 64. Стоячие волны в шнуре.

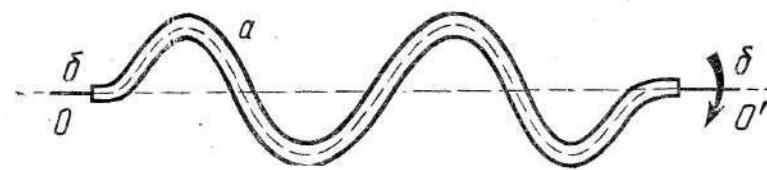


Рис. 65. Демонстрация бегущей и стоячей волны с помощью изогнутой трубки и шнура.

мер, слева направо, имитируя распространение бегущей волны с некоторой скоростью \tilde{C} . Затем ту же трубку вращают вокруг оси $O O'$ и наблюдают синфазное изменение амплитуд соответствующих точек стоячей волны.

Обе демонстрации особенно выразительны в теневой проекции. С помощью опытов и поясняющих их чертежей устанавливают, что расстояние между соседними узлами и пучностями равно $\frac{1}{2} \lambda$; все точки между соседними узлами колеблются в одной фазе; переноса энергии в стоячей волне в отличие от бегущей нет. При более обстоятельном варианте изложения материала необходимо использовать уравнение волны.

При этом предварительно заметим, что для образования стоячих волн необходимо, чтобы обе — падающая и отраженная — волны были одинаковыми по интенсивности. А это значит, что потери энергии при отражении волны от препятствия должны быть пренебрежимо малы. Такой преградой в идеальном случае может быть абсолютно неподвижная стенка или вакуум. В реальных условиях такому требованию удовлетворяют границы раздела многих сред. Проникновение энергии колебаний из одной среды в другую пропорционально отношению «акустических сопротивлений» (ρC) сред и в процентах может быть вычислено по приближенной формуле $\beta = 4 \cdot \frac{\rho_1 C_1}{\rho_2 C_2} \cdot 100\%$. Так, например, из воздуха в воду может

$$\text{проникнуть всего примерно } 4 \cdot \frac{330 \frac{\text{м}}{\text{с}} \cdot 1,29 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \cdot 100\%}{1440 \frac{\text{м}}{\text{с}} \cdot 1000 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}} \approx 0,1\%$$

энергии звуковых колебаний. Наконец, необходимо, чтобы направление распространения волн было нормально в той поверхности, от которой они отражаются.

Рассмотрим теперь материальную точку, расположенную около границы преграды. Эта точка из-за сопротивления стенки свободно колебаться не может. Поэтому около преграды должен образоваться узел стоячей волны, что и имеет место на самом деле. С другой стороны, явление можно объяснить и таким образом. Как показывает опыт, точка у стенки остается в покое, хотя на нее действуют падающая и отраженная волны. Следовательно, колебания этих волн находятся в противофазе (сдвиг фаз $\Delta\phi = \pi$). Обычно принято

говорить, что при отражении происходит «потеря» полуволны или поворот фазы на π .

Причина этого заключается в том, что импульс смещений отражается от закрепленного конца с изменением знака.

Рассмотрим далее колебание любой другой точки шнура, расположенной на расстоянии x от вибратора. Падающая волна проходит расстояние x , а отраженная — $2l - x$, где l — длина шнура. Следовательно, уравнения падающей и отраженной волн примут вид:

$$y_1 = A \cos \omega \left(t - \frac{x}{c} \right);$$

$$y_2 = -A \cos \omega \left(t - \frac{2l-x}{c} \right).$$

(Знак «минус» поставлен для того, чтобы учесть изменение фазы на π при отражении волны.)

Уравнение результирующего колебания можно записать так:

$$\begin{aligned} y = y_1 + y_2 &= A \cos \omega \left(t - \frac{x}{c} \right) - A \cos \omega \left(t - \frac{2l-x}{c} \right) = \\ &= 2A \sin \omega \left(\frac{l-x}{c} \right) \cdot \sin \omega \left(t - \frac{l}{c} \right). \end{aligned}$$

Величина $2A \sin \omega \left(\frac{l-x}{c} \right)$ является амплитудой стоячей волны.

Для каждой точки стоячей волны с координатой x эта величина постоянная. Но она изменяется по синусоидальному закону от точки к точке.

Амплитуда стоячей волны равна нулю, когда аргумент синуса составляет число, кратное π , т. е. $\omega \left(\frac{l-x}{c} \right) = n\pi$, где n — нуль или любое целое число. Отсюда $x = l - \frac{n\lambda}{2}$. Следовательно, первый узел образуется на конце шнура ($n = 0$), а все последующие на расстоянии полуволны друг от друга.

Аналогично нетрудно установить, что первая пучность (максимум амплитуды) находится на расстоянии $\frac{\lambda}{4}$ от закрепленного конца и расстояние между ближайшими пучностями составляет $\frac{\lambda}{2}$.

Колебание отдельно взятой точки в бегущей и стоячей волнах подчиняется одному и тому же синусоидальному закону. И в этом отношении бегущая и стоячая волны неразличимы. Различие обнаруживается при сравнении колебаний «соседних» точек. В бегущей волне согласно уравнению $y = A \cos \omega \left(t - \frac{x}{c} \right)$ «соседние» по направлению распространения колебаний точки колеблются с одинаковой амплитудой A , но имеют разные координаты x и, сле-

довательно, разные фазы $\omega \left(t - \frac{x}{c} \right)$. Чем дальше точка от вибратора, тем больше ее колебания отстают по фазе.

В стоячей же волне, как видно из уравнения

$$y = 2A \sin \omega \left(\frac{l-x}{c} \right) \cdot \sin \omega \left(t - \frac{l}{c} \right),$$

амплитуда меняется от точки к точке, достигая максимума (2 А) в пучностях и оставаясь все время равной нулю в узлах. Что же касается фазы колебаний $\omega \left(t - \frac{l}{c} \right)$, то она не зависит от расстояния x и, следовательно, одинакова у всех точек. Точнее, синфазно колеблются все точки, лежащие между соседними узлами. При переходе же через узел фаза меняется на π .

4. Стоячие волны как свободные колебания тел

Создавая от руки стоячие волны в шнуре, можно обнаружить, что амплитуда колебаний зависит как от размаха руки, так и от ее расположения по отношению к ближайшему узлу.

При заданном определенном размахе руки максимальная амплитуда колебаний в пучности будет тем больше, чем меньше расстояние вибратора от ближайшего узла.

В идеальном случае в «чистой» стоячей волне переноса энергии нет. В реальных же условиях в любой точке из-за потерь энергии амплитуда падающей волны всегда больше амплитуды волны отраженной. Поэтому точки в узлах тоже совершают небольшие колебания, поддерживающие как раз и возможно наиболее выгодным с энергетической точки зрения образом поддерживать стоячие волны. Подводимая энергия расходуется на восполнение потерь в стоячей волне (резонанс). Если бы эти потери энергии были невелики, то колебания могли многократно распространяться по шнуре в обоих направлениях, образуя стоячую волну. В ряде случаев это на самом деле имеет место при колебаниях, например, камертонов и струн. Все, что было сказано о стоячих волнах в шнуре, проще всего применить именно для колебаний струн. На концах струны всегда образуются узлы. Количество же пучностей может быть самым различным, но всегда таким, чтобы на струне уложилось целое число n полуволни: $l = n \frac{\lambda}{2}$.

Соответствующие этим длишам волны частоты колебаний называют собственными частотами. Так как $\lambda = CT = \frac{C}{v}$, то $l = \frac{nC}{2v}$, откуда $v = \frac{C}{2l} n$, где C — скорость распространения бегущей волны по струне.

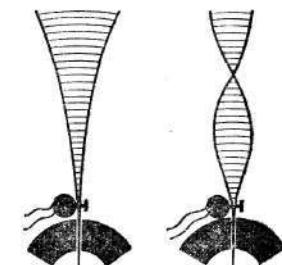


Рис. 66. Стоячие волны в упругой пластинке.

При отражении волны от «свободной» границы сред из изменения фазы не происходит¹. На свободной границе ничто не мешает колебанию частиц, и поэтому здесь образуется пучность стоячей волны. Примером такого рода колебаний являются свободные колебания ножек камертонов или упругой пластинки, зажатой в тиски (рис. 66). Для опыта в тиски зажимают деревянную рейку длиной 1—2 м и приводят ее в колебание с помощью прикрепленного к ней электромоторчика с эксцентриком.

5. Волны в сплошной среде

При изучении и описании волн в сплошных средах, например в воде или воздухе, используют те же закономерности и понятия, которые установлены для «одномерных» волн, распространяющихся, например, в стержнях или струнах. Вместе с тем здесь имеют место некоторые специфические закономерности, требующие введения новых понятий.

К таким понятиям относятся «волновая поверхность», «луч», «плотность энергии» и «интенсивность волны».

При изучении волн в среде используют опыты с волновой ванной (рис. 67).

Чередующиеся светлые и темные полосы на экране, создающие образ бегущей волны, получаются благодаря тому, что пучности (впадины) на поверхности воды действуют подобно цилиндрическим линзам, собирая (рассевяя) падающий на них свет.

Укрепив на вибраторе (рис. 67) пластинку, сначала получают «плоскую волну».

Все частицы, находящиеся в одной плоскости, параллельной пластинке вибратора, например на гребне или впадине волны, колеблются в одной фазе. Поэтому такие поверхности и называют поверхностями равной фазы или волновыми поверхностями. Каждая такая поверхность перемещается в пространстве с фазовой скоростью, которую и называют скоростью распространения волны в данной среде.

В каждый момент времени скорость распространения волны направлена по нормали к волновой поверхности. Используя этот факт, вводят понятие луча как «линии, касательная к которой в каждой точке совпадает с направлением распространения волны в этой точке» [9, с. 92].

С помощью волновой ванны известным образом поясняют также образование сферических волн. В идеальном случае шаровую волну дает пульсирующая сфера. Практически же на достаточноном расстоянии от любого «точечного» источника (свистка, колокола и т. п.) в однородной среде волны можно считать сферическими.

Изменение энергии волны в общем случае происходит по двум

¹ Для звуковых волн отражение на границе двух сред с потерей и без потери полуволны происходит соответственно при условии: $\rho_2 C_2 > \rho_1 C_1$ и $\rho_2 C_2 < \rho_1 C_1$.

причинам: энергия рассеивается в пространстве; энергия превращается во внутреннюю энергию среды из-за действия сил трения.

Для звуковых волн потери энергии вследствие вязкости среды (сил трения) прямо пропорциональны квадрату их частоты.

Если бы не было сил трения, то плоская волна распространялась сколь угодно далеко без потери энергии. Это значит, что плотность энергии, т. е. потенциальная и кинетическая энергия колеблющихся частиц единицы объема и поток волновой энергии за единицу времени через единицу поверхности, перпендикулярную лучу, оставались бы неизменными.

Данные понятия в ознакомительном плане можно пояснить в процессе решения следующей задачи.

Задача * 19. Рассчитайте, какое количество энергии перенесет плоская волна через единицу поверхности, перпендикулярную направлению ее распространения за 1 с, если максимальная амплитуда смещения колеблющихся частиц A , масса каждой частицы m , скорость волны C , частота v . Потерями энергии на трение пренебречь.

Решение. Энергия колеблющейся частицы равна $\frac{mv^2}{2}$, где $v = A\omega$. Допустим, что в 1 м^3 содержится n частиц. Тогда плотность энергии

$$E = n \frac{mv^2}{2} = \frac{\rho v^2}{2} = \frac{\rho \omega^2 A^2}{2} = 2\pi^2 \rho v^2 A^2,$$

За 1 с волна распространяется на расстояние, численно равное скорости C , и перенесет через единицу поверхности энергию, численно равную

$$I = EC = \frac{\rho v^2}{2} C = 2\pi^2 \rho C v^2 A^2,$$

где I — интенсивность волны.

Как видно из формулы, интенсивность волны пропорциональна квадрату частоты и амплитуды и зависит от величины волнового сопротивления ρC . Поскольку скорость \vec{C} — вектор, величина $\vec{I} = \frac{1}{2} \rho A^2 \omega \vec{C}$ также является векторной. Она носит название вектора Умова.

Известный русский физик профессор Московского университета Николай Алексеевич Умов (1846—1915) впервые решил задачу о движении энергии в жидкостях и твердых телах постоянной упругости (1874). Но установленные Н. А. Умовым закономерности и введенные им понятия потока энергии, плотности энергии и др. оказались применимыми гораздо более широкому классу явлений, связанных с передачей энергии. В применении к

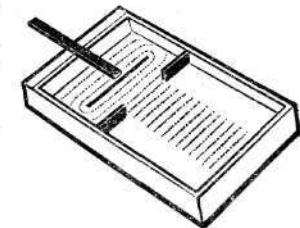


Рис. 67. Плоская волна в волновой ванне.

электромагнитному полю (гл. IV, 3) идеи Н. А. Умова развил английский физик Пойнтинг (1884).

Используя понятие потока энергии, рассмотрим сферическую волну. Сферическая волна по мере своего распространения от вибратора занимает все большее пространство. Поэтому интенсивность ее убывает. Это обстоятельство, по крайней мере при повторении, желательно выяснить не только качественно, но и с помощью расчетов, решив, например, следующую задачу.

Задача 20. Пульсирующая сфера радиуса R_0 создает волны частоты ω с амплитудой A_0 . Какова интенсивность I и амплитуда волны A на расстоянии R от центра сферы? Скорость распространения волны C .

Решение. Интенсивность волны у поверхности сферы $I_0 = \frac{1}{2} \rho C A_0^2 \omega^2$. Следовательно, полный поток энергии Q через сферическую поверхность S_0 радиуса R_0 равен: $Q = I_0 S_0 = \frac{1}{2} \rho C A_0^2 \omega^2 \cdot 4\pi R_0^2$. Пренебрегая потерями энергии в среде, на основе закона сохранения энергии можно заключить, что эта энергия Q пройдет через сферическую поверхность и большего радиуса R :

$$Q = I_0 S_0 = IS,$$

где $S = 4\pi R^2$. Следовательно,

$$I = \frac{\frac{1}{2} \rho C A_0^2 \omega^2 \cdot 4\pi R_0^2}{4\pi R^2} = \frac{1}{2} \rho C \frac{A_0^2 R_0^2}{R^2} \omega^2.$$

Из этой формулы следует, что интенсивность волны убывает обратно пропорционально квадрату расстояния от центра пульсирующей сферы. Выражение $\frac{A_0^2 R_0^2}{R^2}$ — квадрат амплитуды колебаний A

на расстоянии R . Поэтому $A = \frac{A_0 R_0}{R}$. Амплитуда колебаний обратно пропорциональна расстоянию от центра пульсирующей сферы.

6. Звуковые волны

Звуковыми волнами, в широком смысле этого слова, называют упругие волны, распространяющиеся в сплошных средах. Ту часть звуковых волн, которая воспринимается человеческим ухом (16—20 000 Гц), обычно называют звуком. В повседневной жизни это чаще всего волны, распространяющиеся в воздухе. Однако звук распространяется и в других упругих средах: земле, металлах и т. д. Погрузившись с головой в воду, можно издали отчетливо слышать стук двигателя приближающегося катера. Общеизвестно обнаружение по звуку в воде надводных кораблей и подводных лодок. При осаде в крепостных стенах помещали «слушачей», которые следили за земляными работами противника. Иногда это были сле-

пы, у которых особенно обострен слух. По звукам, передающимся в Земле, был, например, своевременно обнаружен подкоп врага к стенам Загорского монастыря. Распространение волн в металлах наглядно видно на примере звуков, передающихся по рельсам или водопроводным трубам.

Благодаря наличию у человека органа слуха он получает из окружающей среды с помощью звуков большую и разнообразную информацию. Посредством звуков осуществляется также человеческая речь. Поэтому учение о звуке представляет собой особую часть учения о колебаниях и волнах, называемую акустикой. Из специфических вопросов акустики в средней школе изучают источники звука, распространение звука в различных средах, физические и физиологические характеристики звука.

Понятие о том, что источниками звука служат колеблющиеся тела, дают с помощью демонстрации звучащих пластин, камертонов, струн и т. п. А роль упругой промежуточной среды, в первую очередь воздуха, показывают с помощью известного опыта с электрическим звонком, помещенным под колокол воздушного насоса [9, рис. 92]. Получить, однако, полного прекращения звучания звонка со школьным оборудованием не удается, поэтому опыт показывают в следующем приближении.

С помощью насоса Комовского добиваются возможно большего разрежения (1—2 см рт. ст.) и наблюдают некоторое ослабление звука. Затем впускают воздух под колокол и наблюдают усиление звука. Для того чтобы уменьшить передачу звука, звонок следует поставить на войлокнюю или пробковую подставку. Желательно также источник питания (батарейку) поставить под колокол насоса, чтобы исключить передачу колебаний наружу по подводящим проводам.

7. Интенсивность [сила] звука. Звуковое давление

Для того чтобы человеческое ухо воспринимало звуковые колебания, они должны, во-первых, иметь частоту в пределах 16—20 000 Гц и, во-вторых, обладать определенной интенсивностью, или, говоря физиологическими терминами, громкостью. Наиболее чувствительно ухо к частотам от 1000 до 4000 Гц. При 1000 Гц порог слышимости, т. е. наименьшая интенсивность, или сила звука, который едва улавливается ухом, составляет примерно 10^{-9} эрг/см² · с (10^{-12} Вт/м²). При силе звука $I = 10^3$ — 10^4 эрг/см² · с возникают болевые ощущения.

Для создания представлений о колебаниях в звуковой волне различной интенсивности полезно решить следующую задачу.

Задача 21. Едва слышимый шепот при 1000 Гц имеет силу звука $I_0 = 10^{-9}$ эрг/(см² · с), а громкая речь дает волну с силой звука $I = 10^{-2}$ эрг/(см² · с). Определите для этих случаев максимальную скорость и амплитуду смещения частиц в звуковой волне для воздуха при нормальных условиях.

Решение. Сила звука

$$I = \frac{\rho v^2}{2} C.$$

Максимальная скорость колебательного движения частиц в первом случае

$$v_1 = \sqrt{\frac{2I}{\rho C}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 10^{-9} \frac{\text{эрг}}{\text{см}^2 \cdot \text{с}}}{0,00129 \frac{\text{г}}{\text{см}^3} \cdot 331 \cdot 10^2 \frac{\text{см}}{\text{с}}}} = 6,9 \cdot 10^{-6} \text{ см/с.}$$

Амплитуда колебаний

$$A_1 = \frac{v_1}{\omega} = \frac{v_1}{2\pi\nu} = \frac{6,9 \cdot 10^{-6} \frac{\text{см}}{\text{с}}}{2 \cdot 3,14 \cdot 1000 \frac{1}{\text{с}}} = 10^{-9} \text{ см.}$$

Для второго случая аналогично найдем:

$$v_2 = 2,2 \cdot 10^{-2} \text{ см/с и } A_2 = 3,2 \cdot 10^{-6} \text{ см.}$$

Нужно обратить внимание на то, что частицы воздуха при звуковых колебаниях смещаются на незначительные расстояния, которые могут быть соизмеримы с размерами молекул, а максимальная скорость их колебательного движения может быть в сотни и даже миллионы раз меньше скорости звука.

Полезно также рассчитать энергию, которую приносит звуковая волна за определенное время.

Задача 22. Громкая речь создает силу звука $I = 10^{-5} \text{ Вт/м}^2$. Какую энергию передаст звуковая волна такой интенсивности в течение часа? Расстояние до говорящего человека принять равным 10 м.

Решение. Будем считать звуковые волны сферическими. Поток энергии $Q = IS = I \cdot 4\pi R^2$. Полная энергия звука за час составит:

$$W = IST = 10^{-5} \text{ Вт/м}^2 \cdot 4 \cdot 3,14 \cdot 10^2 \text{ м}^2 \cdot 3600 \text{ с} = 45 \text{ Дж.}$$

Нетрудно подсчитать, что этой энергией можно нагреть стакан воды всего на $0,05^\circ \text{C}$.

Измерение энергии, переносимой звуковой волной, обычно проводят не непосредственно, а с помощью предварительно измеренного звукового давления. Звуковые колебания создают сжатия и разрежения в упругой среде. Колебания давления относительно некоторого среднего (для воздуха — атмосферного) давления и есть звуковое давление. Оно изменяется по синусоидальному (косинусоидальному) закону $\Delta p = \rho \omega A C \cos \omega \left(t - \frac{x}{c} \right)$. Поскольку среднее за период значение $\Delta p = 0$, употребляют среднеквадратичное или действующее значение звукового давления, которое обычно

для краткости называют «звуковым давлением». Его и измеряют на практике. По аналогии с действующим значением тока и напряжения можно заключить, что действующее значение звукового давления в $\sqrt{2}$ раз меньше амплитуды звукового давления. В единицах СИ звуковое давление измеряется в пьютонах на метр квадратный (Н/м^2). Кроме того, применяют единицу, называемую баром: 1 бар $= 10^5 \text{ Н/м}^2$.

Для создания соответствующих представлений о звуковом давлении полезно решить следующую задачу.

Задача 23. Рассчитайте звуковое давление, создаваемое в воздухе громкой речью.

Решение. Действующее значение звукового давления $\Delta p = \frac{\rho \omega A C}{\sqrt{2}}$. Используя данные задачи 21, найдем:

$$\Delta p = 0,71 \cdot 129 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \cdot 2\pi \cdot 1000 \frac{1}{\text{с}} \cdot 3,2 \cdot 10^{-8} \text{ м} \cdot 331 \frac{\text{м}}{\text{с}} \approx \\ \approx 6 \cdot 10^{-2} \frac{\text{Н}}{\text{м}^2} \approx 6 \cdot 10^{-5} \text{ атм.}$$

Следовательно, звуковое давление в воздухе в данном случае значительно меньше атмосферного. Даже для громких звуков, например создаваемых реактивными самолетами, оно составляет всего лишь около 1% от атмосферного давления.

Звуковое давление используется в различных приемниках звука, большинство из которых представляет собой закрепленные в оправах мембранны. Примером может служить мембрана угольного микрофона. Весьма чувствительным приемником звука является слуховой аппарат человека, важной частью которого является мембрана — барабанная перепонка. Ухо способно принимать звуковые колебания, отличающиеся по амплитуде в 10^7 раз и, следовательно, в 10^{14} раз по энергии.

Причина колебания элементов датчиков звука качественно понятна: это изменения давления или скорости частиц в волне.

Опыт, однако, показывает, что звуковые волны способны вызывать и поступательное движение тел, оказывая на них давление, отличное от рассмотренного давления Δp , которое не может вызвать поступательного перемещения тел, так как его среднее значение за период равно 0.

Объясняется это тем, что силы упругости не точно следуют закону Гука: $F = -kx$, который является в большинстве случаев хорошим, но все же только первым приближением. Приближение будет тем точнее, чем меньше x по сравнению с длиной волны. Для звуковых волн это означает также малость Δp по сравнению с атмосферным давлением [5, с. 231].

Значительные отклонения от указанных условий возникают, например, при взрывах, когда звуковое давление Δp может в тысячи раз превышать атмосферное давление. Поэтому для газов

различают звуковые и ударные волны, которые обладают целым рядом специфических свойств. В частности, скорость распространения ударных волн зависит от амплитуды давления. По мере распространения в среде амплитуда давления убывает и скорость постепенно уменьшается до обычного своего значения. Примерами ударных волн служат дульная волна, возникающая при выстреле артиллерийского орудия, мощная ударная волна, которая образуется при переходе самолетом звукового барьера, и даже щелканье кнута.

8. Скорость звука

При изучении данной темы главное внимание обращают на методы измерения скорости звука в разных средах. Желательно также показать зависимость скорости звука от температуры среды.

Для измерения скорости звука в лабораторных условиях можно прежде всего использовать стоячие волны в воздушных столбах. Нетрудно, например, используя мензурку *a* с водой (рис. 68), трубку *b*, камертон *v* известной частоты *v* и линейку, определить скорость звука в воздухе.

Обычно обнаруживают первую пучность стоячей воды, для которой высота воздушного столба $l = \frac{1}{4} \lambda$, откуда находят:

$$C = \lambda v = 4lv.$$

Скорость звука в газах зависит от температуры. Поэтому в справочных таблицах всегда указывают, при какой температуре скорость звука имеет то или иное значение. В связи с этим в ознакомительном плане полезно решить следующую задачу.

Задача 24. Скорость звука в газе можно рассчитать по формуле

$$C = \sqrt{\gamma \frac{p}{\rho}}, \text{ где } \gamma = \frac{C_p}{C_V}.$$

Покажите, как зависит скорость звука от температуры *T* и молекулярной массы μ газа. Рассчитайте скорость звука *C* в воздухе при 0 и 15° С. ($\gamma_{\text{вз}} = \frac{7}{5}$; $\mu = 29$.)

Решение. Из уравнения Менделеева — Клайперона найдем, что $\rho = \frac{p\mu}{RT}$. Подставив значение ρ в данную по условию формулу, получим:

$$C_0 = \sqrt{\frac{\gamma RT}{\mu}} = \sqrt{\frac{7 \cdot 8,31 \cdot 10^3 \frac{\text{Дж}}{\text{кмоль} \cdot \text{К}} \cdot 273 \text{К}}{5 \cdot 29}} \approx \\ \approx 330 \text{ м/с}; C_{15} \approx 340 \text{ м/с.}$$

Полезно обратить внимание на то, что скорость звука в газе близка по модулю к скорости теплового движения молекул.

Интересно отметить, что ученые долгое время подвергали сом-

нению «звукопроводность» жидкостей, так как предполагали, что жидкости несжимаемы и поэтому звуковые колебания в них распространяться не могут. Это заблуждение было устранено классическими опытами по определению скорости звука на Женевском озере, выполненными в 1827 г. Колладоном (1802—1892) и Ж. Штурмом (1803—1855) [37, с. 206]. Описание этого опыта дано в учебнике «Физика-10». Следует также обратить внимание на несколько неожиданный для учащихся результат: скорость звука в воде (1435 м/с при 8° С) примерно втрое больше, чем в воздухе.

Скорость звука в жидкостях также зависит от температуры, но зависимость эта более сложная, чем для газов. Скорость звука в большинстве жидкостей уменьшается с повышением температуры. Исключение представляет вода, скорость звука в которой с повышением температуры на 1° С увеличивается на 2,5 м/с.

С одним из возможных способов определения скорости звука в твердых телах (металлах) можно познакомить учащихся на примере следующей задачи.

Задача 25. Скорость звука в чугуне впервые была определена французским ученым Бю следующим образом. У одного конца чугунной трубы ударяли в колокол, у другого конца наблюдатель слышал два звука: сначала — один, пришедший по чугуну, а спустя некоторое время — второй, пришедший по воздуху. Длина трубы была 930 м, промежуток времени между распространением звуков оказался равным 2,5 с. Найдите по этим данным скорость звука в чугуне. Скорость звука в воздухе принять равной 340 м/с.

Решение. Звук в однородной среде распространяется в соответствии с формулой $s = Ct$. Время распространения звука в воздухе $t_v = \frac{s}{C_v}$, в чугуне $t_q = \frac{s}{C_q}$. По условию $t_v - t_q = 2,5$ с. Подставив в эту формулу значения величин, получим: $C = 3950$ м/с.

На данном примере видно, что скорость звука в твердых телах значительно больше, чем в жидкостях и газах. Причина этого — их большая упругость.

Наконец, следует особо подчеркнуть, что во всех рассмотренных выше случаях распространения звука мы совершенно не интересовались его частотой. Причина этого — отсутствие в обычных условиях дисперсии звука. Для закрепления данного понятия полезно решить следующие задачи.

Задача 26. Кривая, изображенная на рисунке 69, показывает, как изменяется длина звуковой волны в железе от частоты колебаний (при $t = 20^\circ \text{ С}$). Определите по графику скорость распространения звука в железе. Зависит ли скорость звука от длины волны?

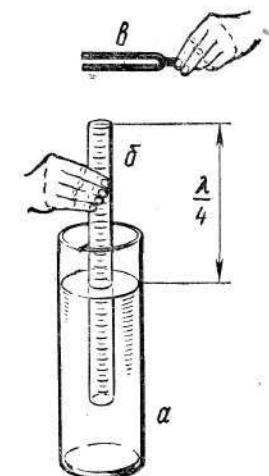
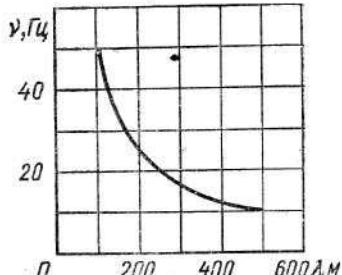


Рис. 68. Определение скорости звука в воздухе с помощью стоячей волны в мензурке.



Решение. Определим скорость звука для длин волн 100, 200 и 500 м:

$$C_1 = 100 \text{ м} \cdot \frac{1}{50 \text{ с}} = 5000 \text{ м/с};$$

$$C_2 = 200 \text{ м} \cdot \frac{1}{25 \text{ с}} = 5000 \text{ м/с};$$

$$C_3 = 500 \text{ м} \cdot \frac{1}{10 \text{ с}} = 5000 \text{ м/с}.$$

Рис. 69. График $\lambda = f(v)$.

Следовательно, скорость звука в железе (так же как и в других средах) не зависит от длины волн.

Задача 27. Через воду, землю и даже сталь можно слышать без изменения тональности звуки, которые раздаются в воздухе. Как это объяснить, ведь частота $v = \frac{C}{\lambda}$, а скорость звука в воде и тем более в стали в несколько раз больше, чем в воздухе?

Ответ. Скорость распространения колебаний возрастает во столько же раз, во сколько увеличивается длина волны. Поэтому частота колебаний не изменяется.

9. Музыкальные звуки

Восприятие звуков играет огромную роль в жизни человека. Их значение не ограничивается только той информацией, которую они дают непосредственно об окружающем мире и через слово. Всякие ощущения, в том числе и ощущение звука, имеют еще эмоциональный тон, влияющий на настроение и, следовательно, жизнедеятельность человека.

С этой точки зрения одни звуки считают неприятными, а другие приятными, или «музыкальными». Для музыкальных звуков характерна вполне определенная периодичность колебаний. Звуки, лишенные такой периодичности, воспринимаются как шумы. Эмоциональное воздействие звуков зависит также от их сочетания.

При одновременном восприятии двух звуков они кажутся благозвучными, когда их частоты выражаются отношением малых целых чисел: 2 : 1, 3 : 2, 5 : 4 и т. д. (консонанс). Чем проще это отношение, тем благозвучнее сочетание.

Три звука образуют благозвучное «мажорное трезвучие» в том случае, если их частоты относятся как 4 : 5 : 6.

Частота колебаний определяет высоту звука. Чем больше частота колебаний, тем более высоким представляется человеку тон.

В музыке весьма существенную роль играет отношение частот применяемых тонов, называемое интервалом.

Интервал, равный 2, называют октавой. Первая октава содержит частоты от 16 до 32 Гц, вторая до 64 Гц и т. д., всего 10 октав.

В музыке принято следующее обозначение и название октав:

-1	0	1	2	3	4	5	6	7	8
Субконтрактава	Контрактава	Большая октава	Малая октава	Первая октава	Вторая октава	Третья октава	Четвертая октава	Пятая октава	Шестая октава

В пределы каждой октавы включаются добавочные тона, которые по указанным выше причинам выражаются простыми целочисленными отношениями, приведенными в нижеследующей таблице. В этой таблице дано и название тонов. Обозначение тона, например, do_3 обозначает, что это тон до первой или средней октавы.

do_3	re_3	mi_3	fa_3	sol_3	la_3	si_3	do_4
1	$9/8$	$5/4$	$4/3$	$3/2$	$5/3$	$15/8$	2
24	27	30	32	36	40	45	48

Числа 24, 27 и т. д., приведенные в нижнем ряду, являются относительными числами колебаний. Такую последовательность тонов, при которой первый и последний составляют октаву, называют гаммой. Эта гамма носит название чистой или натуральной. Обратим внимание на то, что интервалы между различными тонами неодинаковы ($27 : 24 = 9/8 = 1,125$; $30 : 27 = 1,11$ и т. д.). Это создает неудобства, так как невозможно исполнение музыкального произведения с любого тона октавы. В связи с этим применяют так называемый темперированный строй, при котором октаву делят не на 6, а на 12 и притом равных интервалов (полутонов). Частота каждого последующего полутона больше предыдущего в $\sqrt[12]{2} \approx 1,06$ раз.

Последовательность частот полутонов октавы темперированного строя с точностью до четырех значащих цифр выражается следующими относительными числами:

$$24; 25,42; 26,92; 28,50; 30,18 \text{ и т. д.}$$

Числа 25,42; 28,50 и др. характеризуют частоту полутонов (черные клавиши рояля). Небольшие отклонения от натурального строя (соответственно числа 27 и 26,92; 30 и 30,18) существенного значения для отмеченных выше правил благозвучия не имеют.

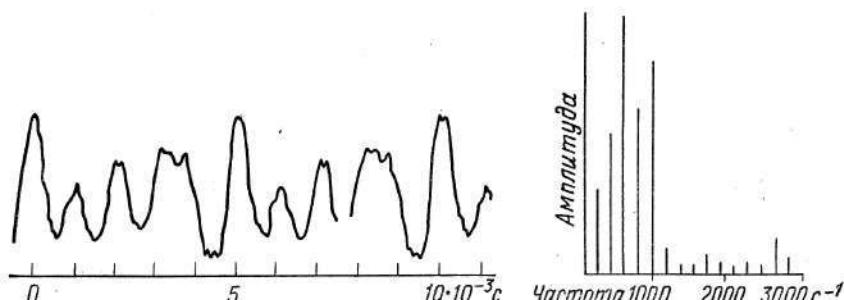


Рис. 70. Спектр гласного звука.

Для установления абсолютного значения частот отдельных тонов пользуются стандартным «нормальным камертоном». Поскольку музыкальные инструменты настраивают на определенную частоту со средней октавы, в качестве эталонной частоты «нормального камертоном» сейчас во всем мире принята частота $v = 440$ Гц¹.

Самый низкий тон субконтрактавы do_1 , имеет частоту около 16 Гц. Самый низкий тон рояля $la_1 \approx 27$ Гц.

Басовая низкая нота человеческого голоса соответствует частоте 80 Гц, а высокая нота (сопрано) около 1300 Гц.

К субъективным характеристикам звука, помимо громкости и высоты, относится также тембр звука.

Музыкальные звуки чаще всего создаются колебаниями сложной формы, которые согласно теореме Фурье можно представить как сумму синусоидальных колебаний различной частоты. При этом в силу особенностей слухового аппарата человека приписывает сложному звуку такой тон, частота которого является наименьшей (основной). Более же высокие составляющие (обертоны) создают только отличительную окраску, или тембр звука, зависящий от интенсивности гармоник. Разность же фаз между составляющими звука роли не играет. «Высокие обертоны придают тембру «блеск», «яркость» и «металличность»; низкие дают характер «мощности» и «сочности». Звуки простых тонов, даваемых камертонами, имеют

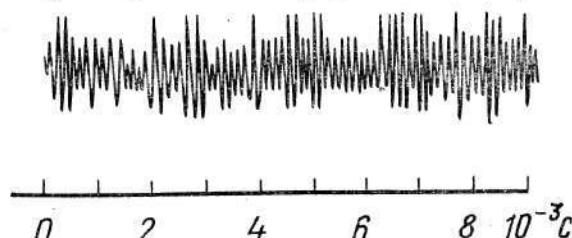


Рис. 71. Спектр согласного звука.

¹ Ранее музыканты и физики в разных странах применяли и другие значения эталона для la_3 : 426,6; 435 и 450 Гц.

очень «бледный», «бесцветный» тембр, мало интересный в музыкальном отношении. Различие друг от друга отдельных гласных основано на способности человека оценивать тембр звука¹.

Подключив микрофон к электронному осциллографу, следует показать учащимся форму кривых, которые получаются при длительном звуке гласных и согласных. Акустический спектр показывает, например, «что в звуке «а» имеется до четырнадцати обертонов, из которых особенно сильны первые четыре. Их амплитуда значительно больше, чем у основного тона. В звуке «и» самый сильный тон основной, затем сильно звучат верхние обертоны с частотами около 3100 колебаний в секунду»² (рис. 70).

Кривые согласных, например буквы «с», весьма сложны и дают спектр (рис. 71) с огромным числом линий.

10. Инфра- и ультразвуки

В процессе эволюции у человека вырабатывалась способность воспринимать лишь жизненно важные звуки, ограждая первичную систему от незначительных по интенсивности звуков, не превышающих нижний абсолютный порог чувствительности, а также от звуков, частоты колебаний которых лежат за пределами интервала 16—20 000 Гц (инфра- и ультразвуки). Важной характеристикой звука служит и верхний абсолютный порог чувствительности, который характеризует максимальную силу раздражителя, способную вызвать болевое ощущение и, следовательно, опасную для организма.

Тот факт, что инфра- и ультразвуки не воспринимаются слухом так же, как и любые звуки, интенсивность которых меньше нижнего порога чувствительности, не означает, что они вообще не влияют на организм человека. «Еще в 1929 году американский физик Роберт Вуд обнаружил ... странное свойство инфразвуковых колебаний — способность вызывать у людей панический страх»³.

Действуют на организм человека и ультразвуки. Надо также иметь в виду, что неслышимые человеком инфра- и ультразвуки хорошо слышат и используют некоторые виды животных.

Для получения ультразвуков чаще всего применяют пьезоэлектрический эффект и магнитострикцию.

Пьезоэффект (прямой) состоит в том, что при сжатии или растяжении пластинки, вырезанной из кристалла горного хрусталия, сегнетовой соли или некоторых других кристаллов, на ее гранях появляются электрические заряды. Если в такой пластинке создать продольные колебания, то на ее гранях будут периодически образовываться электрические заряды противоположных знаков.

¹ Папалекси Н. Д. Курс физики, т. I. М., 1948, с. 375.

² Арцыбышев С. А. Физика. М., 1950, с. 296.

³ Иосифов К. Ревущий бархан.— «Юный натуралист», 1973, № 9.

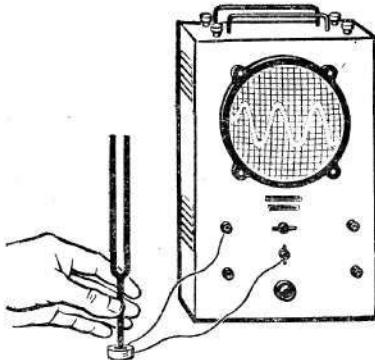


Рис. 72. Демонстрация прямого пьезоэффекта.

напряжение, то пластинка начнет сжиматься и растягиваться, совершая вынужденные колебания.

Для демонстрации обратного пьезоэффекта излучатель подключают к выходу звукового генератора и, плавно изменяя частоту, получают все более высокие звуки вплоть до едва слышимых, переходящих в ультразвук, [17, т. I, опыт 91].

Для обнаружения ультразвука на излучатель помещают плоскую кювету с водой, в которую добавляют крахмал (0,3 г крахмала на 10 мл воды). При проекции на экран с помощью оптической скамьи получают четкую картину стоячих ультразвуковых волн, позволяющую измерить длину волны [17, т. I, опыт 92].

Ультразвуковые волны обладают рядом специфических свойств, благодаря которым они находят широкое применение на практике. Так, ультразвуковые волны позволяют получать направленные звуковые пучки (чем меньше длина волны по сравнению с вибратором, тем большую направленность имеет луч). Это свойство используют, в частности, в эхолокации и дефектоскопии.

Первый локатор был сконструирован известным французским физиком П. Ланжевеном во время первой мировой войны для обнаружения немецких подводных лодок.

С помощью ультразвуковых локаторов можно просто и быстро исследовать рельеф dna океана. Соединенный с локатором самописец сразу вычерчивает профиль dna под килем судна.

С помощью звуколокатора советские ученые исследовали дно мировых океанов, открыв новые подводные впадины и горы, например огромный хребет в Северном Ледовитом океане, названный хребтом Ломоносова.

В основе дефектоскопии также лежит принцип эхолокации.

Ультразвуки ускоряют или замедляют протекание некоторых химических реакций, действуя или как своего рода катализаторы, или же как ингибиторы. Одна из причин этого — значительные местные сжатия и нагревания. Так, например, под действием ультра-

звуков в растворе иодистого калия появляется свободный иод.

Ультразвуки дробят жидкые и твердые вещества, образуя эмульсии и суспензии. Например, с помощью ультразвука можно образовать эмульсию из ртути и воды, суспензию металлов в воде и масле и т. д.

Ультразвуки оказывают действие на живые существа, например убивают микроорганизмы, в том числе многие опасные вирусы.

Как установлено теперь наукой, инфра- и особенно ультразвуки играют очень большую роль в жизни многих живых существ. В связи с этим на занятиях по физике можно использовать следующие факты [24 и 49].

Было обнаружено, что медуза «слышит» недоступные человеку инфразвуки с частотой 8—13 Гц, которые возникают, как установил академик М. В. Шулейкин, при штурме от трения волн о воздух. Объясняется это так. У медузы (рис. 73) есть стебелек, оканчивающийся шаром с жидкостью, в которой плавают камешки, опирающиеся на окончание нерва. Первой воспринимает «голос» шторма «колба», наполненная жидкостью, а затем через камешки этот «голос» передается нервам. Прибор, имитирующий орган слуха медузы (рис. 74), состоит из рупора, резонатора, пропускающего колебания нужных частот, пьезодатчика, преобразующего эти колебания в импульсы электрического тока, усилителя и измерительного прибора. Такая система позволяет определить наступление шторма за 15 ч [49, с. 83].

Испускание ультразвуков животными впервые обнаружили благодаря наблюдениям за летучими мышами. Такие наблюдения были начаты еще в 1793 г. итальянским ученым Спалланцани, но правильно поняты всего лишь 25—30 лет назад. В дальнейшем выяснилось, что данное явление отнюдь не является феноменом. Ультразвуками пользуются зубатые киты, дельфины, морские свинки, жуки, мыши, птицы и даже некоторые обезьяны.

Обитающие у нас летучие мыши испускают частотно-модулированные ультразвуки. Каждый сигнал длительностью всего 1—2 мс начинается с частоты 90 кГц и заканчивается на частоте 45 кГц.

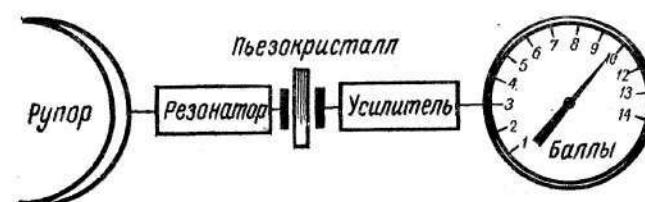


Рис. 74. Схема прибора Шулейкина.

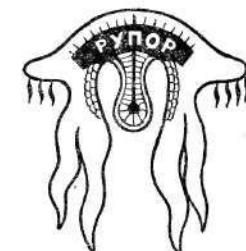


Рис. 73. Медуза.

Эти ультразвуковые импульсы, которые могут издаваться до 250 раз в секунду, служат для эхолокации и обнаружения насекомых.

Интересно, что у насекомых в свою очередь выработались защитные приспособления. Некоторые ночные бабочки и жуки имеют чувствительные к ультразвуку органы слуха и, услышав сигнал мыши, складывают крылья, падают вниз и замирают на земле.

Некоторые зубатые киты испускают ультразвуки с частотой до 150 кГц, что позволяет им охотиться за кальмарами в полной темноте на глубине до 1 км.

Чрезвычайно точным локатором обладают дельфины, способные за 20—30 м обнаружить осторожно опущенную в воду дробинку или отличить любимый вид рыбы от подобной ей по форме и размерам.

Пользуются для эхолокации ультразвуками и некоторые птицы, например обитающие в пещерах Центральной Америки козодои и живущие в Южной Азии стрижи саланганы.

Под действием звуков изменяется жизнедеятельность ряда растений. Ультразвуки определенной частоты и интенсивности повышают всхожесть семян, ускоряют развитие растений, увеличивают их урожайность.

Звуковые колебания большой частоты (с малой длиной волны) обеспечивают большую точность локации, так как зеркальное отражение волн получается только от предметов, размеры которых превышают длину волны звука. Предметы, меньшие длины звуковой волны, дают слабое эхо. Зато звуки низкой частоты медленнее затухают с расстоянием. Поэтому для связи между собой дельфины, например, издают звуки частотой от 10 до 400 Гц.

Сила ультразвука в твердых и жидких телах уменьшается сравнительно медленно. Например, в воде сила ультразвука уменьшается вдвое на расстоянии примерно 400 м. Затухание ультразвука особенно велико в газах. В воздухе, например, сила ультразвука уменьшается вдвое уже на расстоянии 40 см, т. е. примерно в 1000 раз быстрее, чем в воде.

11. Интерференция волн

Задача данной темы — рассмотрение колебательных процессов, происходящих в упругой среде при распространении в ней одновременно нескольких волн. Обнаружить здесь существование закономерностей путем непосредственных наблюдений не просто. При демонстрации одновременного распространения нескольких волн в волновой ванне на экране получается «пестрая» и неустойчивая картина. Такую картину каждый из нас наблюдал и в природе на поверхности водоема.

Для звуковых волн подобная мысленная картина образно описана Г. Гельмгольцем. Он говорит: «...воздушное море концертной или танцевальной залы: оно по всем своим направлениям пересечено

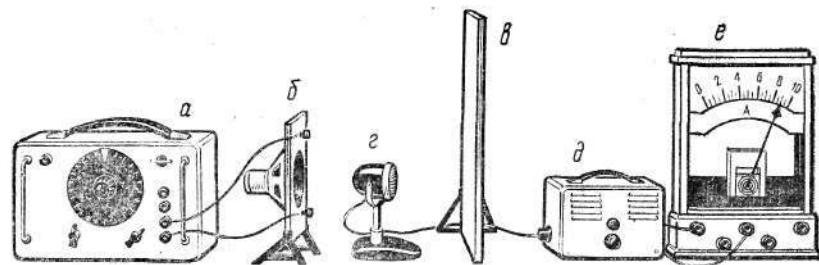


Рис. 75. Демонстрация стоячих звуковых волн с помощью звукового генератора.

пестрой толпой перекрецивающихся волн. Изо рта мужчин идут крупные волны 6—12 футов длиною, из уст женщин более короткие — 1,5—3 фута. Шуршание платьев вызывает мелкие вихри воздуха, всякий тон оркестра посыпает свои волны, и все эти системы волн распространяются шарообразно вокруг своих исходных пунктов, пробираются одна сквозь другую, отражаются стенками и так ходят взад и вперед, пока, наконец, не погаснут, сменяемые новыми возникшими волнами» (цитируется по книге А. А. Ванеева и др.) [19, с. 57].

Из приведенного описания прежде всего следует, что каждая волна распространяется в среде таким образом, как будто других волн не существует. Особенно это наглядно видно на примере волн на поверхности воды, для которых существует дисперсия.

Если в водоеме возбудить сначала «мелкие» волны, а затем колебания с большой длиной волны, то можно видеть, как «большая» волна догонит «малую», возьмет ее к себе на гребень, а затем обгонит и пойдет дальше, как будто «малой» волны не было вовсе.

Это, однако, не значит, что колебания частиц под действием нескольких волн остаются неизменными. Соответствующее смещение частицы вызывает каждая волна, и эти смещения складываются геометрически. Но в этом общем смещении каждая волна имеет свою неизменную «долю» и потому распространяется независимо от других волн. Следующее важное понятие, необходимое для изучения всего последующего материала об интерференции, — когерентность волни.

Для его формирования лучше всего сначала рассмотреть известный учащимся пример взаимодействия двух одинаковых волн, идущих навстречу друг другу.

В любой точке стоячей волны разность фаз накладывающихся волн есть величина постоянная. Постоянной будет и амплитуда результирующего колебания. То место преграды, откуда отражается волна, можно считать для нее источником колебаний.

Поэтому можно также сказать, что устойчивая стоячая волна образуется при наложении идущих навстречу друг другу бегущих волн, если разность фаз источников их колебаний постоянна. Источники колебаний, имеющие постоянную разность фаз, называют

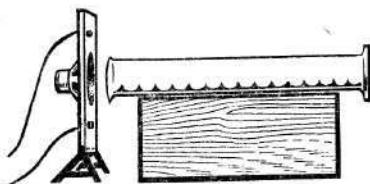


Рис. 76. Наблюдение стоячей волны с помощью пыльных фигур.

возбуждают с помощью звукового генератора *a* с громкоговорителем *b*. Стоячие волны образуются при отражении этих волн от экрана *c*. Узлы и пучности обнаруживают с помощью микрофона *d*, соединенного с усилителем *e*, на выход которого присоединен демонстрационный гальванометр *f* [17, т. I, опыт 88].

Еще большее впечатление остается у учащихся при наблюдении стоячих волн по методу пыльных фигур Кундта (рис. 76).

Для опыта в горизонтально расположенную стеклянную трубку, закрытую с одного конца (удобна высокая цилиндрическая мензурка), насыпают мелкую пробковую крошку и у отверстия располагают громкоговоритель, соединенный с генератором звуковой частоты.

При определенной частоте колебаний пучности наглядно обозначаются сначала характерными вихрями, а затем четкими скоплениями пробковой пыли. Эти опыты могут быть использованы для измерения длин звуковых волн.

Если колебания приходят в данную точку среды от двух когерентных источников, расположенных от нее на расстоянии l_1 и l_2 , то можно записать следующие уравнения волн:

$$x_1 = A_1 \cos \omega \left(t - \frac{l_1}{C} \right) \text{ и } x_2 = A_2 \cos \omega \left(t - \frac{l_2}{C} \right).$$

Разность фаз

$$\Delta\varphi = \frac{\omega l_2}{C} - \frac{\omega l_1}{C} = \frac{2\pi}{TC} (l_2 - l_1);$$

так как скорость распространения волн $C = \frac{\lambda}{T}$, то

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi T}{\lambda} (l_2 - l_1) = \frac{2\pi (l_2 - l_1)}{\lambda}.$$

Величину $l_2 - l_1$ называют разностью хода волн.

Если

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi (l_2 - l_1)}{\lambda} = 2n\pi,$$

то происходит максимальное усиление колебаний. Для этого случая $l_2 - l_1 = n\lambda$, т. е. разность хода равна целому числу волн.

Если

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi (l_2 - l_1)}{\lambda} = (2n + 1)\pi,$$

когерентными, а наложение волн с постоянной разностью фаз носит название интерференции.

Стоячие звуковые волны в воздухе можно наглядно продемонстрировать с помощью установки, показанной на рисунке 75. Звуковые волны небольшой интенсивности на частоте 1000—3000 Гц создают звуковой генератор *a* с громкоговорителем *b*. Воздух из трубы *c* выходит в атмосферу. Узлы и пучности обнаруживаются с помощью микрофона *d*, соединенного с усилителем *e*, на выход которого присоединен демонстрационный гальванометр *f*.

то колебания в наибольшей мере гасят друг друга. Для этого случая

$$l_2 - l_1 = (2n + 1) \frac{\lambda}{2},$$

т. е. разность хода равна нечетному числу полуволн.

В качестве примера показывают интерференцию волн от двух точечных источников в волновой ванне.

Общие пояснения причин образования интерференционной картины желательно дополнить более детальным рассмотрением наложения волн в отдельных точках на поверхности воды.

Для этого можно решить следующую задачу:

Задача 28. С помощью упругой пластинки-вибратора на поверхности воды создают две волны. Найдите построением положение впадин и пучностей, образовавшихся при интерференции волн. Расстояние между когерентными источниками 10 см, длина волн — 5 см. Определите амплитуды колебаний, которые получились при интерференции волн в точках, удаленных от источников колебаний *a* и *b* соответственно на расстояниях: а) $l_1 = 50$ см и $l_2 = 40$ см; б) $l_3 = 50$ см и $l_4 = 32,5$ см; в) $l_5 = 55$ см и $l_6 = 61,25$ см. Амплитуды слагаемых колебаний в указанных точках считать одинаковыми.

Решение. Вокруг каждого «источника» колебаний (рис. 77) проводим концентрические окружности радиусами $R_1 = \frac{\lambda}{2}; R_2 = \lambda$ и т. д. Точки их пересечения, для которых разность хода волн равна четному числу полуволн, обозначим кружочками (пучности), а нечетному — крестиками (впадины). Используя данные задачи, получим:

$$\text{а) } \frac{l_1 - l_2}{\lambda} = \frac{50 \text{ см} - 40 \text{ см}}{5 \text{ см}} = 2.$$

Разность хода волн равна четному числу полуволн, следовательно, амплитуда результирующего колебания вдвое больше амплитуды интерферирующих волн.

$$\text{б) } \frac{l_3 - l_4}{\lambda} = \frac{40 \text{ см} - 32,5 \text{ см}}{5 \text{ см}} = 1,5.$$

Разность хода волн равна нечетному числу полуволн — колебания гасят друг друга. Амплитуда равна нулю.

$$\text{в) } \frac{l_5 - l_6}{\lambda} = 1,25.$$

Разность фаз $\Delta\varphi = 2\pi + \frac{\pi}{2}$.

Сложим данные колебания, считая для облегчения расчетов, что

$$\Delta\varphi = \frac{\pi}{2}; x_1 = A \cos \omega t;$$

$$x_2 = A \cos \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right),$$

получим:

$$x = x_1 + x_2 = 1,41 \cdot \cos \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right).$$

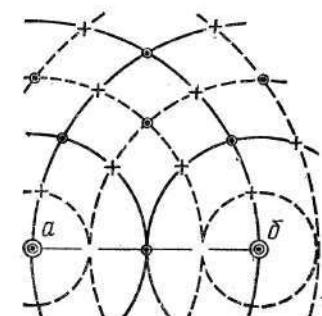


Рис. 77. Интерференционная картина от двух источников колебаний.

Интерференцию звуковых волн от двух когерентных источников можно продемонстрировать с помощью следующего проблемного опыта, используя ту же установку, которую применяли для демонстрации стоячих волн (см. рис. 75). Но экран в этом случае надо убрать, а к генератору присоединить два громкоговорителя [17, т. I, опыт 85]. Микрофон помещают в заранее подобранные место минимума амплитуды интерферирующих звуковых волн.

Сначала на глазах учащихся включают один громкоговоритель и, постепенно увеличивая силу звука, добиваются отклонения стрелки гальванометра на половину шкалы.

Затем спрашивают, как изменятся показания гальванометра (звукание динамика), если включить второй громкоговоритель. «Житейский» опыт нередко берет здесь верх и подсказывает неверный ответ, что показания гальванометра должны непременно возрасти. На опыте же наглядно обнаруживают, что «звук может погасить звук».

После этого с помощью микрофона исследуют звуковое поле в аудитории, обнаруживая места максимумов и минимумов звуковых колебаний. Вариант может служить опыт с двумя камертонами с частотой колебаний около 1000 Гц, расположенным на одной доске на расстоянии 1,5—2 м один от другого. Положение максимумов и минимумов учащиеся обнаруживают на слух, лучше одним ухом, когда учитель поворачивает доску с камертонами на демонстрационном столе [6, § 46].

12. Оптимальные условия излучения звука. Акустический резонанс

Идеальным источником гармонических звуковых колебаний была бы пульсирующая по синусоидальному закону сфера. Однако практически колебания создаются телами иного строения и формы. И можно ожидать, что, чем больше отличия от данного идеала, тем хуже излучатель. Одним из самых плохих в этом смысле слова излучателей являются струны. Колеблющаяся струна создает, с одной стороны, разрежения, а с другой — уплотнения воздуха, т. е. две волны, отличающиеся одна от другой по фазе на 180° . Поскольку толщина струны по сравнению с длиной волны мала, приходящие в любую точку звуковые волны почти полностью гасят одна другую.

Почти то же самое можно сказать и об излучении волн ножкой камертона, для которого, кроме того, следует учитывать интерференцию волн, излучаемых обеими ножками. Обе эти волны находятся в противофазе и в значительной мере гасят одна другую. Поворачивая камертон, поднесенный к уху, вокруг оси, проходящей через его ножку, можно обнаружить направления, по которым происходит усиление и ослабление колебаний.

Если на одну из ножек камертона надеть цилиндр (рис. 78, слева), тем самым значительно ослабив одну из интерферирующих волн, то звучание значительно усиливается.

В связи с этим возникает вопрос, почему же камертон имеет не одну, а две ножки, что явно ухудшает его излучение. Объясняется это тем, что ножки камертона колеблются в противоположных направлениях и поэтому общее количество движения остается неизменным. Следовательно, не требуется дополнительной силы для его удержания.

Для создания же колебания одной пластины ее нужно закрепить в специальной опоре, например в тисках.

Наиболее близки по своим свойствам к «идеальному» источнику различные мембранны, которые можно рассматривать уже как значительную часть поверхности пульсирующего шара.

Для хорошего излучения необходимо, чтобы размеры мембранны были в несколько раз больше длины излучаемой волны. Это условие практически легко выполнить для коротких, особенно ультразвуковых, волн.

Влияние размера излучающей поверхности на интенсивность звуковой волны нетрудно показать, сравнив звучание камертона, держа его сначала в руке, а затем, прислонив ножку к крышке стола.

Другим известным примером является детский «нитяной телефон». Натянутая нить практически не излучает звука, хотя и колеблется подобно скрипичной струне, если по ней двигать пальцами руки. Если же один конец нити присоединить, например, к спичечной коробке, то звучание станет ясно слышимым на расстоянии нескольких метров.

Аналогичный прием для усиления звучания используют, например, в скрипках и виолончелях, прикрепляя струны к декам. Для той же цели служит ящик, на котором устанавливается камертон.

Ящик камертона делают значительных размеров, сравнимых с длиной волны, и закрывают с одной стороны. Это уменьшает выравнивание давлений или ослабление звука в результате интерференции, поскольку колебания распространяются преимущественно в одну сторону. Излучателем в данном случае является значительное по площади отверстие ящика. Наконец, увеличение излучения звука достигается здесь также с помощью резонанса. Поэтому ящик камертона и называют резонатором. Его длина равна $\frac{1}{4} \lambda$. В ящике образуется мощная стоячая волна с пучностью у его

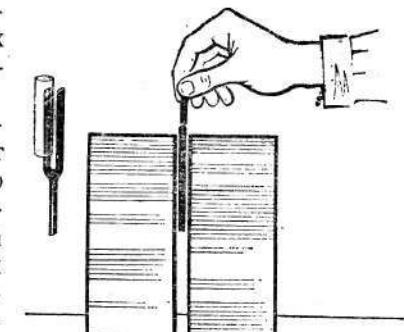


Рис. 78. Ослабление интерференции колебаний, вызванных ножками камертона.

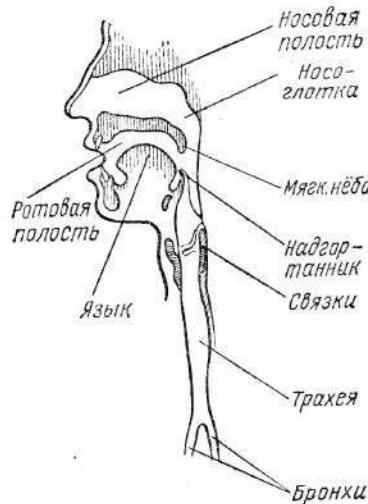


Рис. 79. Голосовой аппарат человека.

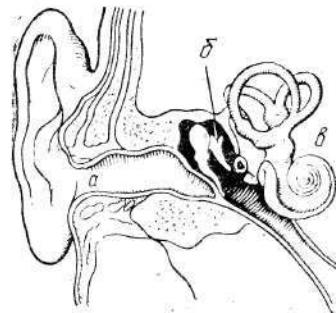


Рис. 80. Строение уха.

натянутые голосовые связки, приходя в состояние автоколебаний, прерывают воздушный поток, идущий из легких.

Различная высота звука объясняется различным натяжением связок. Полости глотки и рта служат резонаторами, имеющими свои основные частоты. Поэтому в каждом гласном звуке усиливаются две частоты, называемые формантами.

Орган слуха (рис. 80) подразделяется на три части: наружное *a*, среднее *b* и внутреннее *v* ухо. Звуковые волны по слуховому каналу наружного уха попадают на барабанную перепонку и приводят ее в колебательное движение. Эти колебания с помощью трех слуховых косточек среднего уха передаются во внутреннее ухо, которое является самой существенной частью органа слуха. Оно состоит из преддверия с тремя полукружными каналами и улитки. В улитке находится до 10 000 волокон, или кортиевых струн,

отверстия. Именно колебания столба воздуха, а не ножек камертонов и порождают основную звуковую волну. При этом надо иметь в виду, что первичным источником звука или носителем энергии является камертон. Столб же воздуха, приведенный в интенсивные колебания благодаря резонансу, служит вторичным источником колебаний. Он использует энергию камертонов, который благодаря этому затухает гораздо скорее, чем если бы его, например, просто держали за ножку в руке.

Явление резонанса используют во всех музыкальных инструментах. Органные трубы, трубы духовых инструментов, корпусы скрипок, гитар и т. п., обладая целым набором собственных колебаний, резонируют с тонами и обертонами первичных источников звуков, усиливают излучение тех или других из них, придавая звукам силу и тембр.

Отмеченные закономерности можно обнаружить также и применительно к голосовому аппарату и органам слуха человека.

Голосовой аппарат человека (рис. 79) подобен язычковым трубам. Звуковые колебания возникают благодаря тому, что упруго

различной длины, которые можно уподобить настроенным определенным образом струнам пианино.

То или иное волокно отзыается на определенный различаемый слухом тон, подобно тому как струна пианино вследствие резонанса отзывается на звук определенной частоты.

Слуховой аппарат человека — это парный орган, что увеличивает его надежность и, кроме того, дает возможность определять то направление, откуда приходят звуки. Это свойство называют бинауральным (двуушным) эффектом.

Понятие о бинауральном эффекте можно дать учащимся в процессе решения следующей задачи.

Задача 29. Человек может различать разность времени воздействия звука на уши до $3 \cdot 10^{-5}$ с. На какой угол φ должен переместиться находящийся перед человеком далекий источник звука, чтобы можно было заметить это смещение? Расстояние между ушами $d = 20$ см.

Решение. Если источник звука из точки *C* сместился в точку *C'* (рис. 81), то

$$\sin \varphi = \frac{AB'}{d}; \quad AB' = ct = 340 \text{ м/с} \cdot 3 \cdot 10^{-5} \text{ с} = 0,01 \text{ м};$$

$$\sin \varphi = \frac{0,01}{0,20} = 0,05; \quad \varphi \approx 3^\circ.$$

Величина $\sin \varphi = \frac{AB'}{d}$ и, следовательно, угол φ будет тем меньше, а точность определения направления тем больше, чем значительнее расстояние между двумя приемниками звука.

Для определения не только направления, но и координат источника звука необходимо, очевидно, получить пересечение двух прямых. Поэтому для звуколокации необходимо иметь минимум 3 звукоприемника. Во время Великой Отечественной войны широко применяли звукометрическую артиллерийскую разведку, определявшую местоположение артиллерийских орудий противника по звуку их выстрелов. Звукоприемники устанавливали вдоль фронта на расстоянии нескольких сот метров один от другого. Импульсы принятой ими волны фиксировались самописцами на движущейся бумажной ленте. По координатам звукоприемников и разности времени прихода звуков, аналитически или графически находили координаты батарей противника.

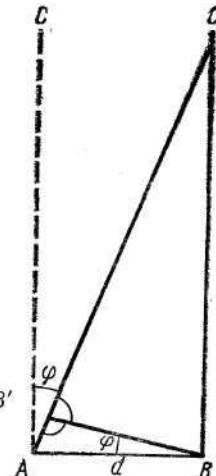


Рис. 81. К задаче о бинауральном эффекте.

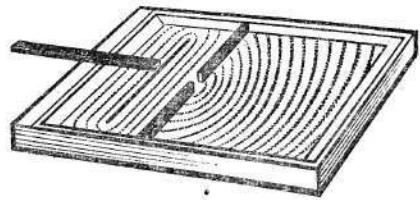


Рис. 82. Иллюстрация к принципу Гюйгенса.

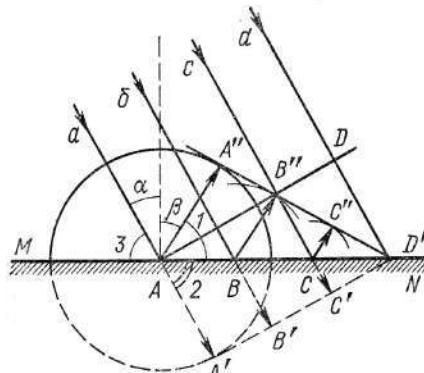


Рис. 83. Отражение звуковых волн от экрана.

В своих исследованиях Гюйгенс постоянно использует аналогию света и звука, и приведенная им формулировка принципа распространения света представляется самоочевидной и для звуковых волн в упругой среде:

Для пояснения данного принципа целесообразно продемонстрировать образование элементарной волны у отверстия в преграде, поставленной в волновой ванне на пути распространения плоской волны (рис. 82).

Плодотворность принципа Гюйгенса видна на примере вытекающих из него следствий. С его помощью легко объясняются, например, законы отражения и преломления волн.

Приведем доказательство закона отражения, почти целиком воспроизведя доказательство Гюйгенса [33, с. 101].

Допустим, что участок плоской волны AD (рис. 83), ограниченный лучами a и d , падает на поверхность MN . Если бы не было этой поверхности, то в тот момент, когда луч d достиг точки D' , фронт волны занял бы положение $A'D'$. На самом же деле к этому моменту элементарная волна, возникшая в точке A , образует сферу радиусом $R = AA'' = AA'$. Проведем из точки D' касательную к этой сфере. Треугольники $A'A''D'$ и $AA'D'$ конгруэнтны, как прямоугольные, имеющие общую гипotenузу AD' и конгруэнтные катеты AA'' и AA' . Следовательно, $\angle 1 = \angle 2$, а $\triangle A''A'D'$ можно полу-

13. Принцип Гюйгенса. Отражение и преломление волн

Выдающийся голландский ученый Христиан Гюйгенс (1629—1695) сформулировал в 1690 г. свой знаменитый принцип: «При испускании световых волн следует иметь в виду, что каждая частица материи, в которой распространяется волна, не должна сообщать свое движение только ближайшей частичке, находящейся на одной прямой с первой частичкой и источником света; она также необходимо сообщает его всем частичкам, которые соприкасаются с ней и препятствуют ее движению. Таким образом, необходимо, чтобы вокруг каждой частицы зарождалась волна, центр которой был бы в этой частице» [33, с. 100—101].

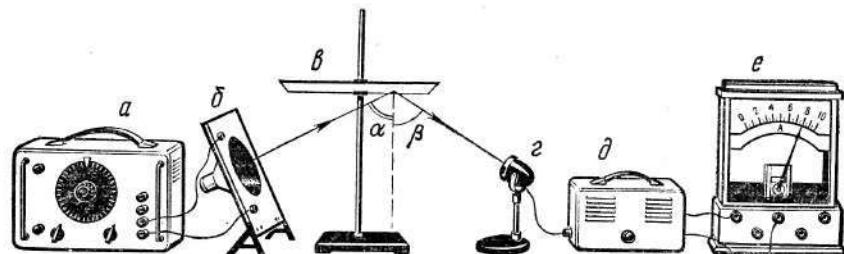


Рис. 84. Проверка закона отражения звука.

чить вращением $\Delta A A' D'$ вокруг гипотенузы AD' на 180° . Из этого следует, что элементарные волны, распространяющиеся из точек B и C , также достигнут линии $A''D'$, которая, следовательно, представляет собой фронт отраженной волны. Далее можно видеть, что угол α падения луча a равен углу его отражения β , поскольку $\alpha = 90^\circ - \angle 3$, $\beta = 90^\circ - \angle 1$, а $\angle 1 = \angle 2 = \angle 3$.

Законы отражения волн наглядно можно продемонстрировать с помощью известных опытов в волновой ванне [17, т. I, опыт 72], а также с помощью звуковых волн, возбуждаемых звуковым генератором a (рис. 84) [17, т. I, опыт 87] и излучаемых динамиком b . Волны, отраженные экраном b , попадают в микрофон e , подключенный на вход усилителя низкой частоты d . На выход усилителя присоединяют демонстрационный гальванометр e . При положении экрана, обеспечивающем равенство углов падения α и отражения волн β , показания гальванометра будут наибольшими.

Эффектны также опыты по отражению звуковых волн вогнутыми зеркалами, в фокусе которых помещен источник звука («звуковой прожектор»).

Доказательство законов преломления в целях «историзма» рассмотрим также с помощью построений, которыми пользовался Гюйгенс (рис. 85).

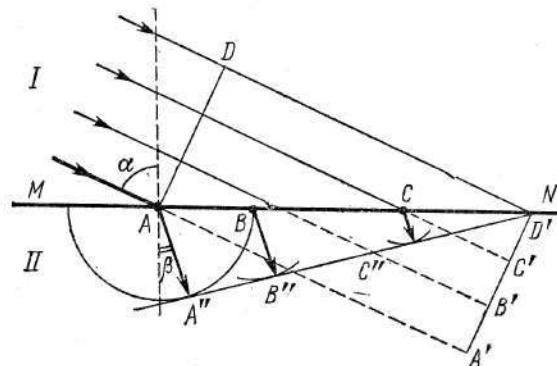


Рис. 85. Доказательство закона преломления по методу Гюйгенса.

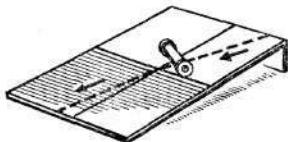


Рис. 86. Опыт-аналогия с катушкой.

Во второй. Тогда радиусы элементарных сферических волн, испускаемых точками A , B , C , будут также меньше на $\frac{1}{3}$ и, следовательно, фронт волны займет положение $A''D'$. Далее отметим, что $\angle \alpha = \angle AD'A'$, а $\angle \beta = \angle AD'A''$, как углы с взаимно перпендикулярными сторонами. Поэтому можно записать:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{AA'}{AD'} : \frac{AA''}{AD'} = \frac{AA'}{AA''} = \frac{v_1 \Delta t}{v_2 \Delta t} = \frac{v_1}{v_2} = 1,5.$$

В качестве mnemonicического правила для запоминания того, как изменяется направление луча, полезно прибегнуть к следующей аналогии. Если листфанеры наполовину заклеить ворсистой тканью — фланелью — и наполовину гладкой бумагой, а затем по нему под углом при небольшом уклоне скатить катушку (рис. 86), то на границе бумаги — фланель часть катушки затормозится и она изменит направление своего движения, подобно лучу при переходе из одной среды в другую.

Преломление звуковых волн в земной атмосфере объясняется в основном двумя причинами: наличием ветра и разной температурой слоев воздуха на различной высоте.

Неровности местности, строения, лес и другие причины уменьшают скорости ветра у поверхности Земли. Поэтому при попутном ветре звуковые лучи загибаются к Земле, а при встречном, наоборот, отклоняются от Земли. В результате этого слышимость значительно уменьшается и можно, например, совсем близко подойти к спрятавшейся в траве птице, которая вылетает буквально «из-под ног». Уменьшение скорости звука при этом вопреки широко распространенному мнению играет второстепенную роль.

Днем у нагретой лучами солнца поверхности земли воздух теплее, поэтому скорость его распространения с высотой уменьшается, звуковые лучи изгибаются вверх, и слышимость ухудшается. Наоборот, на заре слышимость может быть очень хорошей, так как вверху воздух оказывается теплее, чем у остывшей земли, и лучи загибаются к земле.

Иногда луч многократно то приближается, то удаляется от земли, в результате чего образуются места, где звук слышен хорошо или не слышен вовсе (зоны «молчания»). Не раз отмечалось, например, что сильные взрывы были хорошо слышны на значительном расстоянии от них и вовсе не слышны сравнительно близко.

14. Дифракция волн

Дифракцией волн называют огибание волнами различных препятствий и, следовательно, отклонение их от прямолинейного распространения.

Изучение материала можно начать с проблемного опыта, показав, например, дифракцию волни на щелях различной ширины в волновой ванне (см. рис. 82). Дальнейшая задача заключается в том, чтобы объяснить, почему в случае малого отверстия волны свободно заходят за экран, а в случае широкого отверстия мы их почти не обнаруживаем в области геометрической тени. Для объяснения обратимся еще раз к задаче № 28. Расстояние между источниками колебаний d в данном случае равно 2λ . В пространстве наблюдается четко выраженная интерференционная картина усиления в одних и ослабления в других местах колебания частиц среды.

Уменьшим теперь расстояние d таким образом, чтобы оно было значительно меньше λ . Тогда в пространстве не найдется ни одной точки, где бы колебания происходили в противофазе. Колебания всюду будут усиливать друг друга, и поэтому оба источника на некотором расстоянии от них можно считать как один точечный источник. Это имеет место и на самом деле, когда, например, ширина щели в экране мала по сравнению с длиной волны. Такую щель по принципу Гюйгенса можно принимать за источник элементарных сферических волн.

Аналогичным образом объясняется и дифракция волни при малом экране, поперечник которого равен d . При $d < \lambda$ волны, распространяющиеся от краев, на некотором расстоянии полностью заходят за экран и, интерферируя, дают такую картину, как будто экрана нет совсем.

При увеличении экрана или щели фронт, например, плоской волны уже будет образовываться большим числом источников колебаний. Основная часть волны пройдет щель, не претерпев никаких изменений. Особые условия возникнут только по краям щели, где источники колебаний создадут элементарные сферические волны, которые зайдут в область геометрической тени. Но при этом надо иметь в виду, что с увеличением размера щели интенсивность прошедших волн ввиду увеличения числа источников колебаний растет и явление дифракции оказывается относительно менее заметно (на волны, заходящие в область тени, приходится все меньшая доля энергии). Попасть в середину тени эти волны могут только на значительном расстоянии от экрана, где их энергия с расстоянием может уменьшиться на столько, что дифракционная картина и по этой причине станет невыразительной.

Дифракцию звуковых волн на опыте можно наблюдать с помощью установки, показанной на рисунке 87 [17, т. I, опыт 89]. Перемещая микрофон вокруг щели, обнаруживают загибание волн за ее края. Показывают также дифракцию волн от небольшого экрана, например от книги.

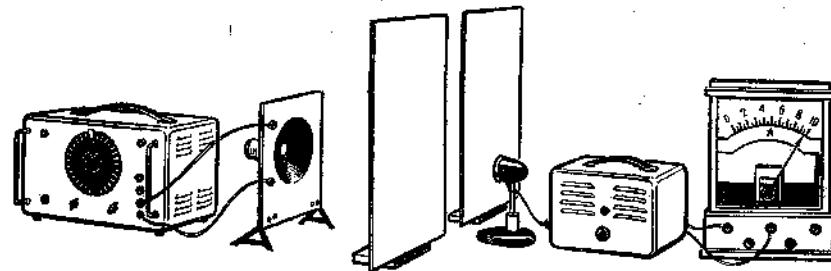


Рис. 87. Дифракция звуковых волн.

В окружающей жизни дифракция звуковых волн ввиду относительно большой длины их волн — обычное явление. Благодаря дифракции мы хорошо слышим, например, звуки, проникающие в соседнюю комнату через открытое окно. Особенно хорошогибают препятствия длинные волны. Поэтому, прислушиваясь внимательно, можно обнаружить, свернув с шумной улицы в тихий переулок, что звуки стали «глухими», менее громкими и более низкими по тону.

Наконец, отметим, что при распространении звука чаще всего одновременно имеет место целый комплекс явлений: преломление звука, отражение, интерференция, поглощение и т. д. Это приходится учитывать, например, архитекторам при расчете акустики помещений. Наглядно это видно и в окружающей жизни. Так, эхо, хорошо слышимое в одно время суток или при одной погоде, исчезает вовсе или, наоборот, становится многократным в другое время или при иных погодных условиях. Часто эхо становится более высоким по тону, чем создающие его звуки, так как лучше отражаются от сравнительно небольших предметов, например стволов деревьев, более короткие волны.

15. Запись и воспроизведение звука

Наибольшее применение в настоящее время имеют механическая, фотографическая и магнитная системы записи звука.

Механическая запись звука изобретена Эдисоном, изготовленным в 1877 г. прибор, названный фонографом (рис. 88). Его основные части — валик *a*, покрытый оловянным листом, и мембрана *b* с иглкой. При вращении валика мембрana, приводимая в движение звуковыми колебаниями, например человеческого голоса, с помощью иглы вычерчивала на оловянном листе бороздку различной глубины. Это так называемая глубинная запись.

Для воспроизведения звука, установив иглу в начало канавки, валик врашали еще раз. Неровности канавки приводили в колебание иглу и связанную с ней мембранию, которая издавала «записанные» звуки.

Это изобретение буквально поразило современников. Сам Эдисон писал, что, когда он и его помощник впервые услышали голос первого фонографа, помощник чуть не упал со страха, а ему стало жутко.

Фонограф позволял записывать и воспроизводить звуки.

Позднее аппарат был усовершенствован: вместо оловянного листа стали применять восковое покрытие, а затем валик заменили более удобными в обращении и в производстве граммофонными пластинками. Правда, граммофоны (патефоны) не были рассчитаны на запись звуков, они только воспроизводили звук.

В настоящее время при записи звука иглу-резец присоединяют к специальному электромеханическому преобразователю — рекордеру, к которому подводят электрические сигналы звуковой частоты. Используют поперечную запись. При такой записи глубина проникновения иглы в материал диска (в воск) остается неизменной. Игла совершает колебания в поперечном к бороздке направлении.

Поверхность воскового диска после записи покрывают сначала тончайшим слоем серебра, а затем способом гальванопластики слоем меди. После удаления воска получают «негатив», с которого делают отиски на пластинках из винилита или, что хуже, на целлулоиде.

Раздав учащимся лупы и кусочки пришедшей в негодность патефонной пластинки, предлагают рассмотреть их бороздки.

Для пояснения принципа воспроизведения звука с пластинки можно воспользоваться установкой, показанной на рисунке 89. Следует также показать кинофрагмент «Запись звука на патефонной пластинке».

Фотографический способ записи звука применяют главным образом в кино. Фонограмма или звуковая дорожка может быть записана или методом переменной ширины (рис. 90, *A*), или методом переменной плотности (рис. 90, *B*).

Принцип записи звука методом переменной ширины можно упрощенно пояснить на примере действия зеркального гальванометра. Если к его клеммам приложить переменное напряжение, например,

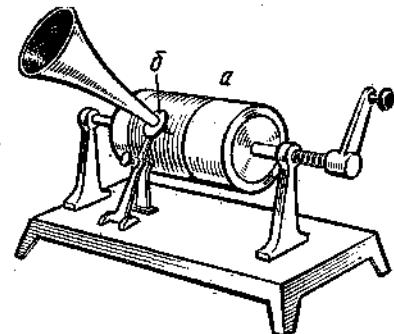


Рис. 88. Фонограф Эдисона.

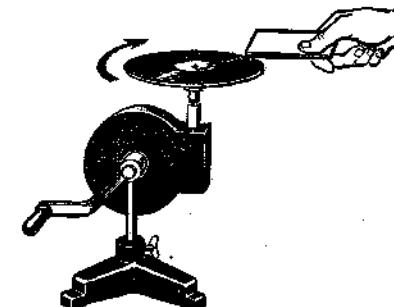


Рис. 89. Установка для воспроизведения звука с пластинки.

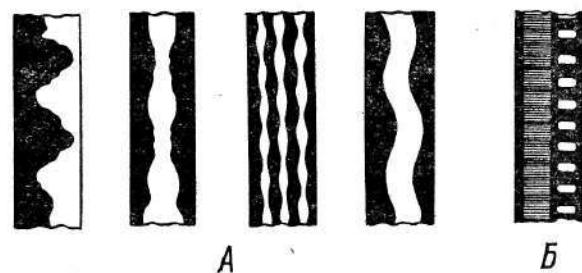


Рис. 90. Фотографическая запись звука.

от микрофона, то «зайчик» будет совершать соответствующие колебания и оставит на движущейся перпендикулярно этим колебаниям фотоленте след, подобный показанному на рисунке 90, А. Зеркальные модуляторы света сейчас наиболее распространены в нашей стране.

Первая попытка осуществить звуковой киносеанс была предпринята в 1898 г. в Париже. Звук передавался каждому зрителю по телефону от фонографа Эдисона. Но из-за неизбежного отсутствия синхронности звука и изображения пришлось отказаться от этого метода озвучивания.

В 1909 г. французский изобретатель де Пино пытался записать звук методом Эдисона прямо на киноленте. Такая целлулоидная лента явно не годилась для этой цели. Кино осталось немым.

Принципиально новый метод озвучивания киноленты предложил в 1926 г. советский инженер П. Г. Тагер. Его метод известен теперь как запись звука по системе профессора П. Г. Тагера. Предложенный им модулятор света представляет собой два скрещенных николя, между которыми находится ячейка или конденсатор Керра, помещенный обычно в нитробензол.

Световой поток оказывается зависящим от приложенного к конденсатору напряжения, которое можно изменять со звуковой частотой.

По системе Тагера был заснят первый звуковой фильм «Путешествия в жизнь».

В 1927 г. профессор А. Ф. Шорин предложил модулятор новой конструкции. В нем световой поток изменялся с помощью колеблющейся в магнитном поле нити, по которой пропускался ток звуковой частоты. Получалась поперечная запись звука.

По системе А. Ф. Шорина был озвучен целый ряд известных советских звуковых фильмов 30-х годов («Великий гражданин», «Юность Максима» и др.). Нужно иметь в виду, что в 1926—1927 гг. звуковых кинотеатров нигде в мире еще не было. «Великий немой», как называли тогда кино, наконец, заговорил.

Для воспроизведения звука, записанного оптическим (фотографическим) методом, необходимо применение фотоэлементов [9, § 132].

Схема простейшего устройства для магнитной записи и воспроизведения звука показана на рисунке 91.

Носителем записи обычно является целлофановая лента с нанесенным на ее поверхность магнитоустойчивым ферромагнитным веществом, например γ -окисью железа ($\gamma - \text{FeO}_3$). Важнейшая часть устройства — магнитная головка, представляющая собой магнитный сердечник с обмоткой, питаемой от усилителя током звуковой частоты. При движении ленты около зазора магнитопровода она намагничивается. Записанный сигнал представляет собой остаточное намагничивание различных мест ферромагнитной ленты.

С помощью той же магнитной головки можно и воспроизвести звук. При движении ленты она индуцирует в обмотке головки переменные токи звуковой частоты, которые поступают в усилитель, а затем в громкоговоритель.

В качестве вводного вначале желательно показать следующий простой опыт. «На железный сердечник от универсального трансформатора надевают катушку на 220 В, а на верхние концы сердечника кладут полюсные наконечники так, чтобы между ними образовался воздушный зазор толщиной 10—15 мм. Катушку соединяют через рубильник с батареей аккумуляторов напряжением около 4 В.

На полюсные наконечники кладут слесарную линейку и поясняют учащимся, что в собранной установке электромагнит моделирует магнитную головку, а стальная линейка — ферромагнитную ленту. Затем линейке сообщают от руки равномерное движение и, пока она проходит над полюсными наконечниками, два-три раза замыкают электрическую цепь. В эти моменты линейка сильно намагничивается.

Чтобы обнаружить записанные на линейке электрические импульсы, отключают катушку от аккумулятора и соединяют ее с демонстрационным гальванометром.

Вновь протягивают линейку над полюсными наконечниками и наблюдают импульсы тока в цепи гальванометра» [17, т. I, с. 208].

В результате того, что части линейки, находившиеся над разноименными полюсами электромагнита, получили противоположную полярность, стрелка гальванометра при движении линейки будет попеременно отклоняться то в одну, то в другую сторону. На этом примере можно также пояснить принцип

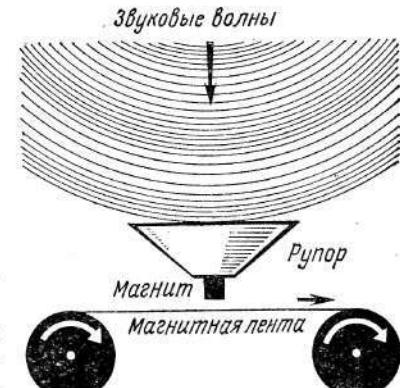


Рис. 91. Упрощенная схема магнитной записи звука.

действия магнитных запоминающих устройств, записывающих 2 уровня сигнала («0» и «1»).

Емкость информации на компактных и удобных в хранении магнитных лентах длиной в сотни метров при нескольких дорожках огромна (порядка 10^9 двоичных знаков). Это в несколько тысяч раз больше, чем содержит печатных знаков данная книга.

В действующих моделях магнитной записи и воспроизведения звука¹ используют магнитные головки фабричного изготовления,

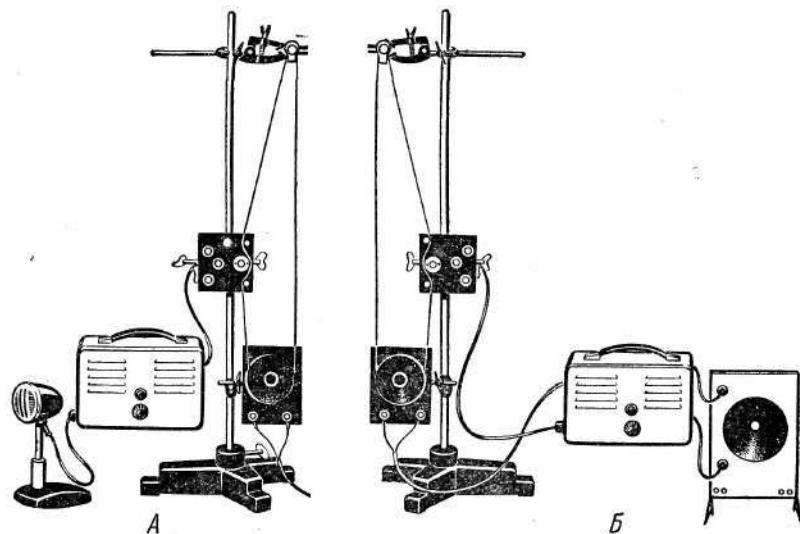


Рис. 92. Схема устройства магнитофона.

например: универсальную магнитную головку от магнитофона «Эльфа-10», самодельные лентопротяжные механизмы, а также усилитель низкой частоты, динамический микрофон и громкоговоритель. Таким образом, получают развернутую схему основных узлов магнитофона (рис. 92) [17, т. I, опыт 90].

Впрочем, ввиду того что у магнитфонов фабричного изготовления, в том числе и портативных, также хорошо видны их основные части: головка, лентопротяжный механизм и микрофон, демонстрация с их помощью звукозаписи и ее воспроизведение также получаются достаточно наглядными.

¹ См.: А циферов Л. И. Учебное оборудование для записи и воспроизведения звука.— «Физика в школе», 1964, № 6; Копосов В. В. Простая демонстрация записи и воспроизведения звука.— «Физика в школе», 1968, № 5.

Глава IV

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ВОЛНЫ

1. Взаимосвязь между переменными магнитными и электрическими полями. Токи смещения

Изучение данной темы, имеющей важнейшее научное, мировоззренческое и политехническое значение, основано прежде всего на понимании учащимися закона электромагнитной индукции, установленного Фарадеем, явлений в колебательном контуре и идеи Максвелла о токах смещения.

Вначале необходимо повторить сведения о законе электромагнитной индукции Фарадея, изученные в IX классе, обобщением которого является второе уравнение Максвелла: $\oint E_i dl = -\frac{\partial}{\partial t} \int B_n dS$, известное учащимся в виде $E_i = -\frac{d\Phi}{dt}$ или для частного случая — $E_i = -L \frac{dl}{dt}$.

Здесь особенно важно подчеркнуть, что изменение магнитного поля создает *вихревое* электрическое поле, и выработать у учащихся твердые навыки определения направления напряженности \vec{E} электрического поля на основе закона Ленца. Образование при изменении магнитного поля именно *вихревого* электрического поля можно пояснить на известном опыте с прибором Петровского для демонстрации правила Ленца [8, § 132].

Полезно также показать опыт с использованием катушки Томсона или разборного школьного трансформатора (рис. 93), где наблюдают движение алюминиевого кольца a под действием магнитного поля при включении и выключении постоянного тока напряжением 50—100 В [31].

Несмотря на выразительные демонстрации, учащиеся с трудом усваивают правило Ленца, если его обстоятельно не разъяснить и не закрепить достаточным количеством упражнений и решением задач.

Применяя правило Ленца, следует прежде всего определять изменение потока магнитной индукции $\Delta\Phi_1 = \Phi_2 - \Phi_1$, вызывающее индукционный ток. Необходимо также помнить, что магнитный поток $\Delta\Phi_2$, созданный индукционным током, противополо-

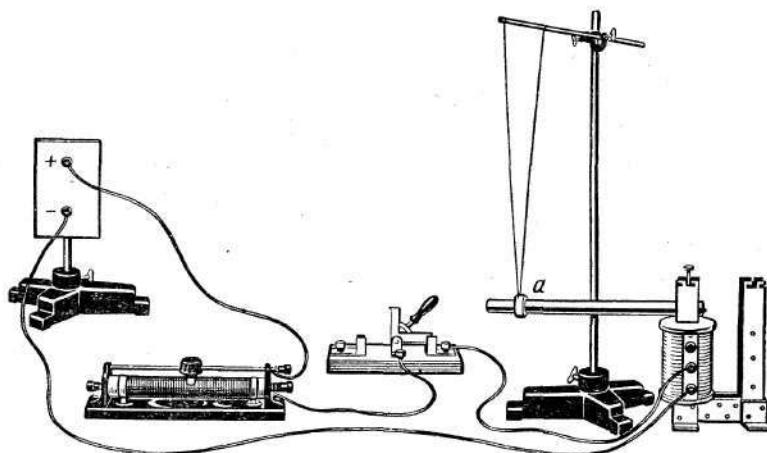


Рис. 93. Выталкивание алюминиевого кольца магнитным полем.

жен по знаку $\Delta\Phi_1$. При этом для обоих токов нужно учитывать направление вектора их магнитной индукции \vec{B}_1 и \vec{B}_2 . Поясним сказанное на примере следующей задачи.

Задача 30. Определите направление индукционного тока во внешнем контуре при включении и выключении тока в контуре внутреннем (рис. 94).

Решение. Рассмотрим два соседних участка a и b указанных контуров. До включения тока поток магнитной индукции внутреннего контура $\Phi_1 = 0$.

Направление вектора \vec{B}_1 в любой точке поля A (рис. 95) при включенном токе определим по правилу буравчика. Изменение потока $\Delta\Phi_1 = \Phi_1 - 0 = \Phi_1$. Поток вектора магнитной индукции внешнего контура в соответствии с правилом Ленца будет компенсировать это изменение (увеличение) потока внутреннего контура, поэтому вектор \vec{B}_2 должен быть направлен противоположно вектору \vec{B}_1 . Ток I_2 во внешнем контуре, судя по направлению \vec{B}_2 , противоположен току I_1 (рис. 95).

При размыкании цепи $\Delta\Phi = 0 - \Phi_1 = -\Phi_1$. Чтобы компенсировать данное изменение (уменьшение) основного магнитного потока, вектор \vec{B}_2 должен совпадать по направлению с \vec{B}_1 , а индукционный ток иметь то же направление, что и ток во внутреннем контуре.

Полезно аналогичные рассуждения повторить для случая, когда ток во внутренней цепи изменяется с помощью реостата.

В качестве самостоятельного задания для объяснения явления полезно также показать эффектный опыт со сплошными кольцами, «висящими» в воздухе на сердечнике катушки Томсона (рис. 44, Д), когда по ней проходит переменный ток. Такие же кольца, но с разрезом в воздухе «не висят».

На основе анализа всех этих опытов у учащихся должно создаться ясное представление о том, что вектор вихревого электрического поля \vec{E} образует левовинтовую систему с изменением вектора индукции $\Delta\vec{B}$ магнитного поля (рис. 96) [9, § 57].

И если в этом поле есть носители зарядов, способные двигаться, то возникает индукционный ток. Он имеет такое направление, что его магнитное поле препятствует изменению того магнитного поля, которым он вызван. Именно в этой наиболее общей формулировке учащиеся и должны усвоить закон Ленца.

Сам Х. Ленц сформулировал закон в следующем виде: «Если металлический проводник перемещается вблизи тока или магнита, то в нем возникает гальванический ток. Направление этого (возбужденного) тока таково, что покоящийся провод пришел бы от него в движение, прямо противоположное действительному перемещению» [37, т. I, с. 471].

В данном определении отчетливо видна энергетическая основа закона Ленца. Допустим, мы перемещаем проводник в магнитном поле, и в нем возникает индукционный ток. Его направление можно определить по правилу правой руки. Но на проводник с током в магнитном поле действует сила Ампера, которая согласно правилу левой руки направлена противоположно движению проводника. На преодоление силы Ампера затрачивается механическая энергия, которая и преобразуется в энергию электрическую.

Энергетическая сторона отчетливо видна и в самом законе электромагнитной индукции или во втором уравнении Максвелла: энергия вихревого электрического поля возникает за счет изменения энергии поля магнитного.

Здесь логично поставить вопрос, а нельзя ли получить магнитное поле за счет изменения поля электрического. Ут-

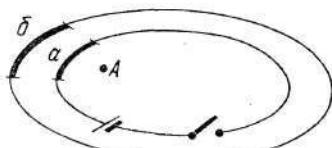


Рис. 94. К задаче на закон Ленца.

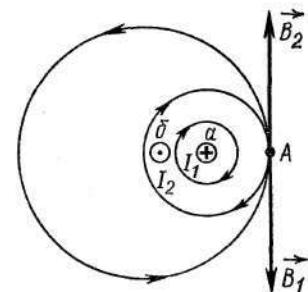


Рис. 95. Объяснение к задаче на закон Ленца.

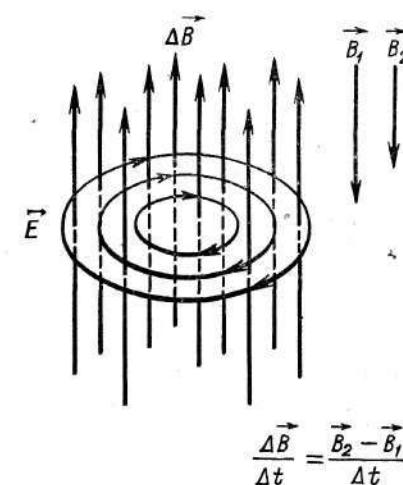


Рис. 96. Взаимосвязь векторов $\Delta\vec{B}$ и \vec{E} .

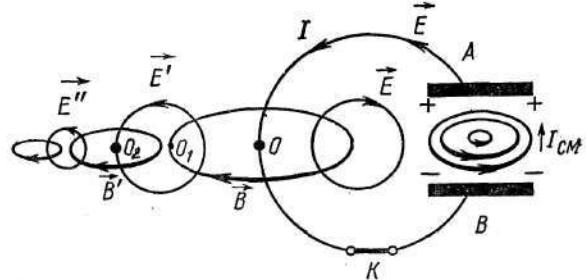


Рис. 97. Объяснение явлений в колебательном контуре.

вердительный ответ на этот вопрос дает первое уравнение Maxwella.

Для уяснения физической сущности явления следует еще раз обратиться к процессам в колебательном контуре.

Рассмотрим сначала конденсатор, между пластинами которого находится диэлектрик (рис. 97).

При разрядке конденсатора ток по проводнику AOB течет от положительно заряженной пластины A к пластине B . Этот ток можно обнаружить различными способами, в том числе по его магнитному полю, например, в окрестности точки O .

Но оказывается, как показали классические опыты русского физика А. А. Эйхенвальда (1863—1944), проведенные им в 1901—1904 гг., магнитное поле возникает и вокруг диэлектрика, помещенного между пластинами конденсатора.

Следовательно, в диэлектрике существует электрический ток. Он обусловлен смещением электрических зарядов в молекулах диэлектрика под действием изменяющегося электрического поля и называется током смещения. Ток смещения имеет то же направление, что и ток проводимости в проводнике AOB . Но ток в этом проводнике, как показывает опыт, будет существовать при разрядке конденсатора и в том случае, когда его пластины находятся в вакууме. Следовательно, логично предположить, что токи смещения и связанное с ними вихревое магнитное поле существуют и в вакууме.

Математически явление описывается первым уравнением Maxwella:

$$\oint B_i dl = \frac{\mu_0}{c} \frac{\partial}{\partial t} \int E_n dS.$$

Поскольку направление вектора \vec{B} токов смещения то же, что и вектора \vec{B} токов проводимости, вектор индукции вихревого магнитного поля \vec{B} , возникающего при изменении электрического поля, образует с вектором $\Delta \vec{E}$ правовинтовую систему (рис. 98).

Однако не всякое изменение электрического поля создает из-

меняющееся магнитное поле.

При $\frac{dE}{dt} = \text{const}$ ток смещения постоянен и $\vec{B} = \text{const}$.

Аналогично при постоянном токе проводимости скорость движения зарядов $v = \text{const}$, $\vec{j} = e n \vec{v} = \text{const}$ и согласно уравнению $\int B_i dl = \mu \mu_0 \int j dS$ $\vec{B} = \text{const}$. Цепочка взаимопревращений электрического и магнитного полей обрывается. Для возникновения электромагнитной волны электрические заряды должны двигаться ускоренно¹.

В колебательном контуре напряжение на обкладках конденсатора $U = Ed$ изменяется по синусоидальному закону. Поэтому величины $\frac{dE}{dt}$ и скорость движения зарядов \vec{v} являются переменными. Это и обуславливает соответственно возникновение между пластинами конденсатора и вокруг проводников переменного вихревого магнитного поля.

2. Электромагнитное поле. Электромагнитная волна

Факт отдельного существования только электрического или только магнитного поля относителен, он объясняется выбором соответствующей системы отсчета [9, § 58]. Уравнения Maxwella отражают взаимосвязь и перенерывное единство электрического и магнитного полей, утверждают существование единого электромагнитного поля.

Продолжим рассмотрение данных взаимосвязей на том же примере колебательного контура (рис. 97).

Допустим, что в некоторый момент мы замыкаем ключ K . Тогда на участке AOB возникает переменный ток, обусловленный колебательным движением электронов.

Рассмотрим четверть периода, в течение которой ток и вместе с ним вихревое магнитное поле возрастают от нуля до некоторого максимального значения. Направление линий магнитной индукции \vec{B} этого поля определяется по правилу буравчика.

¹Исключение составляет движение электрона со скоростью, превышающей скорость света в той среде, где он движется (излучение Вавилова — Черенкова).

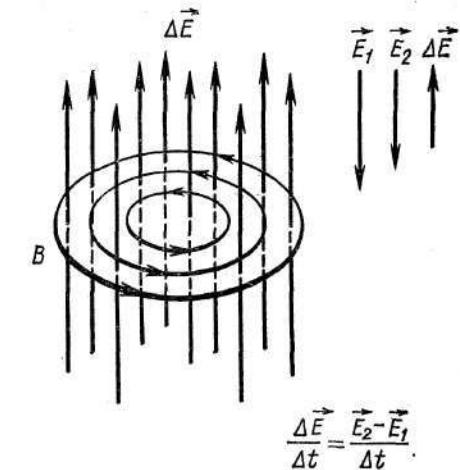


Рис. 98. Взаимосвязь векторов $\Delta \vec{E}$ и \vec{B} .

Рассмотрим далее какую-либо область пространства, например левее точки O , которая пронизывается линиями магнитной индукции \vec{B} переменного магнитного поля, направленными в данном случае за плоскость чертежа. По правилу Ленца или по правилу левого винта нетрудно определить, что направление линий напряженности электрического поля \vec{E}' будет соответствовать движению против часовой стрелки.

Изменение электрического поля \vec{E}' создаст магнитное вихревое поле, которое назовем условно полем \vec{B}' , это поле в свою очередь создаст электрическое поле \vec{E}'' и т. д.

При перезарядке конденсатора в следующую четверть периода электроны будут продолжать двигаться с ускорением (замедлением). В пространстве около проводника вихревое магнитное поле начнет уменьшаться, изменение $\Delta\Phi = \Phi_2 - \Phi_1$ будет иметь противоположный знак, изменится на противоположное и направление вихревого электрического поля.

Но в целом процесс будет аналогичен описанному для первой четверти колебаний. При непрерывном колебании электронов в контуре в пространстве будет распространяться электромагнитная волна.

Обратим далее внимание на то, что вихри магнитного, так же как и электрического, поля (\vec{B} и \vec{B}' ; \vec{E} и \vec{E}'), например, в области OO_1 гасят друг друга, т. е. электромагнитное поле прекращает свое существование в области, где оно возникло около колебательного контура, но зато распространяется в пространстве (со скоростью света).

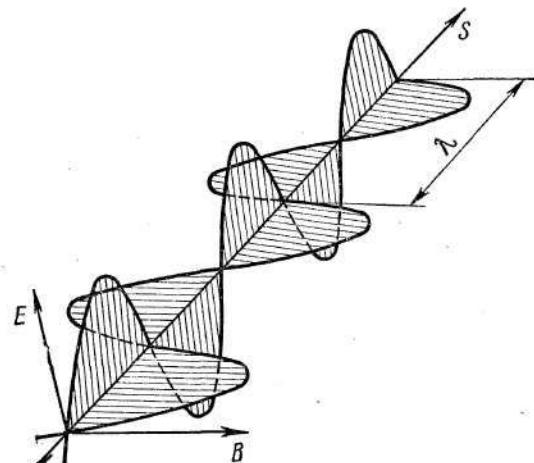


Рис. 99. Электромагнитная волна.

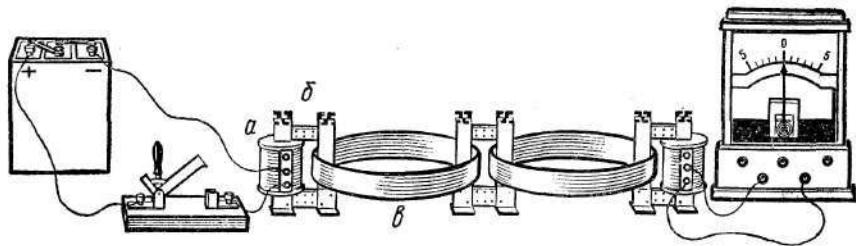


Рис. 100. Модель цепочки Брега.

Из этого, в частности, следует энергетический смысл противоположных знаков у величин $\frac{\partial}{\partial t} \int B dS$ и $\frac{\mu e}{c^2} \frac{\partial}{\partial t} \int E dS$ или различие правил правого и левого винта. В противном случае поле не только распространялось бы в пространстве, но и возрастало около колебательного контура, что противоречит закону сохранения энергии.

Около вибратора в так называемой первой или индукционной зоне сдвиг фаз между \vec{B} и \vec{E} близок к 90° .

Максимуму напряженности электрического поля \vec{E} соответствует нулевое значение магнитной индукции \vec{B} и наоборот.

Однако на значительных расстояниях R от вибратора, определяемых условием $R \gg \frac{2D^2}{\lambda}$ (практически на расстоянии, превышающем примерно на один порядок длину вибратора D), в так называемой волновой зоне, векторы \vec{B} и \vec{E} колеблются синфазно и поэтому электромагнитная волна представляется графиком, показанным на рисунке 99.

Процесс распространения электромагнитного импульса полезно пояснить «цепочкой» Брега, состоящей из железных и медных или алюминиевых колец.

Со школьным оборудованием опыт можно поставить следующим образом. Берут два-три универсальных школьных трансформатора, снимают их низковольтные катушки и вместо них на сердечники надевают толстые медные или алюминиевые кольца, как показано на рисунке 100.

Обмотку одного трансформатора подключают к источнику постоянного тока, а второго — к гальванометру. При замыкании и размыкании тока вокруг витков катушки трансформатора a возникает вихревое магнитное поле. Оно будет особенно сильным в железном сердечнике b . При пронизывании этим полем алюминиевого кольца b в последнем возникает индукционный ток. Эти рассуждения справедливы и для следующего кольца.

Существование вещества (в данном случае металлических колец) на пути распространения электромагнитного поля, как показа-

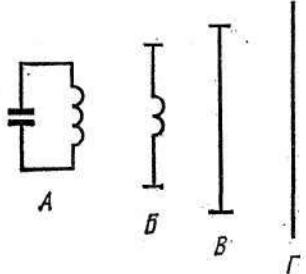


Рис. 101. Превращение закрытого колебательного контура в открытый.

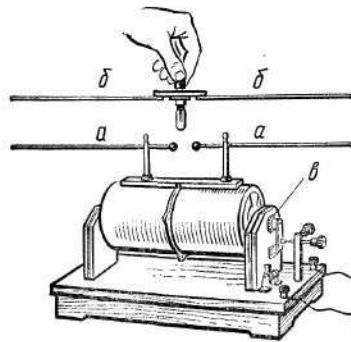


Рис. 102. Резонатор Герца (примитивный диполь).

кровой генератор (катушку Румкорфа). Электромагнитные колебания на некотором расстоянии от вибратора он обнаруживал с помощью резонатора, наблюдая через лупу едва заметные искорки в его искровом промежутке.

Поясняя существование опытов Герца, следует прежде всего помочь учащимся увидеть в вибраторе Герца знакомый им колебательный контур. Для этого целесообразно выполнить серию рисунков, показывающих преобразование колебательного контура с разделенными индуктивностью L и емкостью C (рис. 101, А) в линейный вибратор (рис. 101, Г). Этот вибратор в принципе можно было бы заряжать с помощью механического переключателя, как это было показано на рисунке 37. Однако при высоком напряжении роль такого «включателя» с большим успехом играет искра.

Для разъяснения существа опытов Герца в борны катушки Румкорфа (ИВ-100) вставляют два металлических стержня aa длиной по 50—75 см каждый таким образом, чтобы расстояние между их ближайшими концами составляло 1—2 см. Подключают катушку к источнику постоянного тока на 10 В и получают в зазоре между стержнями искру. Подносят на расстояние 20—25 см от катушки резонатор, представляющий собой два металлических стержня

ли исследования Д. Максвелла, Г. Герца и А. С. Попова, не обязательно. Изменяющееся вихревое магнитное поле создает вихревое электрическое поле (и наоборот) и в вакууме.

Для пояснения этой мысли убирают все кольца и сердечники, находящиеся между крайними катушками трансформаторов, и располагают последние на таком расстоянии одну от другой, чтобы при включении тока в обмотке a гальванометр обнаруживал индукционный ток. Следовательно, электромагнитный импульс передается и через воздух.

Впервые электромагнитные волны были получены Г. Герцем (1857—1894) в его классических опытах, выполненных в 1888—1889 гг. По словам самого Герца, «целью этих опытов была проверка основных гипотез теории Фарадея — Максвелла, а результат опытов есть подтверждение основных гипотез этой теории» [37, т. II, с. 225].

Для возбуждения электромагнитных волн Герц использовал искровой генератор (катушку Румкорфа). Электромагнитные колебания на некотором расстоянии от вибратора он обнаруживал с помощью резонатора, наблюдая через лупу едва заметные искорки в его искровом промежутке.

66, в зазоре между которыми находится неоновая лампочка МН-3 (рис. 102), и наблюдают ее свечение. Явление объясняют возникновением в резонаторе электромагнитных колебаний, индуцированных донесшей до резонатора электромагнитной волной.

При объяснении устройства и действия приборов, особенно катушки Румкорфа, нужно иметь в виду следующее.

Катушка Румкорфа (рис. 103) состоит из двух катушек, навитых на железный сердечник. При размыканиях и замыканиях тока в первичной катушке a , которая состоит из сравнительно небольшого числа витков толстой проволоки, во вторичной катушке b , имеющей огромное число витков тонкого провода, возникает ЭДС индукции, достигающая в ИВ-100 25 кВ. Высокое напряжение вызывает пробой воздуха и образование искры. В первичной обмотке протекает несинусоидальный переменный ток, так как при замыкании молоточком ϑ в первичной цепи сила тока в катушке a нарастает вследствие самоиндукции сравнительно медленно. Поэтому ЭДС во вторичной цепи при размыкании будет значительно больше, чем при замыкании. Если ЭДС, возникающая при замыкании, окажется недостаточной, чтобы вызвать образование искры, то между борными катушками в момент образования искры может идти только прерывистый экстраток размыкания. В этом смысле катушка будет действовать так же, как источник постоянного тока высокого напряжения, например электрофорная машина.

Обычно учащиеся, если им этого не объяснить специально, полагают, что катушка ИВ-100 вместе со стержнями вибратора и составляет колебательный контур. Подобные упрощенные объяснения иногда можно встретить и в литературе. На самом же деле, как показал в 1891 г. русский физик, ученик А. Г. Столетова — Р. А. Колли (1845—1891), в данном случае имеют место колебания низкой частоты в катушке и высокочастотные колебания в разряднике, при этом их взаимное влияние ничтожно. «Пуанкаре иллюстрировал этот факт с помощью тяжелого длинного маятника, к линзе которого подведен короткий легкий маятник. В этом случае колебания обоих маятников почти независимы» [37, т. II, с. 218].

Остается часто непонятным для учащихся и значение искры. Искра выполняет роль включателя, или проводящего мостика из раскаленных газов, соединяющего две половинки вибратора, заряженные до высокой разности потенциалов.

За время существования искры успевает совершиться несколько десятков затухающих колебаний (см. рис. 36), пока из-за потерь энергии на активном сопротивлении и за счет излучения разность потенциалов не упадет до значения, при котором уже невозможен искровой разряд. После этого наступает сравнительно большой пе-

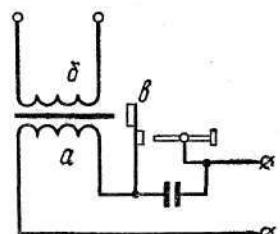


Рис. 103. Схема катушки Румкорфа.

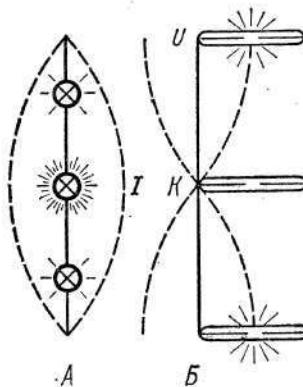


Рис. 104. Стоячие волны вибратора.

пространяются незначительно. Особенно наглядно это видно на примере электрического поля конденсатора, экранированного его металлическими пластинами и локализованного в пространстве между ними.

В противоположность этому электромагнитное поле линейного вибратора свободно распространяется в пространстве.

Относительно процесса и механизма движения электрических зарядов в линейном вибраторе можно без изменения повторить все то, что говорилось о движении зарядов в колебательном контуре (гл. II, 2).

Но линейный вибратор нельзя характеризовать индуктивностью L и емкостью C , сосредоточенными только на каких-то определенных участках. Это подобно рассредоточению массы и силы упругости струны, от которых зависит период колебаний, по всей ее длине. Не следует однако забывать, что механические колебания частиц струны совершаются в направлении перпендикулярном к ее длине, а колебания электронов происходят в направлении вдоль диполя. В прямолинейном вибраторе длины l образуются стоячие волны тока и заряда (или напряжения). Пучность колебаний тока находится в середине вибратора, а пучности заряда (напряжения) — на его концах (рис. 104). Первое можно показать, включив последовательно в вибратор три лампочки (рис. 104, А), и наблюдать наиболее яркое свечение средней из них. Пучности же напряжения легко обнаружить с помощью неоновой лампочки, которая, наоборот, будет ярко светить в том случае, если ее цоколем коснуться концов вибратора, и совершенно затухать при перемещении ее по вибратору к его середине (рис. 104, Б). Таким образом, длина излучаемой вибратором волны $\lambda = 2l$, а основная собственная частота $v = \frac{c}{2l}$. Частоты обертонов в целое число раз выше частоты v .

период времени, когда вибратор не излучает, а заряжается до пробойного напряжения. Время «зарядки» обычно в десятки и сотни раз превышает время «работы» (излучения) вибратора. В этом и заключается одна из причин малой средней мощности искровых генераторов радиоволн.

Целесообразность применения для образования электромагнитных волн линейного вибратора, а не «закрытого» колебательного контура объясняется тем, что электрическое поле закрытого контура почти целиком сосредоточено между пластинами его конденсатора C , а магнитное поле — в катушке L . В окружающее пространство такие поля рас-

3. Основные свойства электромагнитных волн

Открыв электромагнитные волны, Герц экспериментально доказал, что им присущи свойства, общие для любых волн: отражение, преломление, интерференция, дифракция и др.

Для повышения чувствительности опытов Герц помещал вибратор в фокальной линии параболического зеркала, согнутого из цинкового листа, а резонатор — в фокальной линии такого же второго зеркала. Поскольку длина волны составляла около 60 см, то приспособления для опытов имели внушительные размеры: зеркало — высоту 2 м, ширину отверстия 1,2 м и глубину 0,7 м, а асфальтовая призма треугольного сечения была высотой 1,5 м и весила 1,2 т [37, т. II, с. 223—224].

В 1895 г. русский ученый П. Н. Лебедев с помощью весьма тонких опытов получил и исследовал электромагнитные волны длиной всего 6 мм. Опыты с миллиметровыми волнами приблизили их к диапазону инфракрасных волн теплового излучения.

В 1923 г. русский физик А. А. Глаголева-Аркадьева, используя массовый излучатель¹, получила электромагнитные волны длиной до 85 мкм.

Массовый излучатель позволяет получить волны даже более короткие, чем волны инфракрасного теплового излучения. Таким образом, ликвидируется разрыв между диапазонами различных электромагнитных волн.

Электромагнитное поле диполя. Для опытов используют генератор УВЧ Главчутехпрома конструкции Б. С. Зворыкина (рис. 105). Фиксированная частота генератора $1,5 \cdot 10^8$ Гц (длина волны 2 м).

Сначала надо исследовать поле, мысленно представив себе расположение силовых линий электрического и магнитного полей, с помощью приемного диполя a (рис. 106). В любой точке поля

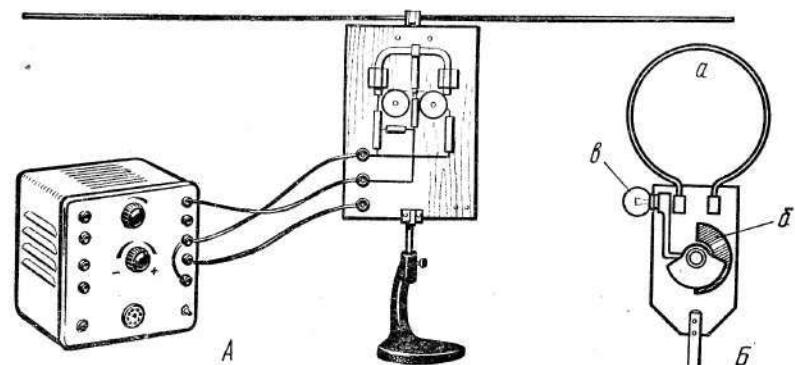


Рис. 105. Генератор конструкции Б. С. Зворыкина.

¹ Массовый излучатель получается из кашицы металлических опилок, погруженных в масло. Его излучение немонохроматично.

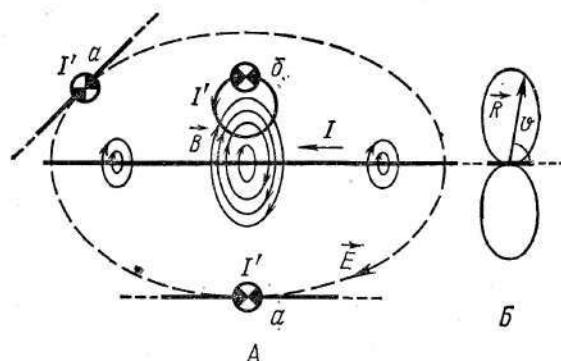


Рис. 106. Исследование поля диполя.

лампочка в диполе будет светить наиболее ярко лишь тогда, когда диполь расположится по касательной к силовой линии электрического поля. Нетрудно также установить, что если приемный диполь расположить перпендикулярно излучающему, то лампочка светить не будет совсем. Следовательно, по диполю *a* можно судить о направлении вектора \vec{E} .

Для того чтобы показать значение в электромагнитной волне магнитного поля, нужно воспользоваться проволочным контуром *b* с неоновой лампочкой или прилагаемым к генератору УВЧ колебательным контуром, состоящим из проволочного витка *a*, конденсатора переменной емкости *b* и лампочки *v* (рис. 105, *B*). Во всех случаях, когда переменное магнитное поле вибратора не пронизывает плоскость витка, тока в нем нет и лампочка не светит. Наибольший же ток возникает тогда, когда виток и вибратор находятся в одной плоскости. Опыты с приемным диполем и витком показывают, что в поле диполя *i*, следовательно, в электромагнитной волне вектор \vec{B} перпендикулярен вектору \vec{E} и направлен так, что векторы \vec{E} и \vec{B} образуют правовинтовую систему с направлением распространения волны (см. рис. 99).

Следовательно, по расположению векторов можно определить направление на передающую радиостанцию (радиопеленгация) [6, § 59].

В отличие от электростатического поля модуль вектора \vec{E} убывает с расстоянием значительно медленнее — обратно пропорционально первой, а не второй степени R . (Также убывает и модуль вектора \vec{B} .) Модули же векторов \vec{B} и \vec{E} пропорциональны ускорению движения электронов в диполе, а следовательно, и квадрату частоты v .

Применительно к звуковым волнам было показано (задача № 19), что интенсивность волны равна произведению плотности потока энергии на скорость ее распространения (вектор Умова). Данное понятие применимо и к электромагнитным волнам.

Плотность энергии в волне электрического поля $W_s = \frac{\epsilon_0 E^2}{2}$, а магнитного $W_m = \frac{\mu_0 H^2}{2} = \frac{B^2}{2\mu_0}$; $W_s = W_m$. Поэтому полная плотность $W = \epsilon_0 E^2 = \mu_0 H^2$.

Интенсивность излучения

$$|P| = \epsilon_0 E^2 c = \mu_0 H^2 c.$$

Приняв во внимание, что скорость распространения волны $C = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}}$ и $E \sqrt{\epsilon_0} = H \sqrt{\mu_0}$, найдем, что интенсивность излучения $P = [\vec{E} \vec{H}] = \frac{1}{\mu_0} [\vec{E} \vec{H}]$ — вектор Умова — Пойнтинга.

Поскольку векторы \vec{B} и \vec{E} пропорциональны квадрату частоты (v^2), интенсивность излучения пропорциональна четвертой степени частоты (v^4). При малой частоте излучение незначительно. Им, например, можно пренебречь для линий переменного тока промышленной частоты.

Заметим, наконец, что интенсивность волны зависит от угла θ между направлением ускорения электрона (оси диполя) и радиус-вектором \vec{R} (рис. 106, *B*). Качественно это хорошо подтверждается на опыте (рис. 106, *A*). Наиболее интенсивное излучение приемный диполь *a* обнаруживает в плоскости, перпендикулярной середине излучающего диполя, а отсутствие излучения — вдоль его оси.

Для демонстраций отражения, преломления, интерференции, дифракции и поляризации электромагнитных волн нужно использовать выпускаемый Главучтехпромом генератор сверхвысокой частоты (СВЧ), длина волны которого $\lambda = 3$ см. Принцип действия, устройство генератора и основные опыты с ним описаны в книге Н. М. Шахмаева и С. Е. Каменецкого [31, изд. 1963 г.].

Не объясняя учащимся внутреннего устройства генератора, в котором использованы неизвестные для них специальные электронные приборы (отражательные кристаллы), ограничивается замечанием о том, что данный генератор, так же как и использовавшийся ранее генератор УВЧ, имеет устройство, подобное излучающему диполю, а приемник аналогичен принимающему диполю, но значительно меньшими размерами, поскольку длина волны генератора не 2 м, а всего 3 см.

Направленная антенна генератора аналогична рупору, а диффузор приемника — слуховой трубе, концентрирующей энергию волн.

Отражение электромагнитных волн. Демонстрацию свойств электромагнитных волн начинают с показа их отражения от металлической поверхности. Для этого собирают установку, показанную на рисунке 107 [31, опыт 219], совершенно аналогичную той, которая использовалась для демонстрации отражения звуковых волн (см. рис. 84). Сантиметровые волны, излучаемые генератором *a*,

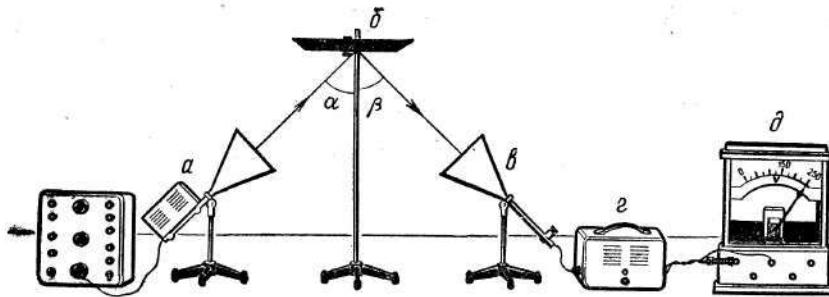


Рис. 107. Отражение электромагнитных волн.

отразившись от металлического листа *б*, попадают в приемник *в*, присоединенный к усилителю низкой частоты *г*. О равенстве углов падения α и отражения β судят по наибольшему отклонению стрелки гальванометра *д*.

Преломление электромагнитных волн показывают с помощью установки, основная часть которой показана на рисунке 108. Волны преломляются трехгранной призмой *б* из диэлектрика.

Интерференцию электромагнитных волн показывают сначала на примере стоячих волн, собрав установки, аналогичные тем, которые применялись для демонстрации стоячих звуковых волн (см. рис. 75 и 76). Сантиметровые волны от генератора СВЧ направляют перпендикулярно металлическому листу и с помощью приемного диполя без рупора обнаруживают узлы и пучности стоячей электромагнитной волны. Так же как и для звуковых волн, опыт позволяет измерить длину волны.

Затем используют схему опыта Ллойда (рис. 109), в котором применен метод расщепления одного пучка волн на два, что обеспечивает их когерентность. Перемещая металлический экран *С* в направлении, указанном стрелкой, наблюдают то усиление, то ослабление приема.

Дифракцию электромагнитных волн демонстрируют на одной или нескольких щелях (дифракционная решетка), а также на диске-

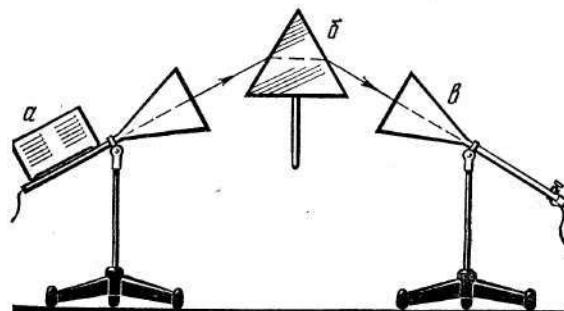


Рис. 108. Преломление электромагнитных волн.

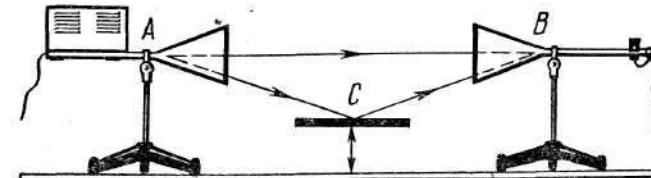


Рис. 109. Интерференция электромагнитных волн по схеме Ллойда.

В последнем случае максимум колебаний в области геометрической тени диска обнаруживают с помощью дипольного приемника [31, опыт 228]. Постановка опытов аналогична опытам по дифракции звуковых волн (см. рис. 87).

Поляризация электромагнитных волн. Для формирования понятия о поляризации электромагнитных волн используют прежде всего представление о том, что эти волны (см. рис. 97, 99, 106) поперечные и векторы \vec{B} и \vec{E} в волне располагаются во взаимно перпендикулярных плоскостях. Затем эти представления надо закрепить и углубить с помощью ряда опытов с генератором СВЧ. Сначала, установив приемник против генератора, врачают одну из антенн вокруг волновода и наблюдают постепенное уменьшение громкости сигнала вплоть до его исчезновения при угле поворота 90° . При дальнейшем вращении приемного диполя громкость постепенно увеличивается вплоть до первоначальной, когда угол поворота достигает 180° . Из опытов делают вывод, что излучение генератора является поляризованным, так же как излучение диполя генератора УВЧ (см. рис. 106).

После этого между генератором и приемником помещают поляризационную решетку и, вращая ее, показывают то усиление, то ослабление принимаемого приемником сигнала. Для объяснения явления прибегают к аналогии с механическими поперечными колебаниями (рис. 110). Щель, расположенная параллельно плоскости поперечных колебаний шнура, пропускает их (случай *а*), а расположенная перпендикулярно — гасит (случай *б*).

Но электромагнитная волна характеризуется двумя векторами \vec{B} и \vec{E} . Какой же из них параллелен щелям поляризационной решетки, когда через них проходит электромагнитная волна? Как показывают теория и опыт, это вектор \vec{B} . Дело здесь в том, что если в поляризованной волне параллельно щелям оказывается вектор \vec{E} , то в металлических прутьях

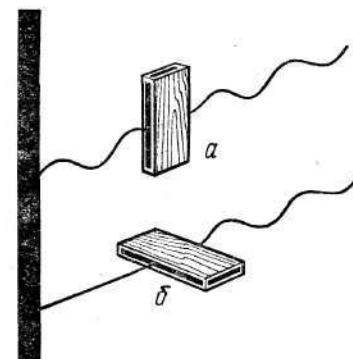


Рис. 110. Механическая аналогия поляризации электромагнитных волн.

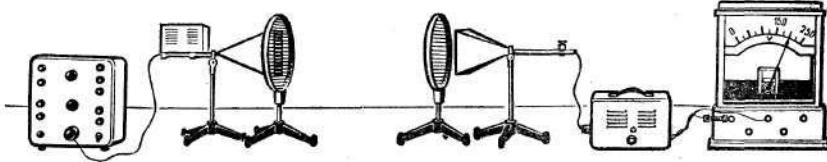


Рис. 111. Поляризация электромагнитных волн.

решетки возникают вынужденные электромагнитные колебания и решетка переизлучает (отражает) электромагнитную волну, которую легко обнаружить с помощью приемника, поставленного с той же стороны от решетки, что и генератор.

Далее учащимся говорят, что в общем случае электромагнитное излучение может состоять из совокупности огромного количества волн, поляризованных в различных плоскостях. В этом случае одна поляризационная решетка позволяет выделить колебания в избранной плоскости (поляризатор), а вторая исследовать их (анализатор).

Установка для соответствующего опыта показана на рисунке 111 [31, опыт 227]. Ее недостатком в указанном смысле является то, что используется поляризованное излучение генератора. При повороте одной из решеток вокруг оси, перпендикулярной ее плоскости, сигналы постепенно уменьшаются вплоть до исчезновения при скрещенных решетках.

4. Изобретение радио А. С. Поповым

Одним из серьезных недостатков аппаратуры Герца была крайне низкая чувствительность ее приемной части: волны можно было обнаруживать по маленькой искре, рассматриваемой в лупу неутомленным глазом в темноте, притом на расстоянии всего в несколько метров от вибратора. В результате даже сам Герц считал, что его открытие имеет сугубо научно-теоретическое значение и неприменимо на практике.

В России одним из первых, получив известие об опытах Герца, занялся их изучением преподаватель Минского офицерского класса в Кронштадте Александр Степанович Попов (1859—1905). В своих работах он главное внимание обратил на увеличение чувствительности приемной части приборов и уменьшение длины электромагнитной волны.

А. С. Попов использовал открытое в 1890 г. французским физиком Э. Бранли увеличение проводимости металлических порошков под действием электрического разряда и опыты английского физика О. Лоджа, который в 1894 г. применил трубку с опилками, названную им когерером, в качестве индикатора электромагнитных колебаний. Действие когерера состоит в том, что под влиянием электромагнитной волны в нем образуются переменные токи высокой

частоты и возникающие маленькие, не видимые глазом искорки сваривают опилки, уменьшая сопротивление порошка в сотни раз.

Так же как и Герц, Лодж не видел возможности использования электромагнитных волн как средства связи. В противоположность им А. С. Попов уже 25 апреля (7 мая по новому стилю) 1895 г. на заседании Физического отделения Русского физико-химического общества сделал доклад «Об отношении металлических порошков к электрическим колебаниям», в котором изложил основные идеи о своем чувствительном приборе для обнаружения и регистрации электромагнитных колебаний. Схема этого прибора, названного грозоотметчиком, выполненная собственноручно А. С. Поповым, показана на рисунке 112.

Прибор содержит все основные части радиоприемника искровой радиотелеграфии, включая антенну и заземление.

7 мая теперь по праву отмечается в нашей стране как День радио.

Свой доклад А. С. Попов закончил словами: «В заключение могу выразить надежду, что мой прибор при дальнейшем усовершенствовании его может быть применен к передаче сигналов на расстояние при помощи быстрых электрических колебаний, как только будет найден источник таких колебаний, обладающий достаточной энергией» [46, с. 296]. И вот менее чем через год, 12 (24) марта 1896 г., на заседании Физического отделения Русского физико-химического общества А. С. Попов демонстрирует передачу первой в мире радиограммы.

На заседании присутствовали многие крупные ученые, в том числе известные своими трудами в области электромагнитных колебаний И. И. Боргман (1849—1914) — профессор Петербургского университета, автор первого руководства по максвелловской теории на русском языке, А. И. Садовский (1859—1920), впервые теоретически показавший, что электромагнитное поле обладает моментом количества движения и др. [37, т. II].

Вот что писал впоследствии об этом историческом событии профессор О. Д. Хвольсон: «Я на этом заседании присутствовал и ясно помню все детали. Станция отправления находилась в Химическом институте университета, приемная станция в аудитории старого

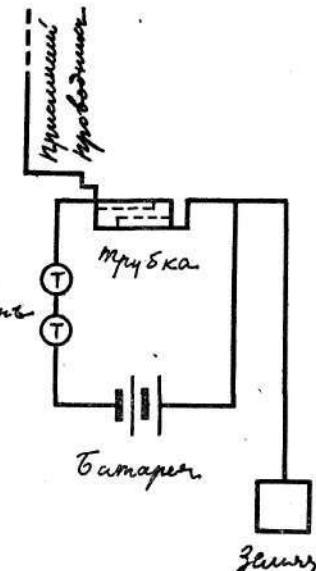


Рис. 112. Грозоотметчик А. С. Попова. Схема этого прибора, названного грозоотметчиком, выполненная собственноручно А. С. Поповым, показана на рисунке 112.

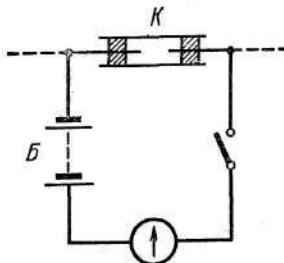


Рис. 113. Схема демонстрации принципа действия приемника А. С. Попова.

Трудно описать восторг многочисленных присутствовавших и овацию А. С. Попову, когда эти два слова были написаны» [46, с. 297—298].

Подобные воспоминания оставили профессора В. В. Скobel'цин, Б. П. Вейнберг, М. А. Шателен и другие, присутствовавшие на заседании ученые.

В средней школе принцип действия передатчика и приемника А. С. Попова можно продемонстрировать с помощью установки, показанной на рисунке 102, в которой диполь с когерером *K* (рис. 113) замкнут на батарею *B* через гальванометр. В момент приема электромагнитной волны сопротивление когерера уменьшается, а ток в цепи увеличивается настолько, что стрелка гальванометра отклоняется на всю шкалу. Для прекращения приема сигнала опилки когерера следует встряхнуть, например, легкими постукиваниями карандаша. В приемной станции А. С. Попова эту операцию выполнял автоматически молоточек электрического звонка.

В 1897 г. дальность приема была увеличена до 4 км, а к 1899 г. до 45 км.

Преимущества нового вида «беспроволочной» связи с особой убедительностью были продемонстрированы в связи с ремонтными работами на броненосце «Генерал-адмирал Апраксин», наскочившем 13 ноября 1899 г. на камни у острова Гогланд. На острове и на финском берегу у г. Котка были установлены радиостанции, которые за время работ передали 440 телеграмм на расстояние 45 км. Иные средства связи в данных условиях были почти невозможны.

Примечательно, что работа радиостанции началась сообщением, которое спасло жизнь 50 рыбакам. 24 января (ст. стиль) Попов передал из Котки на Гогланд находившемуся там ледоколу «Ермак» телеграмму: «...около Лавансари оторвало льдину с 50 рыбаками, окажите немедленно содействие спасению этих людей...»

Первоначальную конструкцию приборов А. С. Попов быстро улучшал. Совместно с П. Н. Рыбкиным он усовершенствовал когерер.

¹ Слова были написаны латинскими буквами: Heinrich Hertz.

Была обнаружена возможность приема сигналов на слух с помощью телефона, без аппарата Морзе. Накапливались и другие интересные факты; например, было установлено отражение электромагнитных волн от кораблей (первая радиолокация).

«Летом 1900 г. сообщение о работах А. С. Попова было сделано на Всемирном электротехническом конгрессе в Париже и было воспринято с большим интересом, причем никаких возражений против приоритета Попова в изобретении беспроволочного телеграфа не было.

В то же лето Александр Степанович получил на Всемирной парижской выставке за свое изобретение большую золотую медаль и диплом» [46, с. 312].

Между тем было немало попыток отдать приоритет в изобретении радио итальянцу Маркони. Да и сейчас в западной литературе в связи с изобретением радио упоминают Маркони. Так, например, в «Истории физики» Марио Льоцци говорится следующее: «Сочетав генератор Риги и индикатор Онести с гениальными идеями «антенны» и «заземления», в конце 1895 г. Гульельмо Маркони (1874—1937) успешно произвел первые практические эксперименты в области радиотелеграфии...» [41, с. 289].

О Попове Льоцци не говорит ни слова. Но даже и из этих слов следует, что первым был не Маркони. Ведь «гениальные идеи антенны и заземления» принадлежат Попову (см. рис. 112), который не только раньше Маркони произвел соответствующие опыты, но и раньше сообщил о них в печати со всеми техническими подробностями.

Первые весьма общие сведения об опытах Маркони без описания его приборов появились в печати только в июне 1896 г.

Относительно приоритета Попова есть даже признание официального издания компании Маркони под названием «Ежегодник беспроволочной телеграфии и телефонии» (вып. 1922 г.).

«Вопрос о приоритете Маркони в деле изобретения беспроволочного телеграфа поднимался еще неоднократно, но каждый раз заканчивался провалом» [46, с. 301]. На этот счет есть заключения нескольких комиссий, патентных бюро, например, в Германии, мнения таких авторитетов, как Бранли и Лодж и т. д. Сам А. С. Попов 10 декабря 1897 г. в английском журнале «Электришн» писал, что устройство Маркони в точности воспроизводило схему его грозо-отметчика.

Судьбы А. С. Попова и Г. Маркони сложились различно. Причин этому было много, как материальных, так и духовных. Маркони сначала предложил приемное устройство итальянскому правительству, но получил отказ. После неудачи на родине Маркони сумел привлечь к делу капитал в Англии и стал преуспевающим миллионером.

А. С. Попову были сделаны заманчивые предложения в Англии и Америке. Но он считал, что имеет право отдать свой труд и талант только родине. «Я горд тем, что родился русским,— говорил

Попов.— И если не современники, то, может быть, потомки наши поймут, сколь велика моя преданность нашей родине и как счастлив я, что не за рубежом, а в России открыто новое средство связи».

Как гуманист и прогрессивный человек, А. С. Попов болезненно переживал события русско-японской войны и гнетущую атмосферу, созданную самодержавием, в частности, в высших учебных заведениях.

«Великий изобретатель умер 31 декабря 1905 г. от кровоизлияния в мозг на посту директора Электротехнического института. Гибель ускорил петербургский градоначальник, потребовавший от Попова решительных мер по прекращению студенческих «беспорядков». А. С. Попов отказался. Как рассказывает дочь А. С. Попова Р. А. Попова, он вернулся от начальства в тяжелом состоянии: «Даже мы, дети, заметили что-то неладное. Он был бледен, губы его дрожали». Общественность оценила смерть Попова как новую жертву «современных невыносимо тяжелых условий в России» [37, т. II, с. 239]. Талантливый ученый погиб в расцвете своих творческих сил: ему было всего 47 лет.

Научный и гражданский подвиг ученого был по достоинству оценен только после установления Советской власти.

5. Принципы современной радиосвязи

Новый этап в развитии радиосвязи начался с изобретения электронных ламп, в которых используется явление термоэлектронной эмиссии, открытое Эдисоном в 1884 г.

Первую электронную лампу описал и исследовал Ричардсон в 1901 г., а в 1904 г. был изготовлен первый диод, в 1907 г.— первый триод. В 1913 г. появились первые ламповые генераторы, совершенно вытеснившие генераторы искровые. Их важнейшее преимущество — получение стабильных незатухающих колебаний. Все это открыло новые технические возможности для передачи с помощью радиоволн и речи, и музыки, и изображений.

Принцип получения незатухающих электромагнитных колебаний в замкнутом контуре с помощью лампового генератора (см. рис. 57) учащимся известен. Напомним о зависимости частоты излучения от параметров контура ($T = 2\pi\sqrt{LC}$), следует особо остановиться на назначении антенны.

Обычно антенна представляет собой отдельный открытый колебательный контур, настроенный в резонанс с колебательным контуром генератора и связанный с последним, например, индуктивной связью. Полезно уточнить, что излучение антенны зависит от ее расположения. Горизонтально (особенно низко) расположенная антенна излучает значительно хуже, чем вертикальная. Было также установлено, что электрические силовые линии вертикальной заземленной антенны симметричны относительно поверхности Зем-

ли (рис. 114, A), а это позволило уменьшить длину антенны вдвое, не изменяя длины излучаемой волны (рис. 114, B).

Нетрудно однако видеть, что и в этом случае высота антенны, например, при $\lambda = 1200$ м составила бы значительную величину — 300 м. Дальнейшего уменьшения длины антенны можно достигнуть, включая в вибратор последовательно конденсатор. Тогда общая емкость антенны, период ее собственных колебаний и длина излучаемой волны становятся меньше.

Приемная антенна принципиально ничем не отличается от передающей.

Возможность передачи кодированных сигналов, например, по азбуке Морзе, с помощью радиоволн, излучаемых ламповыми генераторами, для учащихся очевидна. Новыми для них являются сведения о способах передачи звуков, например, человеческой речи. Для этого следует изменять параметры излучаемой волны, или, как говорят, модулировать ее.

Незатухающие электромагнитные колебания характеризуются фазой, частотой и амплитудой. Поэтому для передачи сигналов необходимо изменять один из этих параметров.

Наиболее распространена амплитудная модуляция, которая применяется радиостанциями для диапазонов длинных, средних и коротких волн. Частотную модуляцию применяют в передатчиках, работающих на ультракоротких волнах.

В средней школе учащиеся знакомятся только с амплитудной модуляцией. Первоначальное понятие об амплитудной модуляции можно дать с помощью следующего вводного опыта. Звуковой генератор соединяют с электронным осциллографом и получают на его экране осциллограмму синусоидальных колебаний. Затем к зажимам низкоомного выхода звукового генератора присоединяют угольный микрофон и, воздействуя на него звучанием камертона, получают осциллограмму модулированных колебаний [17, т. II, опыт 118].

После этого следует продемонстрировать или в крайнем случае разобрать по схеме амплитудное модулирование колебаний в колебательном контуре лампового генератора [9, § 66].

Осциллограмму или график истолковывают как изображение колебаний высокой несущей частоты, амплитуда которых медленно меняется со звуковой частотой.

При этом учителю следует иметь в виду, что взаимодействие колебаний звуковой частоты Ω и колебаний высокой частоты ω

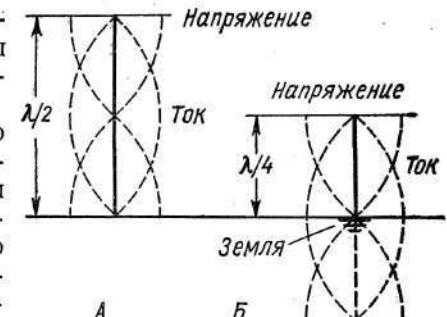


Рис. 114. Стоячие волны в заземленной и незаземленной антенах.

в контуре генератора эквивалентно сложению следующих трех гармонических колебаний:

$$x_1 = A \cos \omega t; x_2 = a \cos (\omega + \Omega) t; x_3 = a \cos (\omega - \Omega) t.$$

В этом случае

$$x = x_1 + x_2 + x_3 = A \left(1 + \frac{2a}{A} \cos \Omega t \right) \cos \omega t,$$

амплитуда результирующего колебания изменяется со звуковой частотой Ω .

Такой результат сложения колебаний высокой и низкой частот объясняется тем, что в цепи имеются нелинейные сопротивления [25, гл. 3].

Следовательно, модулированное колебание в данном случае является суммой трех колебаний: основной несущей частоты ω и двух боковых частот. Если же сигнал содержит n различных частот Ω_n , то появится $2n$ боковых частот. А при несинусоидальном модулирующем сигнале появятся две боковые полосы частот шириной $2\Omega_m$, где Ω_m — некоторая наибольшая для данного модулирующего спектра частота.

Для воспроизведения в приемнике переданного звукового сигнала модулированные высокочастотные колебания необходимо демодулировать (детектировать). Для этого используют нелинейные выпрямляющие устройства: полупроводниковые выпрямители или электронные лампы (в простейшем случае диоды). Принцип действия этих приборов известен учащимся из курса физики IX класса.

Прием и детектирование модулированных электромагнитных колебаний сначала целесообразно рассмотреть на простейшей схеме детекторного приемника, а затем, постепенно усложняя схему, знакомят учащихся с ламповыми радиоприемниками.

Преимущество такого подхода при изучении данной темы заключается в том, что он позволяет сосредоточить внимание учащихся на физической сущности радиоприема и детектирования.

Следуя этой методике, полезно и детекторный приемник рассмотреть с помощью ряда усложняющихся схем, что способствует их лучшему запоминанию и осмысливанию назначения различных деталей.

Простейшим приемником является уже известный учащимся приемный диполь или антenna, представляющие собой приемный колебательный контур, настроенный в резонанс с контуром передатчика.

Видоизменим теперь схему приемника, включив параллельно конденсатору телефона T (рис. 115). А параллельно телефону включим блокировочный конденсатор C_b . Это и будет простейшая схема детекторного приемника. Настройка его контура в резонанс

достижется изменением емкости C и индуктивности L . (Для учителя заметим, что резонанс не может быть слишком «острым», так как в приемнике должны попасть и колебания боковых частот, без чего невозможно получение качественного воспроизведения звука.)

Через детектор будет течь пульсирующий ток, график которого показан на рисунке 116, *A*. Этот ток далее разветвляется: часть его течет через обмотку телефона T , а часть через конденсатор C_b , заряжая его.

В тот полупериод, когда детектор не пропускает ток, конденсатор C_b разряжается через телефон, в результате чего в нем все время течет пульсирующий ток, амплитуда которого изменяется со звуковой частотой (рис. 116, *B*). Пульсации этого тока и вызывают колебание мембранны телефона.

Возможно и другое эквивалентное объяснение процесса детектирования [10, § 121]. Пульсирующий ток, текущий через детектор, рассматривают как сочетание высокочастотных пульсаций и колебаний звуковой частоты. Высокочастотные колебания ответвляются в конденсатор C_b , который согласно формуле $R_C = \frac{1}{\omega C_b}$ представляет для них малое сопротивление в отличие от сопротивления $R_L = \omega L_t$ обмотки телефона. Таким образом, через телефон будет протекать в основном ток звуковой частоты.

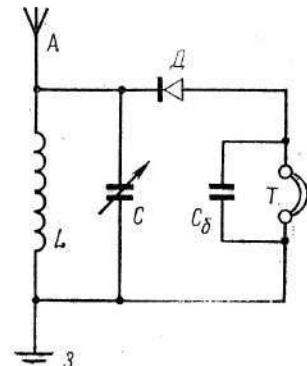


Рис. 115. Схема простейшего радиоприемника.

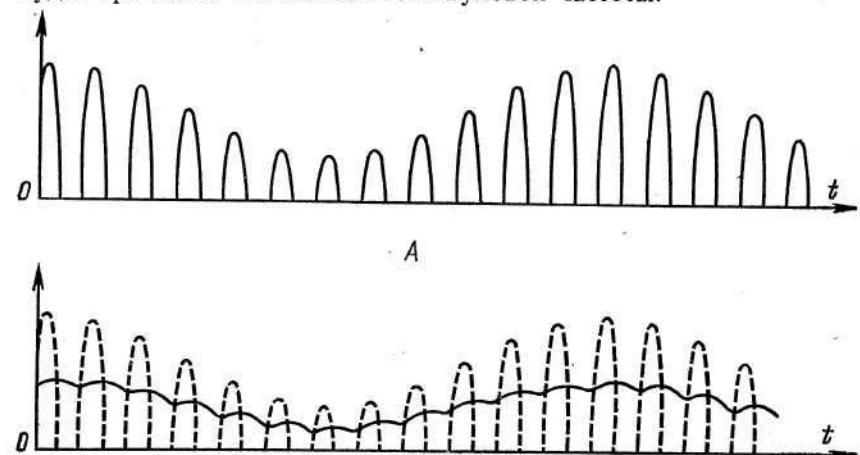


Рис. 116. Демодуляция колебаний.

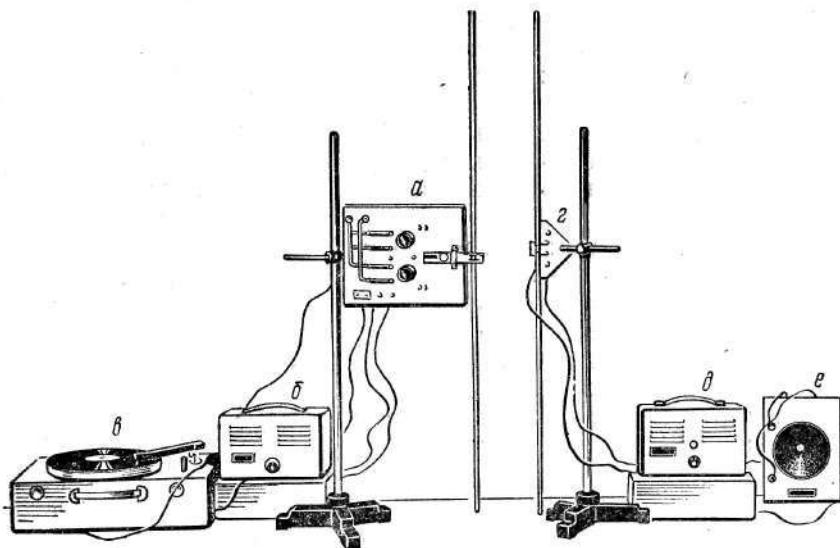


Рис. 117. Установка для радиотелефонной передачи.

Демонстрация детекторного приемника и тем более выполнение лабораторной работы по его сборке и испытанию всегда оставляют большое впечатление, поражая своей простотой, наглядностью и возможностью прикоснуться к гениальному творению в его первозданном виде. При проведении лабораторной работы лучше всего использовать набор по радио Б. С. Зворыкина, выпускаемый Главучтехпромом. Для уверенного приема дальних радиостанций следует пользоваться хорошей наружной антенной.

Простейший ламповый приемник достаточно изучить по схеме и описанию, которые даны в учебнике.

Весь процесс радиопередачи и приема модулированных сигналов следует показать так, как это рекомендует Б. С. Зворыкин [17, т. II, опыт 119]. Для сборки радиопередатчика целесообразно использовать генератор УВЧ *a*, усилитель низкой частоты *b* и электропроигрыватель *c* (рис. 117), а для сборки радиоприемника — приемный диполь *d* с детектором, второй усилитель низкой частоты *d* и громкоговоритель *e*. Питание радиопередатчика и приемника осуществляют от кенотронного выпрямителя (на рисунке не показан).

Сборку простейших радиоприемников желательно поставить в качестве работы физического практикума [11, работа 33].

6. Электромагнитные явления в природе

Общеизвестно существование магнитного и электрического полей Земли, от которых зависят многие явления в околосземном пространстве. Поверхность Земли и проводящий слой ионосферы

служат как бы обкладками гигантского сферического конденсатора. Поверхность Земли имеет отрицательный потенциал по отношению к ионосфере, измеряемый сотнями вольт. Это поле играет определенную роль в целом ряде физических процессов, происходящих в воздушной оболочке и на поверхности Земли. Так, например, установлена связь между изменениями земного электростатического поля и полярными сияниями.

Магнитное поле Земли представляет собой ловушку для движущихся заряженных частиц. Вокруг Земли образуются огромные радиационные пояса, содержащие мощные потоки электронов и протонов, опасные для космонавтов, не имеющих специальной защиты. Причина существования магнитного поля Земли и других планет во многом еще остается загадкой.

Как показали исследования, проведенные с помощью космических ракет, Луна не имеет магнитного поля, а магнитные поля Марса и Меркурия гораздо слабее земного. Мощные магнитные поля имеются на Солнце, особенно в области солнечных пятен.

В последние десятилетия с помощью радиотелескопов, представляющих собой чувствительные радиоприемники со специальными антennами, открыты различные виды внеземных радиоизлучений и радиоисточников. Например, были открыты так называемые «радиогалактики», невидимые в оптические телескопы, внегалактические источники мощного излучения — квазары, источники строго периодических радиоимпульсов — пульсары и т. д. Излучают радиоволны и тела нашей солнечной системы: Солнце и планеты.

Изучение внеземных излучений позволяет на новой основе представить себе строение вселенной, ее прошлое, настоящее и будущее.

Изучение электрических и магнитных явлений в живой природе берет свое начало от модных в конце XVIII в. опытов с «живым магнетизмом», в которых экспериментаторы использовали электростатические машины, и затем классических опытов Луиджи Гальвани в 1786 г., заложивших основы электрофизиологии [см. 37, т. II].

В настоящее время изучение электрических явлений в живом организме, в том числе и человека, — одно из непременных условий диагностики и лечения болезней.

Общеизвестно, например, значение исследования токов сердца с помощью электрокардиографа, дающего наиболее надежные данные о сердечных заболеваниях, исследование биотоков мозга и т. п.

Электрические заряды и электрическое поле играют большую роль в жизнедеятельности клеток. В спокойном состоянии клетки снаружи заряжены положительно, а внутри отрицательно. Разность потенциалов возникает благодаря тому, что оболочка клетки при ее жизнедеятельности неодинаково поглощает и пропускает различные ионы. Как только клетка погибает, разность потенциалов исчезает.

Некоторые животные, например более 200 видов рыб, обитающих в южных морях, озерах и реках, обладают особыми электри-

ческими органами. Это, например, знаменитые электрические скат, сом и угорь. Положительный полюс их электрического органа расположен у головы, а отрицательный — у хвоста. Напряжение, составляющее при разрядке сотни вольт, способно парализовать или убить животных, на которых они охотятся, а у человека вызвать электрошок.

Электрические органы у многих рыб, например у мормируса и гимнарха, служат также своеобразными электрорадарами. Эти рыбы хорошо чувствуют самое незначительное изменение электромагнитного поля и потому способны, например, различать одинаковые по форме и размерам предметы, но обладающие различной электропроводимостью. Для локации гимнарх пользуется электрическими импульсами в несколько вольт, испуская их около сотни в минуту.

7. Развитие радио в СССР

От царской России Советской республике досталась устаревшая и разрушенная сеть немногочисленных искровых радиостанций. На большей части страны белогвардейцами и интервентами была уничтожена и телеграфная сеть. В условиях гражданской войны и блокады отечественная наука и техника могла рассчитывать лишь на свои собственные силы.

И тем не менее в этих тяжелейших условиях, усугубленных разрухой и голодом, была поставлена и решена сложнейшая задача — задача развития радиосвязи в нашей стране. Ее решению особое значение придавал В. И. Ленин, который, несмотря на всю свою занятость, постоянно держал в поле своего зрения не только организационные, но и технические стороны дела, всемерно содействуя его успеху. Только с 1918 по 1921 г. было принято пять важнейших декретов СНК и СТО¹ по вопросам развития радио.

Ядро коллектива, возглавившего в первые годы Советской власти исследования в области радио, составила группа высококвалифицированных ученых, инженеров и техников, работавших, презирая лишения, голод и холод в скромной «лаборатории» Тверской приемной радиостанции. Среди них — известные ученые В. К. Лебединский (1868—1937) и М. А. Бонч-Бруевич (1888—1940), много сделавшие для развития радиотехники в нашей стране. Здесь была создана первая отечественная катодная лампа.

В 1918 г. лаборатория переехала в Нижний Новгород, став по существу первым научно-исследовательским институтом, объединившим вокруг себя все научно-технические кадры, работающие в области радио.

В этой лаборатории Бонч-Бруевичем была выпущена в 1919 г. первая усилительная электронная лампа и создан первый лампово-

ый радиотелефонный передатчик. Насколько это было ново и необычно говорят воспоминания А. М. Николаева: «Из многих местсыпались телеграммы: «Слышали человеческий голос по радио, объясните»... Стали получать письма, в которых сообщалось немало курьезов, вроде того, что с одним радиостом случилось нервное потрясение, когда он вдруг вместо обычных телеграфных сигналов Морзе услышал сильный голос: «Алло, алло! Говорит Нижегородская радиолаборатория, слушайте!» [42, с. 18].

5 февраля 1920 г. В. И. Ленин писал Бонч-Бруевичу: «Пользуюсь случаем, чтобы выразить Вам глубокую благодарность и сочувствие по поводу большой работы радиоизобретений, которую Вы делаете. Газета без бумаги и «без расстояний», которую Вы создаете, будет великим делом. Всяческое и всемерное содействие обещаю Вам оказывать этой и подобным работам. С лучшими пожеланиями В. Ульянов (Ленин)¹.

Первый международный радиотелефонный разговор был осуществлен осенью 1920 г. между Москвой и Берлином, во время которого был установлен мировой рекорд по дальности радиотелефонной передачи.

Передача показала, что отечественная радиотехника не уступает иностранной. (Во время этого опыта и позже в течение 1920 г. немецкая радиостанция, приняв передачу, из-за неполадок так и не ответила Москве.) [42, с. 28].

Осенью 1922 г. начала действовать самая мощная в мире радиостанция имени Коминтерна с передатчиком Бонч-Бруевича ($\lambda = 1744$ м). 17 сентября 1922 г. состоялся первый радиоконцерт. В 1923 г. Бонч-Бруевич создал генераторную лампу мощностью 25 кВт с охлаждаемым водой анодом. В 1925 г. достижения советской радиотехники были высоко оценены и произвели большое впечатление на международной выставке в Стокгольме. В 1927 г. в Москве на Шаболовке вступила в строй самая мощная в то время станция на 40 кВт.

Исследования в области радио велись все более широким фронтом. О. В. Лосевым было открыто свойство кристаллического детектора генерировать незатухающие колебания. (Теперь мы знаем, что это был первый транзистор.) Изучали и начали использовать направленное излучение антенн, был создан «громкоговорящий телефон», с работами над которым так торопил изобретателей В. И. Ленин.

М. В. Шулейкин дал математический анализ процесса телегравидирования; Б. А. Введенский разработал теориюгибания радиоволн вокруг Земли.

Советская радиотехника внесла свою достойную лепту и в укрепление обороны страны. Во время Отечественной войны в нашей стране была построена самая мощная в мире 1200-киловаттная средневолновая радиовещательная станция. Советская Армия и

¹СНК — Совет народных комиссаров. СТО — Совет труда и обороны.

¹ Ленин В. И. Полн. собр. соч. Изд. 5-е, т. 51, с. 130.

Глава V

СВЕТОВЫЕ ВОЛНЫ

партизанские соединения располагали такими средствами радиосвязи, которые в немалой мере способствовали победам над фашистскими захватчиками. Советская Армия использовала радио не только для средств связи. С помощью радио в тылу врага приводили в действие на больших расстояниях от фронта взрывные устройства — радиомины, первые образцы которых были созданы еще в 1925 г. С помощью радиомин был уничтожен вместе с офицерами и охраной в своей резиденции гитлеровский комендант Харькова, взлетели на воздух во время важного совещания около 200 старших офицеров вермахта в Одессе, в ответственный момент боев под Москвой рухнул вместе с идущим по нему вражеским составом мост через Истру и т. д.

«Подобного оружия не было в немецкой армии ни перед войной, ни во время войны. Лишь осенью 1942 года немецким саперам удалось обнаружить одну такую мину. Ее отвезли в Германию и потратили больше года, чтобы скопировать советский образец. Несмотря на грозные приказы самого Гитлера, наладить производство радиофугасов фашистам не удалось»¹.

Дальнейшее развитие радиотехники получила в послевоенные годы.

В настоящее время все большее внимание уделяется использованию ультракоротких волн. В частности, дециметровые и сантиметровые волны используют в линиях радиорелейной связи, в которой сигналы передаются «по эстафете» от одного приемно-передаточного пункта к другому с помощью высоких антенн, находящихся одна от другой в пределах прямой видимости (40—60 км).

Обнаружено, что УКВ отражаются от неоднородностей тропосферы и ионосферы. Это позволяет вести их прием с помощью высокочувствительных приемников на расстоянии многих сотен километров.

Новые возможности для развития телефонно-телеграфной связи и телевидения открыли искусственные спутники Земли. Сигнал с Московского телекоммуникационного центра идет на спутник «Молния», а оттуда на принимающие антенны любого города. Благодаря спутникам «Молния» жители Севера, Дальнего Востока и Средней Азии могут смотреть телевизионные, в том числе и цветные, передачи из Москвы.

Дальнейшая задача — создание таких мощных спутников-ретрансляторов, которые бы позволили принимать телепередачи прямо на антенны телевизоров.

Область применения радио давно вышла за рамки связи. Можно без преувеличения сказать, что развитие всей современной науки, техники и хозяйства в значительной своей части связано с радиоэлектроникой. Созданы новые отрасли наук и новые применения радиотехники: радионавигация, радиометеорология, радиоастрономия и др. Радиотехнические схемы стали составной частью огромного числа современных приборов, машин, промышленных агрегатов и их комплексов. Основанная на радиоэлектронике автоматика и телемеханика — знамение времени.

¹ Горбунов Е. ТОС — техника особой секретности.— «Техника молодежи», 1975, № 5, с. 59.

Тема «Световые волны» завершает «волновой концентрический» курса физики X класса. Ее изучение основывается на имеющихся у учащихся сведениях по геометрической оптике, а также о механических и электромагнитных колебаниях и волнах.

Как завершающая, эта тема позволяет обобщить и повторить важнейшие понятия о колебаниях и волнах различной природы, познакомить учащихся с развитием взглядов на природу света.

Согласно программе в данной теме основное внимание уделяется понятиям:

1) скорости света как предельной скорости перемещения любого физического объекта и важнейшей физической константе;

2) волновым свойствам света (на примере интерференции и дифракции).

В ознакомительном плане дается также понятие о поперечности световых волн (на примере основных явлений — поляризации света).

Ко времени изучения указанного материала учащиеся уже знают, что свет — это электромагнитные волны. По аналогии с излучением диполя (см. рис. 106) следует предположить, что и атомы вещества, излучающие свет, представляют собой своего рода микровибраторы. Таким образом, сначала используют представления классической теории излучения, согласно которой электрон в атоме движется вокруг ядра по эллиптической боровской орбите. Это движение, как и механическое движение точки по окружности (см. рис. 16), можно разложить на два взаимно перпендикулярных гармонических колебания и, следовательно, свести излучение атома к излучению микровибратора.

Главный недостаток данной модели заключается в том, что она не может объяснить, почему не излучает невозбужденный атом, хотя движение электронов по его орбитам является ускоренным. Объяснение, как известно, дает только квантовая теория. Несмотря на это, классическая теория излучения также позволяет получить ряд важных выводов, подтверждающих на опыте, в том

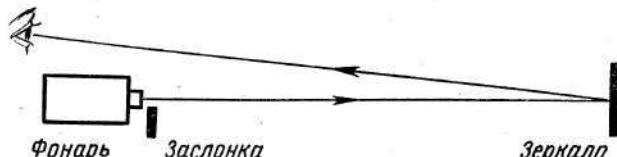


Рис. 118. Схема опыта Галилея по измерению скорости света.

числе установить зависимости: $E \sim v^2$, $P \sim v^4$, зависимость интенсивности излучения от угла ϑ (см. рис. 106, Б), которые справедливы как для излучения диполя, так и для излучения атома¹.

В соответствии с волновой теорией атом излучает свет, т. е. электромагнитные волны, вызванные почти гармоническими медленно затухающими колебаниями электронов. По современным данным, время колебаний (время жизни возбужденного атома или время его «высвечивания») $\tau = 10^{-8} - 10^{-9}$ с. За это время образуется цуг волн, длина которого $l = ct = 0,3 - 3$ м. Число волн в цуге для средней части спектра при $\lambda = 5 \cdot 10^{-7}$ м равно: $n = \frac{l}{\lambda} = 6 \cdot 10^5 - 6 \cdot 10^6$. (В квантовой теории цугу волн соответствует испускание фотона.)

1. Скорость света и ее измерение

Одним из первых наметил путь измерения скорости света Галилео Галилей. Для того чтобы дать представление о принципе всех последующих лабораторных методов измерения скорости света и возникающих при этом технических трудностях, не ограничиваясь качественным описанием опытов Галилея, полезно решить следующие задачи.

Задача 31. На рисунке 118 показана схема опыта, с помощью которого Галилей предлагал измерить скорость света. Открывая заслонку фонаря, нужно было определить, через сколько времени вернется свет, отразившись от зеркала. Покажите расчетами, приняв $s = 1,5$ км, в чем главная техническая трудность такого эксперимента.

Решение. Свет проходит путь, равный $2s$, за время $t = \frac{2s}{c} = \frac{3 \text{ км}}{3 \cdot 10^5 \frac{\text{км}}{\text{с}}} = 1 \cdot 10^{-5}$ с. Обнаружить столь малый промежуток времени при таком опыте невозможно.

Задача 32. Допустим, что в предыдущем опыте используют фотоаппарат с лампой-вспышкой, имеющий выдержку $1/500$ с. На каком минимальном расстоянии s должно быть находиться зеркало, чтобы отраженный им луч не засветил фотопленку? Принять условие: лампа посылает свет в тот же момент, как открывается затвор фотоаппарата.

¹ См.: Фабрикант В. А. О классической теории излучения.—«Физика в школе», 1974, № 1.

$$\begin{aligned} \text{Решение. } s &= \frac{ct}{2} = \\ &= \frac{3 \cdot 10^5 \frac{\text{км}}{\text{с}} \cdot 1 \text{ с}}{2 \cdot 500} = 300 \text{ км.} \end{aligned}$$

Практическое осуществление опыта крайне затруднено значительным расстоянием s .

Таким образом, идея измерения скорости света в принципе такова же, как для измерения скорости звука с помощью эха: посыпается световой импульс или цуг волн и измеряется время его перемещения на известное расстояние до преграды и обратно. Главная трудность и состоит в измерении крайне малых промежутков времени или необходимости использовать очень большие расстояния.

Впервые скорость света была измерена датским астрономом О. Рёмером в 1676 г. на основании наблюдений за спутниками Юпитера [9, § 94].

Лабораторным методом скорость света впервые определил французский ученый И. Физо в 1849 г. Описание опыта Физо приведено в учебнике [9, § 81]. Там же в виде задачи дан и усовершенствованный способ определения скорости света по методу Майкельсона [9, упр. 10].

Расчетная задача с данными опыта Физо имеется в «Методике решения задач» С. Е. Каменецкого и В. П. Орехова [22].

В ознакомительном плане можно также дать учащимся понятие об измерении скорости света и в различных средах на примере задачи [22, № 861].

Задача * 33. В 1862 г. французский физик Фуко поставил следующий опыт [6, с. 394]. Свет от источника S (рис. 119) отражался вращающимся зеркалом A к неподвижному сферическому зеркалу B , центр которого совпадал с зеркалом A . На пути света ставили трубу с водой. За время t , в течение которого свет проходил в воде двойное расстояние $AB = 4$ м, зеркало A поворачивалось на угол α и отраженный свет давал блеск в точке S' : $\angle SAS' = 72,8''$. Скорость вращения зеркала $n = 800$ об/с. Рассчитайте по этим данным скорость света c в воде.

Решение. Скорость света $c = \frac{2AB}{t}$; но $t = \frac{\alpha}{\omega} = \frac{\alpha}{2\pi n}$;

$$\alpha = \frac{\angle SAS'}{2}; \quad \alpha = \frac{72,8''}{2 \cdot 3600 \cdot 57,3};$$

$$\begin{aligned} c &= \frac{2 \cdot AB \cdot 2\pi n}{\alpha} = \\ &= \frac{2 \cdot 4 \text{ м} \cdot 2 \cdot 3,14 \text{ рад} \cdot 800 \frac{1}{\text{с}} \cdot 2 \cdot 3600 \cdot 57,3}{72,8 \text{ рад}} \approx 2,27 \cdot 10^8 \text{ м/с.} \end{aligned}$$

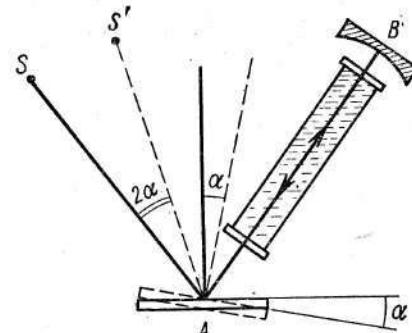


Рис. 119. К задаче по определению скорости света в воде.

Понятие о косвенном методе определения скорости света можно дать на примере следующей задачи.

Задача 34. Пользуясь законом преломления, вычислите скорость света в воде и сравните ее со значением, полученным экспериментально Фуко (№ 33).

Решение. $\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = n = \frac{c}{c_v}$, где c — скорость света в воздухе, а c_v — скорость света в воде. Для воды $n = 1,33$. Поэтому

$$c_v = \frac{c}{n} = \frac{3 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}}}{1,33} = 2,25 \cdot 10^8 \text{ м/с.}$$

Вычисленное значение скорости света удовлетворительно согласуется с тем, которое получил с помощью измерений Фуко. Эти измерения, таким образом, явились одним из аргументов в пользу волновой теории света.

Учителю нужно, однако, иметь в виду, что с помощью закона преломления света и опыта Фуко определяют, вообще говоря, различные величины, соответственно фазовую v и групповую u скорости света. Волновая теория Гюйгенса, дающая соотношение $\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{c}{c_v}$, исходит из представления о монохроматической волне,

уравнение которой $y = a \sin \omega \left(t - \frac{x}{c} \right)$ дает бесконечную синусоиду, c и c_v в данном случае — скорость, с которой перемещается фаза волны, т. е. фазовая скорость v .

Понятие скорости света становится более сложным, если рассматривать одновременное распространение нескольких волн различной длины в среде, где их скорости неодинаковы, т. е. существует дисперсия. В этом случае вводят понятие «групповой скорости», т. е. скорости, с которой распространяется максимум колебаний сложного колебательного процесса.

При незначительной дисперсии $u \approx v$. Так, например, дисперсией практически можно пренебречь для воздуха. Сравнительно невелика дисперсия света и в воде. Этим и объясняется примерное совпадение значения c_v , полученное в задачах 33 и 34.

Поскольку понятие групповой скорости волны в средней школе учащимся не дается, то, говоря о величине c , следует иметь в виду скорость монохроматической волны.

2. Дисперсия света

Явление дисперсии света было открыто И. Ньютона и считалось одной из важнейших его научных заслуг. Недаром на его надгробном памятнике, поставленном в 1731 г. и украшенном фигурами юношей, которые держат в руках эмблемы его главнейших открытий, одна фигура держит призму, а в надписи на памятнике есть слова: «Он исследовал различие световых лучей и появляю-

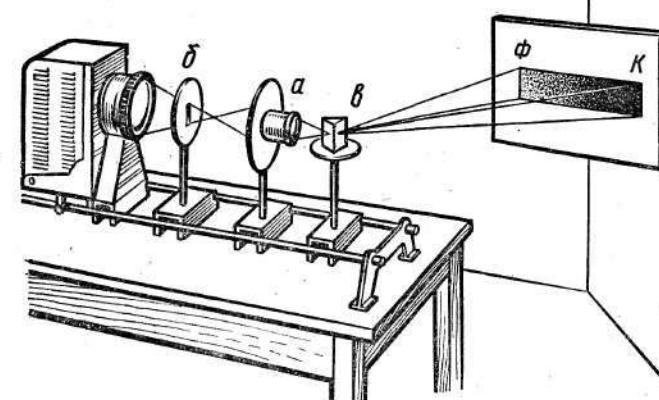


Рис. 120. Установка для демонстрации дисперсии света.

щиеся при этом различные свойства цветов, чего ранее никто не подозревал» [45, с. 123]. Последнее утверждение не совсем точно. Дисперсия была известна и ранее, но обстоятельно она не изучалась, и удовлетворительной теории дисперсии не было. Ньютон полагал, что скорость света в веществе, которое, по его представлениям, притягивает корпускулы света, больше, чем в пустоте. Согласно же волновой теории Гюйгенса скорость света в пустоте больше, чем в веществе, т. е., по Ньютону, $\frac{v_1}{v_2} < 1$, а по Гюйгенсу, $\frac{v_1}{v_2} > 1$.

Однако проверка данных соотношений была проведена только в 1862 г., когда справедливость волновой теории была уже доказана иными методами. Для демонстрации спектра в классе желательно использовать призму из крона и возможно более сильный источник света (рис. 120).

Вначале с помощью объектива a получают на боковой стене класса резкое изображение щели b . Затем перед объективом на подъемном столике ставят призму v и получают на экране спектр белого света.

Помимо видимых, следует также обнаружить инфракрасные и ультрафиолетовые лучи. Инфракрасные лучи обнаруживают с помощью термостолбика или сернистосеребряного фотоэлемента ФЭСС-У10, которые присоединяют к гальванометру. Можно также использовать фотосопротивления типа ФС-А0, ФС-А1 и др., включив их последовательно с демонстрационным гальванометром и анодной

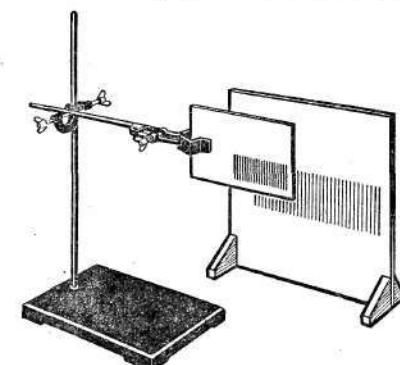


Рис. 121. Обнаружение ультрафиолетовых лучей.

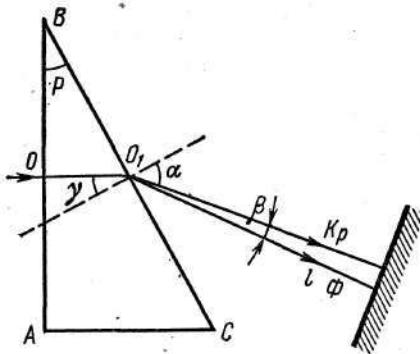


Рис. 122. К задаче о призме.

Задача 35. В воде на расстоянии 20 м один аквалангист подает сигнал другому с помощью белого света. На какое расстояние Δl и на какое время Δt на этом пути красные лучи опередят фиолетовые? Показатель преломления красных лучей $n_k = 1,329$; фиолетовых — $n_f = 1,344$.

Ответ. $\Delta t = 9,9 \cdot 10^{-6}$ с; $\Delta l = 0,22$ м [22, № 865]. Заметить такую разницу во времени прихода световых сигналов глаз человека не может. Поэтому он не обнаружит разложение (дисперсию) света.

Задача 36. Красный ($n_k = 1,640$) и фиолетовый ($n_f = 1,690$) лучи света падают в одну точку O перпендикулярно грани AB прямоугольной трехгранный стеклянной призмы из тяжелого крона (рис. 122). На какой угол β разойдутся лучи при выходе из призмы? Где нужно поместить экран, чтобы расстояние между лучами было равно 10 см? Преломляющий угол призмы $p = 10^\circ$.

Ответ. $\beta = 32'$, $l = 11$ м [22, № 866].

Решение задачи 36 можно использовать для того, чтобы дать учащимся понятие о хроматической аберрации. Линза, которую известным образом можно представить как совокупность призм, имеет столько фокусов, сколько различных цветов содержит падающий на нее свет.

3. Интерференция света

По аналогии с интерференцией механических волн (см. рис. 77) следует заключить, что обязательное условие интерференции света — когерентность световых волн, испускаемых атомами вещества.

Для световых волн, представляющих собой волны поперечные, помимо постоянства разности фаз, необходимо также постоянство направления плоскости колебаний.

Этим условиям отвечают волны одного цуга, испускаемые каким-либо атомом. Однако на практике обычно имеют дело с источниками света, которые состоят из огромного числа атомов, хаотически ис-

батареей. Ультрафиолетовые лучи обнаруживают с помощью рентгеновского экрана с платиносеродистым барием. При помещении этого экрана в область коротких лучей спектр становится длиннее (рис. 121). В качестве осветителя лучше всего использовать ртутно-кварцевую лампу ПРК-4. Следует также показать опыты и по сложению спектральных цветов [17, т. II, гл. VIII, 20, § 47].

Для закрепления материала полезно решить следующие задачи.

пускающих цуги воли с самыми различными разностями фаз и всевозможными направлениями плоскостей колебаний. Поэтому получить интерференционную картину, используя свет от двух независимых источников, например от двух звезд или различных точек светящегося тела, невозможно¹.

Но интерференцию света можно осуществить, воспользовавшись счастливой идеей Юнга и Френеля о разделении светового пучка на две части, которые затем снова сводятся вместе.

Таким образом, можно заставить практически интерферировать волны одного и того же цуга при условии, если разность их хода не превышает 30 см.

Существует несколько способов решения указанной задачи. С некоторыми из них в общем виде следует познакомить учащихся, обстоятельно рассмотрев какой-либо один метод.

1. Зеркала Френеля (рис. 123). Свет источника S попадает на зеркала MO и ON , расположенные под углом, близким к 180° . Цуги волн 1 и 2 , идущие в указанном направлении, встречаются в точке C и всегда имеют постоянную разность хода, равную $SAC = SBC$. Если разность хода равна нечетному числу полуволн, то «свет гасит свет». При разности хода, равной четному числу полуволн, происходит усиление колебаний. На экране это обнаруживается как чередование темных и светлых полос.

2. Зеркало Ллойда. Согласно этому методу прямой пучок света интерферирует с пучком, отраженным от зеркала, подобно тому, как это демонстрировалось применительно к радиоволнам (см. рис. 109).

3. Бипризма Френеля. Пучок света, испускаемого источником S (рис. 124), разделяется на два пучка, которые в области OAB налагаются друг на друга. В любой точке этой области, например в точке A , цуги волн имеют постоянную разность фаз.

4. Метод Юнга. Свет от точечного источника направляется на экран, имеющий два близко расположенных маленьких отверстия. Каждое из этих отверстий становится источником элементарных

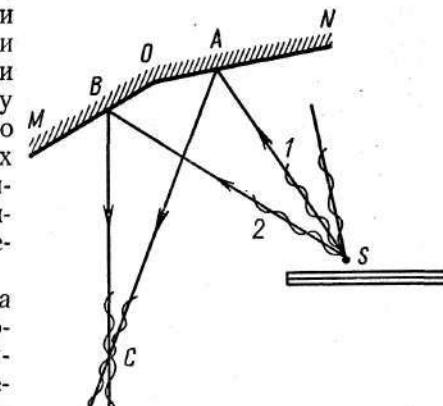


Рис. 123. Зеркала Френеля.

¹ В настоящее время можно получить когерентные излучения и от независимых источников света (лазеров). См.: Ф а б р и к а н т В. А. Новое о когерентности. — «Физика в школе», 1968, № 1 [6, § 124].

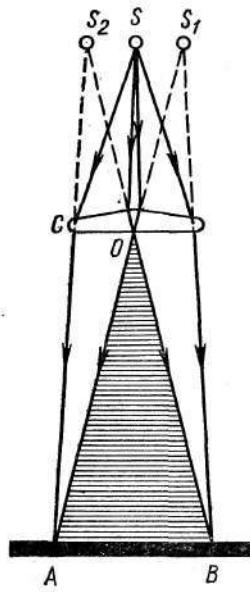


Рис. 124. Бипризма Френеля.

достаточной видимости для класса и поэтому при его постановке надо уделять особое внимание следующим моментам:

1. Использовать мощную лампу, желательно ртутно-кварцевую ДРШ-500, или электрическую дугу и возможно ярче осветить щель,

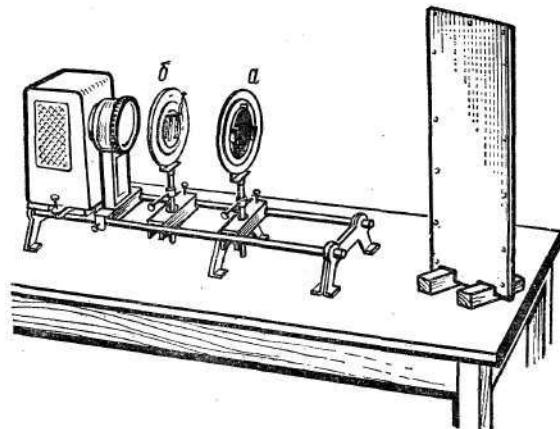


Рис. 125. Установка с бипризмой.

волны аналогично тому, как это бывает для волн на воде. Интерференция света от двух указанных когерентных источников должна дать картину, подобную той, которая показана на рисунке 77.

Метод Юнга обстоятельно рассматривается при изучении дифракции света [9, § 88].

Однако в общем виде о нем можно сказать и в данной теме, поскольку он наглядно показывает применение принципа Гюйгенса к световым волнам и дает простой способ получения когерентных источников.

Описанные выше первые три способа интерференции света также обычно сводятся к эквивалентной схеме интерференции света от двух когерентных источников. Но эти источники мнимые (например, «источники» S_1 и S_2 на рисунке 124). В соответствии с изложением учебного материала в «Физике-10» и имеющимся в школах оборудованием обстоятельно рассматривается и демонстрируется только опыт с бипризмой Френеля (рис. 125) [17, опыт 122]. При этом надо иметь в виду, что данный опыт, весьма выразительный по своему существу, не обеспечивает, однако,

достаточной видимости для класса и поэтому при его постановке надо уделять особое внимание следующим моментам:

1. Использовать мощную лампу, желательно ртутно-кварцевую ДРШ-500, или электрическую дугу и возможно ярче осветить щель,

сфокусировав на ней конус лучей от конденсора фонаря.

2. Ребро призмы a установить строго параллельно щели b , ширина которой должна примерно равняться толщине лезвия от безопасной бритвы ($0,1-0,05$ мм).

3. Использовать экран с ровной плоской поверхностью, например планшет, обтянутый чертежной бумагой.

4. Поставить экран под углом к пучку света и найти такое положение, когда эффект от «растяжения» интерференционной картины не будет еще теряться в результате уменьшения ее яркости.

В принципе четкость интерференционных полос и их число должны увеличиваться при использовании монохроматического света. Однако светофильтры столь значительно уменьшают яркость картины, что при постановке демонстрационного опыта нужно в основном использовать белый свет. Опыт может быть использован для вычисления длины волны [17, т. II, с. 310—311].

Частным случаем интерференции света является образование стоячих волн. К сожалению, обнаружение их со школьным оборудованием невозможно. Впервые стоячие световые волны с помощью фотоэмульсии обнаружил в 1890 г. О. Винер. Идею его опыта поясняет рисунок 126 [7, § 23]. Монохроматический свет отражается от зеркала a и дает систему стоячих волн, которая фиксируется с помощью очень тонкого слоя фотоэмульсии, нанесенного на прозрачную стеклянную пластинку b , наклоненную под острым углом ϕ к зеркалу.

На фотоэмульсии образуются чередующиеся светлые и темные полосы 1, 2, 3 и т. д. Первая полоса отстоит от зеркала на расстоянии $\frac{1}{4}\lambda$, вторая — на расстоянии $\frac{3}{4}\lambda$ и т. д.

Опыты показали, что максимум действия света на фотоэмульсию лежит в области максимума вектора \vec{E} . Объясняется это следующим образом. Как известно, электрическое поле \vec{E} обнаруживается по действию на электрические заряды, как движущиеся, так и покоящиеся, а магнитное поле обнаруживается по его действию только на движущиеся заряды. Поскольку скорость движения любых зарядов, в том числе и электронов в телах, $v \ll c$, то действие световой волны на фотоэмульсию обусловливается практически только вектором \vec{E} , который поэтому нередко называют «световым». При отражении от стекла (оптически более плотной среды) фаза колебаний вектора \vec{E} меняется на π аналогично тому, как меняется фаза колебаний звуковой волны при отражении от стенки. При отражении от среды, оптически менее плотной, меняется на π фаза вектора \vec{B} .

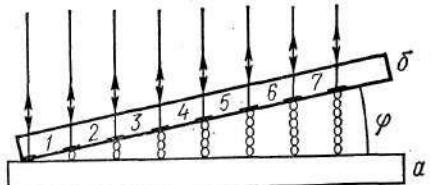


Рис. 126. Схема опыта Винера.

(В соответствии с формулой Умова — Пойнтига $\vec{P} = \frac{1}{\mu\mu_0} [\vec{E} \times \vec{B}]$ для изменения направления распространения волны на обратное при отражении от границы двух сред необходимо изменение направления одного из векторов \vec{B} или \vec{E} на противоположное.)

4. Цвета тонких пленок

С цветными пленками приходится встречаться очень часто. Это радужные пленки нефти и масла на поверхности воды, отливающие всеми цветами мыльные пузыри, пленки окислов на старых стеклах и побывавших в огне кусках металла, дающих цвета побежалости, пленки на хитиновых покровах насекомых: стрекоз, жуков и т. д.

Как нетрудно заметить, все эти пленки при дневном свете «переливаются» различными цветами в зависимости от того, под каким углом на них смотрят. Их цвет объясняется не краской или пигментом, а явлением интерференции. При этом интерфирирует свет не от точечных источников, как это имеет место в опытах Юнга и Френеля, а обычный рассеянный свет, испускаемый протяженными источниками, например небом.

Рассмотрим для определенности сначала один луч a_1 монохроматического пучка света, падающего под углом α на поверхность пленки толщины h (рис. 127). В точках A, B, C, D, E луч будет частично отражаться от границы раздела двух сред и частично проходить во вторую среду. Однако отражаться при данных условиях от границы раздела сред будет только незначительная доля света. Так, например, при $\alpha = 30^\circ$ от поверхности стекла отражается всего лишь $4,9\%$ энергии света. Следовательно, от второй границы в точке B отразится примерно $0,95 \cdot 0,05 = 0,045$ доли энергии, а в точке C выйдет обратно в воздух $0,95 \times 0,045 \cdot 100\% \approx 4\%$ энергии. Из сказанного также следует, что при дальнейших рассуждениях можно принимать во внимание только лучи a_2, a'_1 и a'_2 . Для дальнейших рассуждений можно далее рассмотреть интерференцию волн по направлению лучей a'_1 и a'_2 . Однако это всегда вызывает дополнительные вопросы учащихся, поскольку данные лучи на чертеже находятся на некотором расстоянии один от другого.

Поэтому лучше рассмотреть лучи a'_2 и a'_1 . Теперь остается определить разность хода Δ лучей a'_1 и a'_2 в длинах волн. Геометрически $\Delta = 2AB - A'B$. Но длина волны в пленке в n раз меньше, чем в воздухе, где n — показатель преломления пленки относительно воздуха. Нетрудно показать, что $\Delta = 2hn \cos \beta$ [7].

Наконец, учтем, что при отражении от стекла фаза вектора \vec{E} изменяется на π . Поэтому окончательно оптическая разность хода лучей $\Delta = 2hn \cos \beta + \frac{\lambda}{2}$. При максимальном усилении света разность хода интерфирирующих лучей должна быть равна целому

числу волн, т. е. $\Delta = 2m \frac{\lambda}{2}$, где m — целое число. Для проходящего света условие максимума имеет вид: $\Delta = 2hn \cos \beta = 2m \frac{\lambda}{2}$.

В средней школе при решении задач можно ограничиться частным случаем падения луча монохроматического света перпендикулярно поверхности пленки ($\cos \beta = 1$). В этом случае условие максимума для проходящего света имеет вид: $2hn = m\lambda$. Это уравнение полезно преобразовать следующим образом:

$2h = m \frac{\lambda}{n}$, или $2h = m\lambda'$, где λ' — длина волны света в пленке. В таком виде данная формула и может быть сообщена учащимся. Используя это соотношение, можно в общих чертах пояснить, почему интерференция света заметна глазу только в тонких пленках, притом удовлетворяющих некоторым условиям.

Рассмотрим сначала пленку, толщина которой $h \ll \lambda$. Пусть, например, $h = 0,01\lambda$. При $\lambda = 5 \cdot 10^{-7}$ м $h = 5 \cdot 10^{-9}$ м, что составляет примерно 10 молекулярных слоев. Пренебрегая разностью хода $2hn$ для проходящих волн, можно предположить, что световые волны будут максимально усиливать друг друга и пленка окажется прозрачной. Но тогда на основе закона сохранения энергии следует предположить, что пленка практически не отражает свет, т. е. будет казаться в отраженном свете темной, притом не только под прямым углом, но и при рассматривании ее под весьма большим углом α .

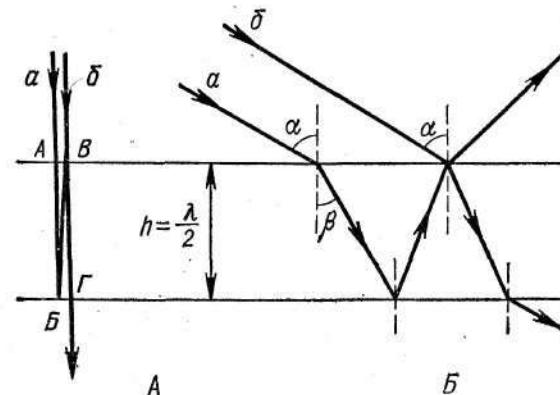


Рис. 128. Ход лучей в пленке при условии $h \approx \lambda$.

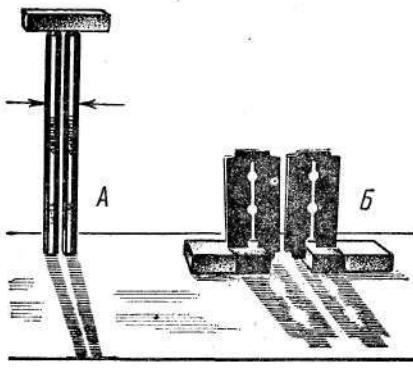


Рис. 129. Наблюдение дифракции от щели между двумя карандашами и бритвенными лезвиями.

от друга на значительном расстоянии и интерференционные полосы будут хорошо заметны.

Аналогичным построением нетрудно показать, что при большей толщине пленки, например $h = 10\lambda$, изменение угла α меньше и, следовательно, расстояния между светлыми полосами на пленке также будут меньшими. При некоторой толщине пленки полосы сольются для глаза, образуя поверхность, освещенную всюду одинаково.

Как видно из формулы $\Delta = 2h = m\lambda$, условия максимума для разных длин волн различны. Поэтому в белом свете максимумы для разных лучей наблюдаются в разных местах пленки и она оказывается окрашенной.

Условие максимума для одних волн при определенных углах совпадают с условиями минимума для других. Поэтому для интерференции в белом свете пленки должны быть особенно тонкими.

Так, допустимая толщина мыльной пленки $h \approx 8 \cdot 10^{-6}$ м или равна всего 16λ , где λ — средняя длина волны белого света, примерно равная $5 \cdot 10^{-7}$ м. Для монохроматического света пленка может быть в 100 и даже в 1000 раз толще.

Желательно также рассмотреть интерференцию света в воздушном клине [22, № 876]. Это поможет лучше понять причину образования колец Ньютона [17, опыт 124].

Интерференцию света в тонких пленках следует обязательно продемонстрировать учащимся, проецируя в отраженном свете интерференционную картину, которую дает мыльная пленка на вертикальной проволочной рамке [17, т. II, опыт 126].

Из практических применений интерференции света можно рассказать об интерферометрах, проверке качества обработки поверхностей и просветлении оптики.

Рассмотрим далее более толстую пленку, для которой $h = \frac{\lambda}{2}$, или $\Delta_1 = 2h = \lambda$. Луч a (рис. 128, А) проходит в пленке путь, равный $\frac{3}{2}\lambda$, а луч $b - \frac{1}{2}\lambda$; тогда следующий максимум будет наблюдаться при условии: $\Delta_2 = 2\lambda$. Следовательно, луч a пройдет путь 3λ , а луч $b - \lambda$ (рис. 128, Б). Но это значит, что максимум света должен наблюдаться под значительно измененным углом α . В результате освещенные участки пленки будут отстоять друг от друга на значительном расстоянии и интерференционные полосы будут хорошо заметны.

Аналогичным построением нетрудно показать, что при большей толщине пленки, например $h = 10\lambda$, изменение угла α меньше и, следовательно, расстояния между светлыми полосами на пленке также будут меньшими. При некоторой толщине пленки полосы сольются для глаза, образуя поверхность, освещенную всюду одинаково.

Как видно из формулы $\Delta = 2h = m\lambda$, условия максимума для разных длин волн различны. Поэтому в белом свете максимумы для разных лучей наблюдаются в разных местах пленки и она оказывается окрашенной.

Условие максимума для одних волн при определенных углах совпадают с условиями минимума для других. Поэтому для интерференции в белом свете пленки должны быть особенно тонкими.

Так, допустимая толщина мыльной пленки $h \approx 8 \cdot 10^{-6}$ м или равна всего 16λ , где λ — средняя длина волны белого света, примерно равная $5 \cdot 10^{-7}$ м. Для монохроматического света пленка может быть в 100 и даже в 1000 раз толще.

Желательно также рассмотреть интерференцию света в воздушном клине [22, № 876]. Это поможет лучше понять причину образования колец Ньютона [17, опыт 124].

Интерференцию света в тонких пленках следует обязательно продемонстрировать учащимся, проецируя в отраженном свете интерференционную картину, которую дает мыльная пленка на вертикальной проволочной рамке [17, т. II, опыт 126].

Из практических применений интерференции света можно рассказать об интерферометрах, проверке качества обработки поверхностей и просветлении оптики.

5. Дифракция света

Дифракция света впервые наблюдалась и была описана Гриальди (1618—1663) в его «Физико-математическом трактате о свете, цветах и радуге», который был опубликован посмертно в 1665 г. Гриальди и ввел термин «дифракция», который происходит от латинского слова *diffractus* — разломанный [41, с. 121—122]. Поскольку суть дела учащимся в известной мере ясна, представляется более целесообразным поставить сначала эксперимент, а затем перейти к углубленному рассмотрению его результатов.

В классе следует показать опыты по дифракции света от щели и нити [17, т. II, опыты 127 и 128]. В обоих случаях из-за недостаточной видимости явление приходится наблюдать отдельным группам учащихся¹. В опыте по дифракции света от нити особое внимание нужно обратить на светлую полосу в середине тени.

В дополнение к указанным демонстрационным опытам желательно провести также индивидуальные наблюдения дифракционных явлений как в классе, так и дома. В классе можно раздать учащимся штангенциркули или микрометры и дать задание, изменяя расстояние между измерительными поверхностями, наблюдать дифракционную картину. При зазоре между ножками штангенциркуля в 0,1—0,05 мм наблюдается яркий дифракционный спектр от прямого света электролампы. Опыт будет особенно выразительным, если использовать электролампу с прямой нитью накала, параллельной применяемой щели.

Дома учащимся следует рекомендовать решение следующих экспериментальных задач.

Задача 37 (э). Поставьте на пути яркого света, желательно на пути солнечных лучей, параллельно друг другу два ровных карандаша и, передвигая их, получайте на плоском экране пучки света разной ширины. Получите как можно более узкий пучок и проведите вдоль него линию. Какой вывод можно сделать о распространении пучков света на основе этого опыта?

а) Сдавливая пальцами сбоку карандаши (рис. 129, А), добейтесь того, чтобы пучок света стал менее ярким, но более широким. В чем причина такого изменения пучка света?

б) Проделайте опыт, аналогичный предыдущему, но с двумя бритвенными лезвиями (рис. 129, Б), поставив их так, чтобы щель имела форму острого клина. Почему пучок света от того места щели, которое расположено около острия клина, получается более широким и «размытым»?

В учебнике «Физика-10» явление дифракции пояснено на примере опыта Юнга с интерференцией света от двух отверстий. Это мало что добавляет к уже известным сведениям об интерференции света в опытах Френеля. Между тем наиболее интересные и новые для учащихся случаи дифракции от отверстия и экрана остаются без объяснения, которое необходимо.

¹ Прекрасную видимость для всего класса дают опыты по дифракции с применением луча лазера.

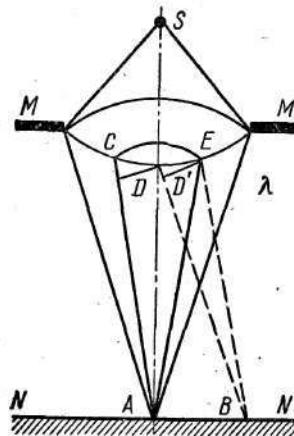


Рис. 130. Объяснение дифракции от малого отверстия методом зон Френеля.

Поэтому на методике объяснения данных дифракционных явлений остановимся в первую очередь. Дифракцию же от двух отверстий или щелей рассмотрим позднее в связи с изучением дифракционной решетки.

Для объяснения дифракции на круглом отверстии в той или иной мере следует использовать метод зон Френеля. Примеры такого объяснения имеются в ряде пособий по элементарной физике [6; 14; 15]. Более обстоятельное изложение метода Френеля можно найти в вузовских курсах физики [7, 12]. Наиболее доступно изложение вопроса в учебнике Г. С. Ландсберга [6], которому мы и будем далее в основном следовать.

Во-первых, обратимся к механической аналогии дифракции волн на отверстии в волновой ванне.

Опыт показывает, что в том случае, когда размеры отверстия меньше длины волны, оно ведет себя как точечный источник и дает круговую волну (см. рис. 82). Если же размеры отверстия больше, то форма волнового фронта посередине изменяется незначительно. И только по краям отверстия наблюдается загибание его внутрь тени.

В опытах по дифракции света обычно имеют дело с отверстиями или щелями шириной примерно в 0,1 мм. Размеры такого отверстия при $\lambda = 5 \cdot 10^{-4}$ мм в 200 раз больше λ . Поэтому его никак нельзя считать точечным, в указанном смысле слова, источником света.

Рассмотрим падение света от некоторого отверстия MM' (рис. 130), освещаемого точечным источником S , на плоский экран NN' . Для этого из точки A проведем конические поверхности до пересечения с поверхностью сферической волны. Образующие выберем так, чтобы они отличались по длине на полволны. На поверхности сферы в результате этого получатся кольцевые зоны примерно равной площади.

Допустим, что таких зон будет две или вообще четное число. В соответствии с принципом Гюйгенса — Френеля каждую точку любой зоны можно считать источником волны. Тогда любой точке центральной зоны можно сопоставить такую точку второй зоны, для которой разность хода составит $\frac{\lambda}{2}$. Таким образом, колебания от обеих зон в точке A взаимно погасят друг друга. Около точки A получится темное пятно.

Но, разумеется, в соответствии с законом сохранения энергии другие места экрана должны быть освещены. Аналогичными рас-

суждениями можно установить, что освещенной будет, например, место вокруг точки B , для которой разность хода волн $\Delta l = BD - BE$ от указанных зон составит величину, равную длине волны λ .

Если же на поверхности сферы уложится 3 (или вообще нечетное число) зоны, то в точке A будет светлое пятно.

Приближая или удаляя экран, можно получить в точке A то светлое, то темное пятно. Ввиду симметрии интерференционная картина представляет собой систему концентрических темных и светлых колец вокруг соответственно светлого или темного центрально-го круглого пятна. В белом свете кольца будут иметь радужную окраску.

В заключение следует уточнить понятие о том, что для наблюдения дифракции нужно использовать экраны малых размеров.

Дифракция света от экрана имеет место и при его значительных размерах. Однако для наблюдений четкой дифракционной картины ее придется получить на значительном расстоянии.

Интересной темой для внеклассных и факультативных занятий может стать рассмотрение роли дифракционных явлений в оптических приборах.

6. Дифракция от двух щелей. Дифракционная решетка

При рассмотрении дифракции света от двух щелей принимают их за точечные источники света и выполняют или повторяют построения, подобные тем, которые делали для механических волн (см. рис. 77). В результате получают условие максимума света: $d \sin \varphi = k\lambda$, где d — расстояние между источниками света.

Данные понятия желательно закрепить путем решения следующей экспериментальной задачи.

Задача 38 (э). Из плотной бумаги (хороша черная бумага, применяемая для упаковки фотоматериалов) сделайте два экрана. В одном прорежьте бритвой щель длиной 2—3 см и толщиной 0,5—1 мм, а в другом — две тонкие щели такой же длины на расстоянии 0,1—0,2 мм друг от друга. Осветите большую щель ярким солнечным или электрическим светом и посмотрите на нее через две другие щели. Как объяснить возникновение по бокам щели светлых и темных полос и их цветную окраску? Зарисуйте и объясните порядок чередования цвета в полосах.

Если задачу решают в классе, то экраны с двумя прорезями должны быть заготовлены заранее и разданы учащимся. Ярко освещенную (одну на весь класс) щель можно получить, закрыв черной бумагой с прорезью конденсор проекционного фонаря. Еще лучше воспользоваться лампой с прямой нитью накала.

Решение. Возникновение полос объясняют интерференцией света от двух когерентных источников (щелей). Цветная окраска объясняется тем, что белый свет содержит световые волны разной длины. Из формулы $\lambda = d \sin \varphi$ видно, что, чем больше длина волны λ , тем под большим углом наблюдается первый максимум.

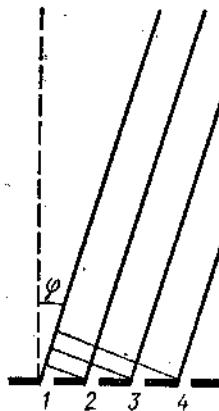


Рис. 131. Дифракционная решетка.

Решение. а) Возьмем экран не с двумя, а с четырьмя щелями (рис. 131). Если разность волн от 1 и 2 щелей равна, например λ , то между любыми двумя другими щелями она составит целое число волн n , и, следовательно, под углом φ — на расстоянии $l \gg d$ будут наблюдаться максимумы света, но поскольку 4 щели пропускают больше света, чем 2, то интерференционные полосы окажутся более яркими.

б) Из формулы $\lambda = d \sin \varphi$, или $\frac{\lambda}{d} = \sin \varphi$, видно, что для одной и той же длины волны λ с уменьшением расстояния между щелями d угол φ увеличивается, следовательно, дифракционная картина становится более четкой.

После решения этой задачи полезно раздать учащимся дифракционные решетки различного периода для наблюдения интерференционной картины. Вместо решеток или в дополнение к ним для тех же целей можно раздать перышки, кусочки капроновой ткани и т. п.

При демонстрации дифракционной решетки нередко пользуются установкой, в которой за решеткой находится собирающая линза,

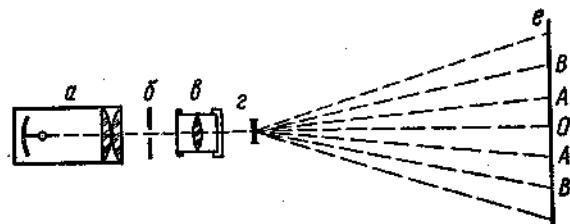


Рис. 132. Установка для определения длины световой волны с помощью дифракционной решетки.

линза, а в фокальной плоскости последней помещен экран. Применение линзы мотивирует тем, что она «фокусирует волны, идущие параллельно, в одной точке, в которой и происходит сложение волн и их взаимное усиление». С методической точки зрения такой прием вряд ли целесообразен. Линза играет второстепенную роль, только улучшая несколько качество спектра, который получается на экране и без нее.

Для определения с помощью дифракционной решетки длины волны света и ее частоты собирают установку, схема которой показана на рисунке 132.

Освещают возможно ярче щель b сходящимся пучком света от конденсора фонаря a и с помощью объектива c получают на экране ее изображение. Затем между экраном и объективом помещают дифракционную решетку g и наблюдают на экране e интерференционную картину.

В одном из опытов были получены следующие данные. Расстояние от решетки 200 см. Расстояние от середины центрального изображения щели до избранных точек первого максимума 13 см. Постоянная решетки $d = 0,001$ см. Из формулы $n\lambda = d \sin \varphi = d \frac{AO}{l}$ найдем:

$$\lambda = d \sin \varphi = \frac{0,01 \text{ см} \cdot 13 \text{ см}}{200 \text{ см}} = 6,5 \cdot 10^{-5} \text{ см};$$

частота света

$$v = \frac{c}{\lambda} = 4,6 \cdot 10^{14} \frac{1}{\text{с}}.$$

Опыт может быть поставлен и с отражательной дифракционной решеткой, в качестве которой можно использовать патефонную пластинку [22, № 875].

В заключение желательно провести фронтальную лабораторную работу по определению длины световой волны с помощью дифракционной решетки, используя прибор Главчутехпрома [11].

7. Поляризация света

Явление поляризации света при его прохождении через двухосные кристаллы исландского шпата наблюдал, но не смог объяснить еще Гюйгенс. Новые значительные результаты были получены в начале XIX в. и связаны прежде всего с исследованиями французских ученых Малюса (1775—1812), Араго (1786—1853), Био (1775—1862) и английского физика Брюстера (1781—1868). Была открыта поляризация света через кристаллы, установлены законы, в том числе законы, носящие теперь имена Малюса и Брюстера. Френелем были установлены новые важные закономерности и выведены формулы, носящие теперь его имя.

Учащиеся уже имеют представление о том, что естественный свет, с которым мы имеем дело в опытах, представляет собой элект-

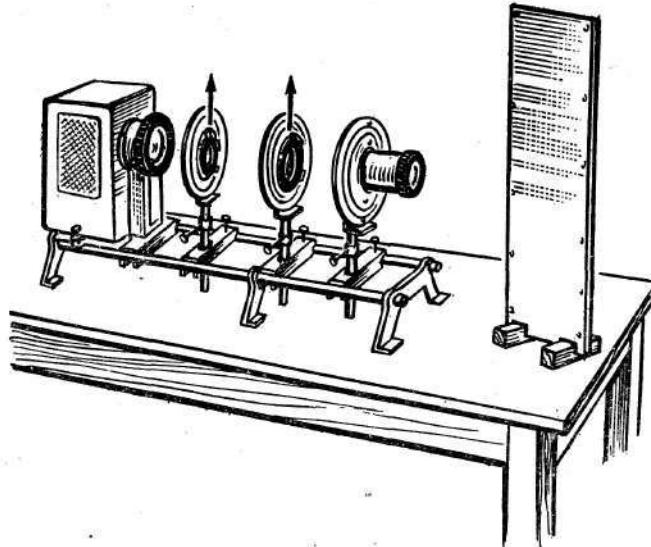


Рис. 133. Опыт с поляроидами.

ромагнитные излучения или совокупность цугов волн, испускаемых миллиардами атомов светящегося тела. Поэтому в световом пучке существуют всевозможные направления векторов \vec{B} и \vec{E} , дающих графически картину, напоминающую щетинки ершика для чистки бутылок.

В связи с данными представлениями о пучке естественного света ставится вопрос о возможных способах обнаружения поперечности его колебаний.

Ответ подсказывает аналогия с опытом по обнаружению поперечности волн радиодиапазона (рис. 110—111). При этом следует обратить внимание на то, что ширина щелей меньше длины волны.

В этой связи полезно еще раз продемонстрировать опыты с генератором СВЧ, используя самодельные решетки, представляющие собой рамки, на которые намотана проволока, притом таким образом, что ширина щелей оказывается примерно в 10 раз меньше длины волны ($\approx 0,1$ см).

Очевидно, малость длины волны света требует применения чрезвычайно узких щелей. По аналогии можно заключить, что для обнаружения поперечности световых волн нужны «решетки» со щелями порядка 10^{-8} м.

Такие решетки создала сама природа в виде кристаллических тел. Решетка в кристаллах создается правильным чередованием плоскостей, в которых расположены атомы и молекулы. Поскольку размеры атомов имеют порядок 10^{-10} м, а длина волн видимого света 10^{-7} м, то ширина «щелей» в кристаллах оказывается в сотни

и тысячи раз меньше длины световой волны, что качественно согласуется с результатами описанного выше опыта.

После этого описывают и показывают опыт с турмалиновыми щипцами. При отсутствии щипцов и в дополнение к ним используют поляроиды из набора, который выпускает Главучтехпром. Установка с двумя поляроидами показана на рисунке 133 [17, т. II, опыт 134]. К поляроидам прикрепляют стрелки-указатели, показывающие направление плоскостей поляризации света. Для защиты поляроида от перегрева свыше 60°C между конденсором и первым поляроидом устанавливают теплопоглощающий фильтр (кувету с водой). Сначала на экране наблюдают освещенное пятно, а затем постепенное уменьшение его освещенности вплоть до минимальной при скрещенных поляроидах. Таким образом, демонстрация поляризации света и ее объяснение по аналогии с соответствующими механическими процессами и поляризацией волн радиодиапазона не представляет особой трудности и хорошо усваивается учащимися на данном уровне. Надо, однако, иметь в виду, что это только самые общие «феноменологические» представления. Действительная картина, рассматривая явление с точки зрения микропроцессов, значительно сложнее. Влияние кристаллической решетки на свет нельзя в буквальном смысле понимать как образование щелей, сквозь которые проходят падающие на кристалл световые волны. В оптических явлениях обычно имеют в виду колебания «светового» вектора \vec{E} . Но в модельных представлениях надо механическим поперечным колебаниям сопоставлять колебания вектора \vec{B} , а не \vec{E} .

Поляризация света в веществе объясняется его взаимодействием с электрическими зарядами атомов и молекул. Длина световой волны значительно больше размеров атомов и молекул. Поэтому один цуг волн взаимодействует со значительным числом соседних атомов и из-за своей большой частоты приводит в вынужденные колебания прежде всего зарженные частицы незначительной массы, т. е. электроны. Можно считать, что электрон удерживается в атоме некоторой квазиупругой силой и потому соседние атомы можно рассматривать как совокупность гармонических осцилляторов, являющихся источниками когерентных излучений. Интерференцией данных вторичных излучений объясняется все многообразие дальнейших световых явлений: преломление и отражение света, его поляризация и т. д.

Для явлений поляризации важно, что в анизотропных средах вынужденные колебания электронов в различных направлениях неодинаковы. Неодинаковыми по этим направлениям оказываются и оптические свойства среды, которые обусловливают, например, разную скорость распространения волн, различное направление векторов \vec{B} и \vec{E} .

Поляризация света не редкое явление природы, а скорее правило. Свет поляризуется при отражении и преломлении, при рассеянии в мутных средах и т. д. Поляризацию света можно обнаружить,

рассматривая свет, испускаемый раскаленными телами, рассеянный свет неба и т. д. Практическое применение поляризации света поясняют на примере устройства сахариметра, в котором используется явление вращения плоскости поляризации, и на примере исследования деформаций с помощью прозрачных моделей технических деталей [17, опыты 138 и 139].

8. Давление света

Под действием электрического поля световой волны (рис. 134) в веществе возникает движение электронов в направлении, противоположном направлению вектора \vec{E} .

По правилу левой руки или с помощью формулы для силы Лоренца $F = q [v \vec{B}]$ легко определить, что на положительные заряды со стороны магнитного поля \vec{B} волны будет действовать сила, направленная внутрь вещества. Эта сила и создает световое давление p .

Для параллельного пучка лучей согласно теории Максвелла световое давление должно быть равно плотности световой энергии $p = \frac{W}{c}$, где W — световая энергия, падающая нормально на единицу поверхности за 1 с. Эту энергию, например, для солнечного света можно измерить экспериментально по ее поглощению телами, которое приводит к их нагреванию. Для солнечного излучения на Земле $W = 1,4 \cdot 10^6$ эрг/(см² · с). Следовательно, световое давление на абсолютно черное тело равно: $p = \frac{1,4 \cdot 10^6 \text{ дин}}{3 \cdot 10^{10} \text{ см}^2} = 4,7 \cdot 10^{-5} \text{ дин см}^{-2}$. Из-за поглощения света атмосферой это давление еще меньше. Максвелл вычислил, что в яркий день давление солнечных лучей на 1 м² равно весу тела массой 0,4 мг¹.

Обнаружить столь тонкий эффект на опыте многим ученым казалось невозможным из-за различных мешающих побочных эффектов, могущих превышать само световое давление в тысячи раз.

Честь опровергнуть это мнение выпала на долю знаменитого

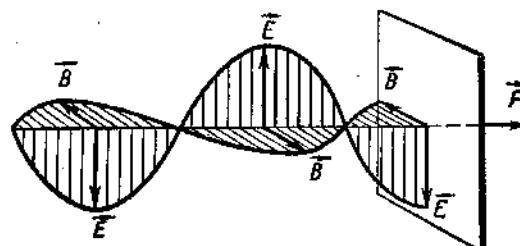


Рис. 134. Объяснение давления света.

¹ О расчете светового давления на основе квантовой теории см. В. М. Коновалов. Приближенный расчет светового давления.—«Физика в школе», 1976, № 2.

русского физика Петра Николаевича Лебедева (1866—1912). Схема установки и объяснение существа классического опыта П. Н. Лебедева по доказательству давления света на твердые тела общеизвестны [7; 36]. Предсказанное Максвеллом значение светового давления, которое, как он сам полагал, вряд ли можно проверить экспериментально, было подтверждено опытами П. Н. Лебедева, а затем и других ученых.

П. Н. Лебедевым были проделаны еще более тонкие опыты по обнаружению давления света не только на твердые тела, но и на газы. Эти опыты до сих пор не повторил никто! Недаром известный немецкий физик В. Вин писал профессору В. А. Михельсону, что Лебедев владел искусством экспериментирования в такой мере, в какой едва кто владеет в наше время.

Авторитет П. Н. Лебедева был столь высок, что он был избран почетным членом Лондонского королевского общества. Однако и П. Н. Лебедев разделил судьбу многих прогрессивных ученых своего времени.

Протестуя против произвола царского министра Кассо, в 1911 г. П. Н. Лебедев вместе с рядом других прогрессивно настроенных ученых покинул Московский университет, оставшись без средств и лаборатории. В это время директор физико-химической лаборатории Нобелевского института профессор Арениус предложил П. Н. Лебедеву переехать в Швецию, обещая необходимые средства и свободное положение, соответствующее его высокому рангу в науке.

П. Н. Лебедев отказался, считая, что он нужен прежде всего своей родине и своим ученикам. Однако больное сердце П. Н. Лебедева не перенесло невзгод, и через год великого ученого не стало.

Жизни и деятельности П. Н. Лебедева весьма желательно посвятить специальный вечер физики, на котором можно поставить ряд интересных докладов о работе как самого П. Н. Лебедева, так и его соратников и учеников — видных советских ученых П. П. Лазарева, В. К. Аркадьева, А. К. Тимирязева, А. Б. Младзиевского и др., внесших значительный вклад в развитие отечественной и мировой науки [34, 43, 44].

9. Из истории волновой и корпускулярной теорий света

В целях обобщения и закрепления материала изучение темы «Световые волны» желательно завершить обобщающей лекцией, материал для которой приведен ниже.

Нередко учащимся представляется совершенно непонятным, почему такой гений, как Ньютона, обстоятельно исследовавший явления, наглядно показывающие существование закономерной периодичности в действиях света (цвета тонких пленок, колец, названные именем ученого), был сторонником корпускулярной теории и отвергал «верную» волновую теорию Гюйгенса. Дело в том, что

во времена Гюйгенса — Ньютона и та и другая теории делали только первые шаги, были далеки от завершения и имели свои трудности. Гюйгенс исходил из аналогии между звуком и светом, который он считал импульсом в особой среде — упругом эфире. Упругий световой апериодический импульс, по Гюйгенсу, распространяется в виде сферической поверхности, подобно волнам от упавшего в воду камня. Однако Гюйгенс не только не предполагал периодичности в световых явлениях, но даже прямо указывал: «...не нужно представлять себе, что сами эти волны следуют друг за другом на одинаковых расстояниях». В соответствии с этим «он нигде не пользуется понятием длины волны...» [7, с. 17]. Кроме того, Гюйгенс считал световые волны, точнее световые импульсы, продольными.

«Так, создалось парадоксальное положение: волновая оптика Гюйгенса оказалась несостоятельной в истолковании основных фактов волновой же оптики: дифракции, интерференции, поляризации» [37, т. I, с. 221]. Заметим, что Гюйгенс вообще оставил без внимания открытые к этому времени явления, которые следовало интерпретировать как интерференцию и дифракцию света. Как замечает П. С. Кудрявцев, в глазах Ньютона «оптика Гюйгенса могла только дискредитировать волновую теорию света» [37, т. I, с. 221], существование которой и вытекающие из нее следствия хорошо понимал Ньютон.

К числу трудностей этой теории он относил следующие: отсутствие заметного сопротивления движению небесных тел, а следовательно, и «ощутимой» материи, способной передавать световые волны; трудность объяснения поляризации; отсутствие загибания света внутрь тени (это явление по непонятным причинам не было обнаружено Ньютоном).

Как следствие, возникло затруднение с объяснением прямолинейного распространения света. В самом деле, согласно принципу Гюйгенса каждая точка, до которой доходит световое возбуждение, является в свою очередь центром вторичных сферических волн.

Однако, как подсказывал повседневный опыт, свет, падающий на отверстие в экране, распространяется далее прямолинейно в виде луча, притом, как казалось в то время, при сколь угодно малых отверстиях. Это скорее наводило на мысль о полете по инерции каких-то частиц, чем о волнах.

В то время казалось, что ряд оптических явлений более наглядно объяснялся именно корпускулярной теорией (преломление света «из-за притяжения корпускул веществом», отражение света по закону отражения при ударе упругих шаров).

Ньютон не отрицал некоторой периодичности световых явлений и уделял им в известном смысле даже больше внимания, чем Гюйгенс. Он исследовал и нашел математическую зависимость для чередования колец (Ньютона), изучал периодичность отражения и преломления света. Для объяснения явления частичного отражения и прохождения света через границу двух сред он ввел понятия «приступа легкого отражения» и «приступа легкого прохождения».

Он ввел даже понятие периодов приступов как промежутков времени между двумя последовательными приступами. Таким образом, корпускулы Ньютона наделены некоторыми волновыми свойствами, существование которых было еще неясно, но тем не менее угадывалось интуицией ученого.

Были веские возражения и у противников Ньютона. Основным возражением Гюйгенса была, по его мнению, несовместимость корпускулярной теории с принципом суперпозиции световых пучков. Два световых пучка при своем пересечении не влияют, как казалось, друг на друга, что не согласовывалось с представлением о сталкивающихся потоках частиц.

Одними из немногих ученых, которые в то время отстаивали волновую теорию Гюйгенса, были Ломоносов и Эйлер. Они также выдвинули против теории Ньютона возражение, основанное на принципе суперпозиции световых пучков. Кроме того, Эйлер считал невозможным согласовать постоянство свечения и массы Солнца с испусканием им материальных частиц. Этот довод в настоящее время является несостоятельным. Согласно соотношению $E = mc^2$ излучение Солнца действительно связано с потерей массы и энергии. Ломоносов указывал также на трудность согласования корпускулярной теории с фактом прохождения света через некоторые прозрачные среды, например через алмаз, обладающий одновременно и необычайной твердостью и прозрачностью.

Ломоносов и Эйлер пошли дальше Гюйгенса в развитии волновой теории света. Ломоносов считал свет распространением колебательного движения частиц эфира. Эйлер уподоблял свет в эфире звуку в воздухе и считал, что различие цветов зависит от скорости колебаний «так, что цвета различаются друг от друга так же, как высокие и низкие звуки...» [37, т. I, с. 354]. Этим он объяснял, в частности, различие в преломлении световых пучков разного цвета. Приходится только удивляться гениальности предвидения этих ученых.

Что же касается принципа суперпозиции, то и в настоящее время он представляет значительный интерес. В 1928 г. С. И. Вавилов сделал попытку установить границы применимости принципа суперпозиции, полагая, что при сильном увеличении плотности световых пучков будет наблюдаться рассеяние света из-за столкновения световых квантов. Однако рассеяние обнаружено не было. Как показали последующие расчеты, обнаружить данные явления в обычных лабораторных условиях из-за ничтожно малой вероятности взаимодействия фотонов невозможно [43, с. 181]. Приводились и другие возражения против корпускулярной теории.

Указанные выше слабости теории Гюйгенса и авторитет Ньютона надолго отодвинули волновую теорию света на второй план. Переворот в этой области физики произошел в первой половине XIX в. благодаря работам Юнга и Френеля. Ньютонаевская теория «приступов» представлялась Томасу Юнгу (1773—1829) неубедительной. Особое возражение у Юнга вызывало то обстоятельство, что

скорость гипотетических световых частиц не зависела от того, каким светящимся телом они испускаются, например едва тлеющим угольком или Солнцем. Объяснить этот факт «эмиссионная» теория не могла.

По аналогии с явлением интерференции водяных и, возможно, звуковых волн Юнг вводит принцип интерференции, который является его самым важным вкладом в волновую теорию света.

Используя принцип интерференции, Юнг объяснил с точки зрения волновой теории цвета тонких пленок, поставил ряд опытов по интерференции света, опыты по дифракции света от щели, от волоса и др. Юнг первым произвел измерение длины световой волны, получив значение 0,7 мкм для красного и 0,42 мкм для фиолетового света. Это были бесспорные успехи теории Юнга. Однако она не была лишена и серьезных недостатков: она не могла, например, объяснить причину потери полуволны при отражении света от поверхности среды с большей оптической плотностью, прямолинейное распространение в изотропной среде светового пучка и др.

Вначале в своих исследованиях Огюст Френель (1788—1827) шел таким же путем, как и Юнг. Но затем он внес в эксперимент и волновую теорию ряд новых важных добавлений. Он соединил воедино три принципа: принцип элементарных волн, принцип огибающей и принцип интерференции.

В 1818 г. Френель представил свою работу на конкурс Парижской Академии наук. Член комиссии Пуассон, проверяя расчеты Френеля, обнаружил, на его взгляд, абсурдный результат: при дифракции света от круглого экрана в центре тени должно наблюдаваться светлое пятно, а в центре конической проекции малого отверстия на определенном расстоянии от него — темное пятно. Араго незамедлительно проверил это ускользнувшее от внимания Френеля следствие и подтвердил его справедливость. Это произвело большое впечатление на ученых.

Особое значение в истории утверждения волновой теории света имело также изучение явлений поляризации. Поставленные в этой области эксперименты с неизбежностью привели Юнга, а затем и Френеля к признанию поперечности световых колебаний. (Ранее предположения о поперечности световых колебаний уже делали ряд ученых: Гриимальди, Гук, Ломоносов.)

Основанное на опытных данных признание поперечности световых колебаний сразу же позволило снять многие трудности в объяснении целого ряда явлений, связанных с поляризацией света, одновременно должны были измениться и представления о гипотетической светоносной среде — эфире. Эфир ранее уподобляли жидкости или газу, в котором продольные световые волны распространяются аналогично продольным звуковым волнам в воздухе. Но поперечные волны, какими оказался свет, могут распространяться только в твердых телах. Таким образом, возникла новая проблема — по-

строение теории гипотетического «твёрдого» эфира, обладающего следующими свойствами:

1. Эфир не оказывает сопротивления движению небесных тел, но вместе с тем согласно формуле $c = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$, где E — модуль упругости, а ρ — плотность эфира, обладает упругостью, превышающей упругость стали.

2. В твердых телах могут распространяться как поперечные, так и продольные волны. А в «твёрдом» эфире возможны только поперечные колебания.

Многочисленные попытки крупнейших физиков окончательно разрешить эти и некоторые другие трудности в рамках теории упругого эфира успеха не имели.

Решение было дано на иной основе — теорией электромагнитных колебаний Максвелла. Наличие связи между электрическими, магнитными и световыми явлениями угадывалось некоторыми физиками до Максвелла. Так, М. В. Ломоносов предполагал исследовать влияние электризованной среды (стекла и воды) на преломление световых лучей (через 120 лет данный эффект был открыт Керром). Фарадей открыл влияние магнитного поля на свет (вращение плоскости поляризации в магнитном поле) и пытался осуществить опыт по обнаружению действия магнитного поля на спектр. (В 1896 г. эффект был открыт Зееманом и носит теперь его имя.) Фарадей предполагал, что, возможно, колебания света являются вибрацией силовых линий электромагнитного поля.

На мысль о глубинных связях электромагнитных и световых явлений ученых наводило и то обстоятельство, что во многих уравнениях удивительным образом появляется константа, совпадающая по числовому значению со скоростью света.

Так, например, отношение абсолютной электростатической единицы количества электричества к абсолютной электромагнитной единице $\frac{q_e}{q_m} = c$ [12, т. II].

Отношение магнитной силы взаимодействия движущихся со скоростью v электрических зарядов к силе кулоновской: $\frac{F_m}{F_e} = \frac{v^2}{c^2}$

[15, т. II]. Таким образом, целый ряд фактов наводил на мысль о связи электромагнитных и световых явлений. Но в явном виде вывод о том, что свет представляет собой электромагнитные волны, впервые был сделан только Максвеллом. Решение уравнений Максвелла при определенных условиях может быть представлено в виде волнового уравнения $E = E_0 \cos \omega \left(t - \frac{x}{v} \right)$, или $B = B_0 \cos \omega \left(t - \frac{x}{v} \right)$, где v — фазовая скорость гипотетической для

Максвелла электромагнитной волны. Из уравнений следует, что

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}}.$$

В вакууме $\epsilon = 1$; $\mu = 1$ и

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} = c$$

$$\left(\frac{1}{\sqrt{8.85 \cdot 10^{-12} \frac{\text{A}^2 \cdot \text{с}^2}{\text{Н} \cdot \text{м}^2} \cdot 1.256 \cdot 10^{-3} \frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{A}^2 \cdot \text{с}^2}}} = 3 \cdot 10^{10} \text{ м/с.} \right)$$

Следовательно, электромагнитные волны распространяются со скоростью света. На этом основании Максвелл сделал смелое предположение, что свет — это также электромагнитные волны.

Как у всякой теории, у теории Максвелла были и свои трудности: $v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} = \frac{c}{\sqrt{\epsilon \mu}}$. Но $v = \frac{c}{n}$, поэтому показатель преломления среды $n = \sqrt{\epsilon \mu}$. Это соотношение оказывается справедливым для некоторых жидкостей и газов. Однако в общем случае оно не подтверждается на опыте. Для диэлектриков $\mu \approx 1$ и $n \approx \sqrt{\epsilon}$. Но для воды, например, $\epsilon = 81$, а $n = 1,3$; для стекла (флинт) $\epsilon = 7,0—10,0$, а $n = 1,8$. Данная формула не указывает также на зависимость показателя преломления от длины волны. Преодолеть эти затруднения феноменологическая теория Максвелла, оперирующая макроскопическими величинами ϵ и μ , не могла. Они были преодолены позже электронной теорией Лоренца, согласно которой величина ϵ зависит от длины волны λ .

Решающее значение для утверждения электромагнитной теории света имело открытие Герцем электромагнитных волн, которые, как показали опыты, обладают теми же основными свойствами, что и свет. Подтвердились на опыте и другие предсказания Максвелла, в том числе о существовании светового давления. Это был триумф электромагнитной теории света.

Таковы удивительные страницы истории учения о свете. В соответствии с диалектикой познания каждая новая ступень познания не зачеркивала полностью предыдущую, а рисовала картину в ином плане, обогащая ее новыми фактами, деталями и красками. Но и страница об электромагнитной теории света не оказалась последней.

Подобно тому как волновая механическая теория света Гюйгенса — Юнга — Френеля нашла свое продолжение в новом качестве в электромагнитных волнах Максвелла — Герца на иной, фотонной основе возродилась и корпускулярная теория света.

Но это уже тема для последующих разделов курса физики X класса.

ЛИТЕРАТУРА

I. Философия

1. Энгельс Ф. Диалектика природы.— Маркс К., Энгельс Ф. Соч., т. 20.
2. Ленин В. И. Материализм и эмпириокритицизм. М., Политиздат, 1969.
3. Материалы XXV съезда КПСС. М., Политиздат, 1976.
4. Готт В. С. Философские проблемы современной физики. М., «Высшая школа», 1967.

II. Физика. Учебники, учебные пособия

5. Горелик Г. С. Колебания и волны. М., Физматгиз, 1959.
6. Элементарный учебник физики. Под ред. Г. С. Ландсберга. Т. III. М., «Наука», 1972.
7. Ландсберг Г. С. Оптика. М.—Л., Гостехтеориздат, 1957.
8. Буховцев Б. Б. и др. Физика. Учебное пособие для 9 класса средней школы. М., «Просвещение», 1977.
9. Мякишев Г. Я. и др. Физика. Учебник для 10 класса средней школы. М., «Просвещение», 1977.
10. Перышкин А. В. Курс физики. Ч. II и III. М., «Просвещение», 1970, 1971.
11. Практикум по физике в средней школе. Под ред. А. А. Покровского. М., «Просвещение», 1973.
12. Савельев И. В. Курс общей физики. Т. I—III. М., «Наука», 1970, 1973.
13. Фейнман Р. и др. Фейнмановские лекции по физике. Т. 2—7. М., «Мир», 1965, 1966.
14. Физика. Ч. II. Оптика. Волны. Пер. с англ., под ред. А. С. Ахматова. М., «Наука», 1973.
15. Яворский Б. М., Пинский А. А. Основы физики. Т. 1—2. М., «Наука», 1969—1972.
16. Physik, Lehrbuch für die Klasse 10. Volk und Wissen. Volkseigener Verlag. Berlin, 1971.

III. Пособия для учителя физики

17. Демонстрационный эксперимент по физике в старших классах средней школы. Под ред. А. А. Покровского. Т. I—II. М., «Просвещение», 1971—1972.
18. Ванеев А. А. и др. Преподавание физики в 9 классе. М., «Просвещение», 1971.
19. Ванеев А. А. и др. Преподавание физики в 10 классе. М., «Просвещение», 1973.
20. Горячкин Е. Н., Орехов В. П. Методика и техника физического эксперимента в восьмилетней школе. М., «Просвещение», 1964.

21. Иванов А. И. Изучение переменного тока в курсе физики средней школы. М., Учпедгиз, 1962.
22. Каменецкий С. Е., Орехов В. П. Методика решения задач по физике в средней школе. Изд. 2-е. М., «Просвещение», 1974.
23. Коршак Е. В. Колебания и волны (на украинском языке). Киев, «Радянська школа», 1974.
24. Орехов В. П., Антипов Н. И. Вопросы биологии на занятиях по физике. «Ученые записки Рязанского пединститута». Т. 46. М., «Просвещение», 1968.
25. Малов Н. Н. Основы теории колебаний. М., «Просвещение», 1971.
26. Методика преподавания физики. Под ред. В. П. Орехова, А. В. Усовой. Изд. 3-е. М., «Просвещение», 1976.
27. Пинский А. А. Изучение переменного тока в курсе физики средней школы. М., Изд-во АПН РСФСР, 1962.
28. Резников Л. И. и др. Методика преподавания физики в средней школе. Т. III. М., Изд-во АПН РСФСР, 1962.
29. Резников Л. И. Физическая оптика в средней школе. М., «Просвещение», 1971.
30. Шахмайев Н. М. Демонстрационные опыты по разделу «Колебания и волны». М., «Просвещение», 1974.
31. Шахмайев Н. М., Каменецкий С. Е. Демонстрационные опыты по электричеству. М., «Просвещение», 1963, 1973.

IV. История физики

32. Бублейников Ф. Д. Галилео Галилей. М., «Просвещение», 1964.
33. Веселовский И. Н. Христиан Гюйгенс. М., Учпедгиз, 1959.
34. Дуков В. М. Лебедев П. Н. М., Учпедгиз, 1956.
35. Карцев В. П. Максвелл. М., «Молодая гвардия», 1974.
36. Кудрявцев П. С., Конфедератов И. Я. История физики и техники. М., «Просвещение», 1965.
37. Кудрявцев П. С. История физики. Т. I—III. М., Учпедгиз — «Просвещение», 1956—1971.
38. Кудрявцев П. С. Исаак Ньютон. М., Учпедгиз, 1963.
39. Кудрявцев П. С. Максвелл. М., «Просвещение», 1976.
40. Кузнецов Б. Г. Развитие научной картины мира в физике XVII—XVIII вв. М., Изд-во АН СССР, 1955.
41. Марио Льоцци. История физики. М., «Мир», 1970.
42. Николаев А. М. Ленин и радио. М., Госполитиздат, 1958.
43. Основатели советской физики. М., «Просвещение», 1970.
44. Развитие физики в России. Т. I, II. М., «Просвещение», 1970.
45. Спасский Б. И. История физики. Изд-во МГУ, 1963.
46. Шателен М. А. Русские электротехники. М.—Л., Госэнергоиздат, 1950.

V. Научно-популярные издания

47. Вайсберг Д. В., Писаренко Г. С. Механические колебания и их роль в технике. М., «Наука», 1965.
48. Гриффин Д. Эхо в жизни людей и животных. М., Физматгиз, 1961.
49. Литинецкий И. В. На пути к бионике. М., «Просвещение», 1972.
50. Школьникам о XXIV съезде КПСС. Под ред. П. Н. Ни-Ли. М., «Просвещение», 1972.
51. Школьникам о XXV съезде КПСС. Под ред. Е. М. Кожевникова. М., «Просвещение», 1976.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3
Введение	5

Глава I. Механические колебания

1. Периодические движения	7
2. Колебательные системы. Свободные, собственные, вынужденные колебания	10
3. Гармонические колебания пружинного и математического маятников	13
4. Решение уравнения гармонического колебательного движения	15
5. Фаза колебаний	19
6. Скорость при гармонических колебаниях	23
7. Ускорение при гармонических колебаниях	24
8. Период колебаний пружинного и математического маятников	27
9. Превращения энергии при гармонических колебаниях	30
10. Затухающие колебания	32
11. Вынужденные колебания	35
12. Резонанс	37
13. Автоколебания	41

Глава II. Электромагнитные колебания

1. Понятие об электромагнитном поле. Идеи Фарадея и Максвелла	43
2. Колебательный контур	48
3. Уравнение свободных электромагнитных колебаний	51
4. Вынужденные электромагнитные колебания. Переменный ток	53
5. Действия переменного тока. Действующие значения силы тока и напряжения	55
6. Активное сопротивление в цепи переменного тока	58
7. Цепь переменного тока с индуктивностью	59
8. Цепь переменного тока с емкостным сопротивлением	61
9. Полная цепь переменного тока. Метод векторных диаграмм	62
10. Резонанс напряжений	65
11. Мощность в цепи переменного тока	67
12. Трансформация тока. Передача электроэнергии	69
13. Ламповый генератор. Токи высокой частоты	74
14. Электрификация СССР	77

Глава III. Механические волны. Звук

1. Распространение импульса в упругой среде	80
2. Бегущие волны	82
3. Стоячие волны	84
4. Стоячие волны как свободные колебания тел	87

5. Волны в сплошной среде	88
6. Звуковые волны	90
7. Интенсивность (сила) звука. Звуковое давление	91
8. Скорость звука	94
9. Музыкальные звуки	96
10. Инира- и ультразвуки	99
11. Интерференция волн	102
12. Оптимальные условия излучения звука. Акустический резонанс	106
13. Принцип Гюйгенса. Отражение и преломление волн	110
14. Дифракция волн	113
15. Запись и воспроизведение звука	114

Глава IV. Электромагнитные волны

1. Взаимосвязь между переменными магнитными и электрическими полями. Токи смещения	119
2. Электромагнитное поле. Электромагнитная волна	123
3. Основные свойства электромагнитных волн	129
4. Изобретение радио А. С. Поповым	134
5. Принципы современной радиосвязи	138
6. Электромагнитные явления в природе	142
7. Развитие радио в СССР	147

Глава V. Световые волны

1. Скорость света и ее измерение	148
2. Дисперсия света	150
3. Интерференция света	152
4. Цвета тонких пленок	156
5. Дифракция света	159
6. Дифракция от двух щелей. Дифракционная решетка	161
7. Поляризация света	163
8. Давление света	166
9. Из истории волновой и корпускулярной теорий света	167
Литература	173

ИБ № 958

Виктор Петрович Орехов

КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ В КУРСЕ ФИЗИКИ СРЕДНЕЙ ШКОЛЫ

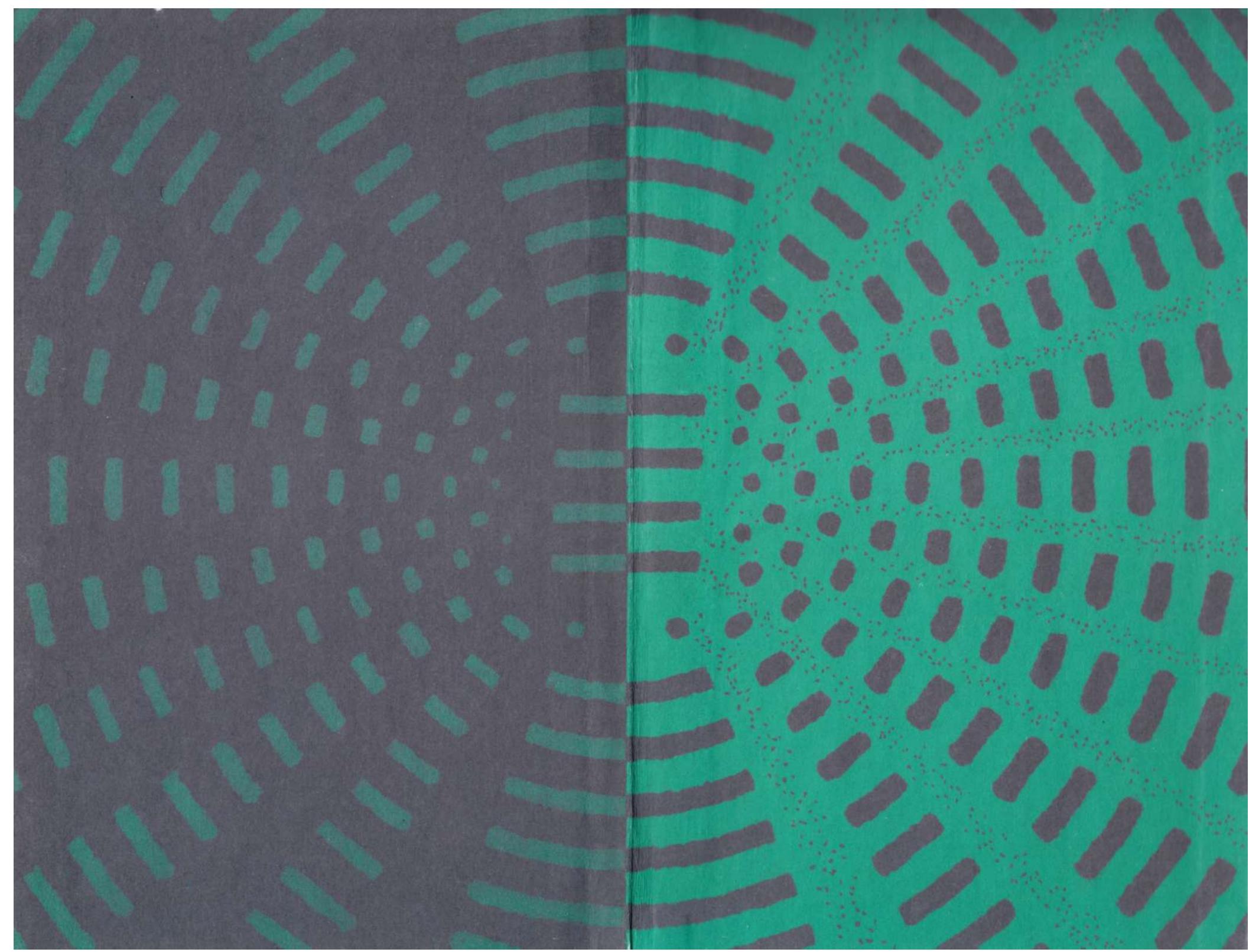
Редакторы А. Ф. Раева, А. И. Юдина. Переплёт художника С. Ф. Лухина. Художник по вклейке О. М. Шмелёва. Художественный редактор В. М. Прокофьев. Технический редактор Л. Я. Медведев. Корректор О. С. Захарова.

Сдано в набор 27/1 1977 г. Подписано к печати 2/IX 1977 г. 60×90^{1/16}. Бумага типогр. № 3. Печ. л. 11,0 + вкл. 0,25 + фор. 0,25. Уч.-изд. л. 11,19 + вкл. 0,28 + фор. 0,46. Тираж 100 тыс. экз.

Ордена Трудового Красного Знамени издательство «Просвещение» Государственного комитета Совета Министров РСФСР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли. Москва, 3-й проезд Мариной рощи, 41.

Головное предприятие республиканского производственного объединения «Полиграфика» Госкомиздата УССР, г. Киев, Довженко, 3.

Цена 55 коп. Заказ № 7—1068.





55 коп.

