

ДЕМОНСТРАЦИОННЫЕ ОПЫТЫ ПО ЭЛЕКТРИЧЕСТВУ



**Н. М. ШАХМАЕВ, С. Е. КАМЕНЕЦКИЙ**

# ДЕМОНСТРАЦИОННЫЕ ОПЫТЫ ПО ЭЛЕКТРИЧЕСТВУ

УЧПЕДГИЗ-1963



Н. М. ШАХМАЕВ, С. Е. КАМЕНЕЦКИЙ

# ДЕМОНСТРАЦИОННЫЕ ОПЫТЫ ПО ЭЛЕКТРИЧЕСТВУ

ПОСОБИЕ ДЛЯ УЧИТЕЛЯ

ГОСУДАРСТВЕННОЕ  
УЧЕБНО-ПЕДАГОГИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО  
МИНИСТЕРСТВА ПРОСВЕЩЕНИЯ РСФСР

Москва — 1963



## ПРЕДИСЛОВИЕ

Необходимость того или иного учебного эксперимента определяется принятой методикой изложения. Новый учебный эксперимент, как правило, появляется в результате развития новых методических идей и в этом отношении является производным от методики.

Однако экспериментальная база преподавания, наличие того или иного оборудования существенно влияют на детали изложения и этим в значительной мере в свою очередь определяют характер конкретной методики.

При постановке описанных в предлагаемой книге опытов авторы стремились к их предельной простоте. Однако авторов не пугала относительная сложность некоторых демонстраций, если только при этом достигалось более глубокое раскрытие изучаемых физических явлений.

На первый взгляд может показаться, что сказанное выше противоречит всеми признанному принципу простоты демонстрационного эксперимента. Однако это противоречие только кажущееся.

Из истории науки известны многочисленные примеры, когда опыты, первоначально поставленные в лабораториях ученых, становились достоянием средней школы.

Следует иметь в виду, что сложность и простота того или иного опыта или прибора — понятия условные. Так до недавнего времени демонстрации фазовых соотношений в цепях переменного тока, радиоуправляемых моделей, свойств токов высокой частоты и т. п. были очень сложными. Однако сейчас эти и подобные им демонстрации ставятся в подавляющем большинстве средних школ. Профессор Л. В. Мысовский писал по этому поводу: «Очень многие важные научные положения в первое время после своего открытия кажутся столь трудными и сложными для их понимания, что ими занимаются только специалисты в данной области. Но раз эти положения выражают общий закон природы, то по мере развития науки и техники они становятся все более и более доступными уже широкому кругу лиц»<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> Мысовский Л. В., Новые идеи в физике атомного ядра, изд. АН СССР, 1946.

Процесс проникновения в среднюю школу «сложных» опытов естествен. Жизнь требует ознакомления школьников с новыми физическими идеями, которые, как правило, связаны с новыми приборами. Задача методистов заключается в таком упрощении приборов и опытов, при котором наиболее отчетливо выявлялась бы их принципиальная сторона и отодвигалось бы на задний план все второстепенное и несущественное.

Для постановки описанных ниже демонстраций в основном необходимо типовое оборудование физических кабинетов средних школ. Описание этого оборудования можно найти в каталоге-справочнике, изданном Министерством просвещения РСФСР<sup>1</sup>.

Лишь в исключительных случаях использовано оборудование, не вошедшее в комплект физических кабинетов средних школ. Это, как правило, новые приборы, сконструированные авторами и одобренные комиссией Учебно-методического совета Министерства просвещения РСФСР. Некоторые из этих приборов могут быть изготовлены под руководством учителя физики в учебных мастерских школ силами учащихся. Поэтому в книге дано описание таких приборов со схемами, эскизами и чертежами.

Использование новых приборов, по мнению авторов, позволяет наиболее просто и глубоко раскрыть физическую сущность демонстрируемых явлений. Описанию демонстраций по каждой теме программы предшествует краткое методическое введение, в котором обоснован выбранный порядок демонстраций и даны краткие методические указания.

Желая отразить в демонстрационном эксперименте методику изложения материала, авторы были вынуждены отвести место толкованию демонстрируемых явлений в плане методики их объяснения учителем на уроке. Это потребовало включения небольшого по объему материала, не содержащего непосредственно описания опытов, но существенно важного для понимания демонстрируемых явлений.

Все описанные в книге опыты демонстрировались на протяжении ряда лет в средних школах № 212 и 215 Москвы.

Для удобства читателей все опыты имеют сквозную нумерацию. В эту же нумерацию включены и рекомендуемые для демонстрации учебные кинофильмы.

Главы 1, 2, 7, 8, 9, 10, 11 написаны Н. М. Шахмаевым. Материал этих глав частично уже был опубликован в книге Н. М. Шахмаева «Основные демонстрации при изучении электромагнитного поля», изд. АПН РСФСР, М., 1960 г., и в книге «Изучение магнитного поля в курсе физики средней школы», Учпедгиз, М., 1960 г. Главы 3, 4, 5, 6 и § 2 главы 1-й написаны С. Е. Каменецким.

*Авторы*

---

<sup>1</sup> «Каталог-справочник». Учебное оборудование по физике для средней школы, Учпедгиз, 1958.

## ГЛАВА I

### ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ДЕМОНСТРАЦИОННЫХ ОПЫТОВ ПО ЭЛЕКТРИЧЕСТВУ

#### § 1. УНИВЕРСАЛЬНЫЙ ВЫПРЯМИТЕЛЬ

Наличие универсального выпрямителя, используемого при постановке демонстрационных опытов, в которых необходимо высокое напряжение постоянного тока от 250 до 15000 в, значительно расширяет возможности постановки основных демонстраций.

Выпрямитель собран на базе выпускаемого промышленностью школьного кенотронного выпрямителя на лампе 5Ц4С (рис. 1). Для получения высокого напряжения использована схема высокочастотного преобразователя напряжения, описанная в журнале «Радио» (№ 10, 1949 г.), в которую внесены небольшие изменения.

Преобразователь напряжения состоит из лампового генератора незатухающих колебаний с индуктивной связью на лампе Г-807. Катушка колебательного контура  $L_1$  индуктивно связана с катушкой  $L_3$ , имеющей большое число витков. Возникающий в катушке  $L_3$  ток высокого напряжения выпрямляется с помощью двух кенотронов 1Ц7С, включенных по схеме удвоения. Нити накала кенотронов питаются от катушек  $L_2$  и  $L_4$ , тщательно изолированных друг от друга и от корпуса.

Надежная изоляция обмоток необходима потому, что катоды ламп находятся под высоким потенциалом относительно друг друга.

В схеме удвоения напряжения кенотроны работают поочередно. В первую половину периода работает кенотрон, анод которого имеет положительный потенциал; при этом заряжается часть сдвоенного конденсатора до напряжения, близкого к напряжению вторичной обмотки высоковольтного трансформатора. Во вторую половину периода работает другой кенотрон и заряжается вторая часть сдвоенного конденсатора. Так как обе части сдвоенного конденсатора включены последовательно, то на выходе выпрямителя напряжение удваивается.

Наиболее ответственной деталью преобразователя является высокочастотный трансформатор. Каркас трансформатора изготовляется из органического стекла и имеет 14 секций.



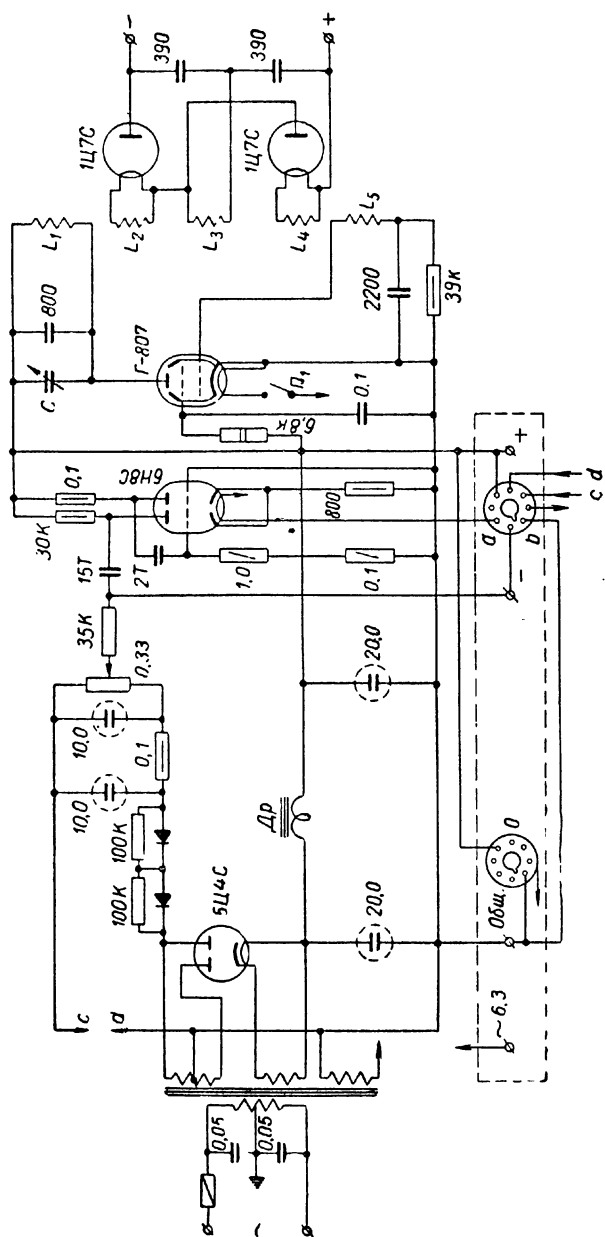


Рис. 1. Схема универсального выпрямителя



В первой секции располагается обмотка  $L_5$ , состоящая из 200 витков провода ПЭШО-0,24. Во 2-й и 13-й секциях располагаются обмотки  $L_2$  и  $L_4$ , имеющие по 2 витка провода в хорошей (например, хлорвиниловой) изоляции. В 14-й секции размещается обмотка  $L_1$ , состоящая из 250 витков провода ПЭШО-0,35. Обмотка  $L_3$  располагается в секциях 3—12 и имеет 6000 витков провода ПЭШО-0,12 по 600 витков в каждой секции.

Для повышения электрической прочности обмоток трансформатор пропитывается под вакуумом в парафине, церезине или растворе органического стекла в дихлорэтано.

Конденсатор переменной емкости, с помощью которого осуществляется регулировка высокого напряжения, имеет максимальную емкость 1000 пф.

Высоковольтная часть выпрямителя может быть отключена с помощью выключателя  $\Pi_1$ , включенного в цепь накала лампы Г-807, расположенного на задней панели.

Для подачи отрицательного потенциала на отражатель клистроны, а также для некоторых других целей на одной половине повышающей обмотки силового трансформатора собран маломощный выпрямитель. В качестве вентилей в выпрямителе использованы два кристаллических диода типа ДГ-Ц27, включенных последовательно. Для выравнивания напряжения диоды зашунтированы сопротивлениями по 100 ком. Корпуса электролитических конденсаторов этого выпрямителя изолированы от корпуса прибора. Регулировка снимаемого отрицательного потенциала производится с помощью потенциометра, ручка которого выведена на заднюю панель.

Для частотной модуляции колебаний генератора сантиметровых волн собран мультивибратор на лампе 6Н8С. Частота импульсов мультивибратора составляет 500—600 гц.

Мультивибратор и выпрямитель для подачи отрицательного потенциала обычно отключены. Включаются они автоматически при подключении к выпрямителю генератора сантиметровых волн. При включении фишек генератора замыкаются разрывы, выведенные на правую ламповую панельку.

Выпрямленное напряжение  $\pm 250$ ,  $-100$  в и переменное напряжение 6,3 в выведены к пяти несвинчивающимся клеммам и ламповым панелькам, расположенным на передней стенке выпрямителя. Таким образом, подключение потребителей к выпрямителю может быть осуществлено либо отдельными проводниками к клеммам, либо специальными фишками к ламповым панелькам.

Высокое напряжение выводится через съемные проходные изоляторы из органического стекла на верхнюю панель выпрямителя. Применение съемных проходных изоляторов весьма удобно и делает прибор безопасным, так как высокое напряжение выводится только тогда, когда в этом есть необходимость.

Для удобства обращения с выпрямителем в процессе демонстраций все органы управления выпрямителем сосредоточены на задней панели.

Выпрямитель собран на прямоугольном шасси, изготовленном из алюминия толщиной 1,5 мм; размеры шасси 170 × 340 мм, высота «подвала» 70 мм. Выпрямитель заключен в прямоугольный кожух размером 170 × 340 × 200 мм. На задней панели расположены выключатели  $P_1$ , ручка переменного конденсатора  $C$ , сигнальная лампочка и утопленные заподлицо штырьки для шнура, с помощью которого выпрямитель включается в сеть.

## § 2. МОДЕЛИ—АНАЛОГИИ ДЛЯ ОБЪЯСНЕНИЯ СУЩНОСТИ ПРОЦЕССОВ, ПРОИСХОДЯЩИХ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ

В обычных демонстрационных опытах показываются лишь внешние проявления электрического тока, его действия, поэтому для объяснения сущности процессов, происходящих в электрической цепи, которые не могут наблюдаться непосредственно, применяются различные модели — аналогии.

Для объяснения роли источника энергии в электрической цепи, а также разъяснения различия между скоростью носителей тока и практически мгновенным распространением электрического поля весьма полезна гидродинамическая аналогия. Она построена на основе аналогичности законов электрического тока и тока воды. Приводя данную аналогию, можно использовать жизненный опыт учащихся, их наблюдения за течением воды в ручьях, реках, трубах. Значительно лучше создать демонстрационный прибор, в котором в замкнутой гидродинамической цепи насосом приводится вода в движение. Движущаяся вода в свою очередь вращает гидродинамическую вертушку. Ниже данная модель — аналогия будет описана под названием «гидродинамическая аналогия электрической цепи».

Гидродинамическая аналогия также полезна при рассмотрении энергетических преобразований в электрической цепи постоянного тока. Однако значительно больший эффект в этом случае дает применение механической модели, имеющей вид винтовой наклонной плоскости. В этой модели скатывание шарика вниз под действием силы тяжести аналогично перемещению электрических зарядов во внешней электрической цепи под действием сил электрического поля. Работа же, совершаемая для подъема шарика по наклонной плоскости, аналогична работе сторонних сил в источнике электрического тока.

Для объяснения опыта Л. И. Мандельштама и Н. Д. Папалекси, доказывающего, что электрический ток в металлах осуществляется движением электронов, применяется механическая модель инерциального движения электронов.

Ниже приводится описание моделей — аналогий.

## Гидродинамическая аналогия электрической цепи

Установка (рис. 2) состоит из центробежного насоса с электродвигателем 1, гидродинамической вертушки 4, манометра 5, расходомера 7, соединительных резиновых трубок 2, кранов 3 и 6.

В таком виде установка демонстрируется совместно с аналогичной электрической цепью лишь в конце изучения законов электричества, вначале же она собирается без расходомера и манометра.

Основные узлы установки самодельные. Промышленностью в настоящее время выпускается лишь центробежный насос.

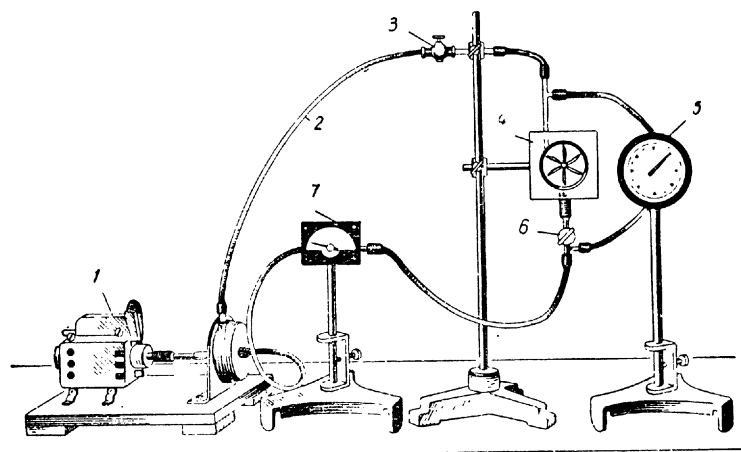


Рис. 2. Гидродинамическая аналогия электрической цепи

Самодельный центробежный насос имеет герметически закрытый корпус и два патрубка, на которые одеваются резиновые трубки. Ось насоса, на которой укреплены лопасти, выведена через сальник наружу и соединена с осью электродвигателя от швейной машины мощностью 75 *вт*, установленного на одной подставке с насосом.

Скорость вращения двигателя регулируется с помощью автотрансформатора и может меняться в широких пределах. Благодаря этому центробежный насос создает разный напор.

Водяная вертушка изготовлена из органического стекла. Вода в нее поступает через сопло сверху и приводит в движение ротор. Все части вертушки доступны для непосредственного наблюдения. К вертушке присоединяется манометр, для чего имеются специальные трубки. Устанавливается вертушка в лабораторном штативе с помощью металлического стержня, к которому она в свою очередь скрепляется на резьбе. Верхняя крышка вертушки прикреплена четырьмя винтами, а для обеспечения герметичности между корпусом и крышкой поставлена резиновая прокладка.

В установке применен манометр с очень чувствительной барометрической коробкой, способной измерять достаточно малые давления (миллиметры и доли миллиметра ртутного столба). Сзади в корпусе манометра имеются два штуцера, на которые одеваются резиновые трубки. С их помощью манометр присоединяется к вертушке и показывает разность давления на ней. Если корпус манометра не герметичен, то его присоединяют только к соплу и манометр показывает давление у сопла по отношению к атмосферному давлению. Вторую трубку у вертушки при этом заглушают.

В расходомере, изготовленном также из органического стекла, имеется канал, по которому протекает вода, прогоняемая насосом. Перпендикулярно потоку в канале расположена площадка, соединенная со стрелкой расходомера и со спиральной возвращающей пружиной. В результате давления на площадку, величина которого зависит от скорости потока воды, стрелка отклоняется на больший или меньший угол.

В установке (см. рис. 2) поставлены два крана, изготовленные из краповых горелок. Все соединения в системе осуществляются резиновыми трубками, причем трубки, образующие замкнутую систему, берутся черными, а манометр присоединяется красными трубками.

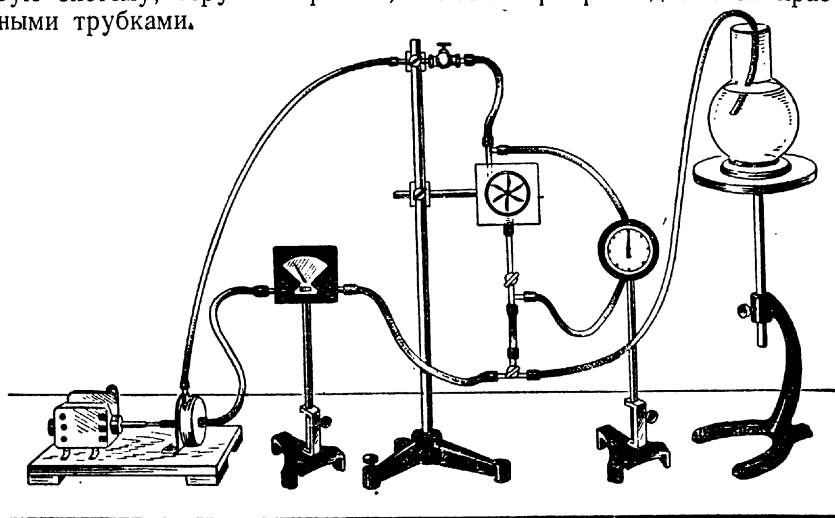


Рис. 3. Заполнение гидродинамической модели водой

Для заполнения системы водой в нижнюю часть ее включают с помощью тройника, который для этого ставят дополнительно, сифон, а сверху разъединяют трубки для выхода воздуха. Сосуд с водой, куда опущен сифон, поднимают выше системы и вода заполняет ее (рис. 3). Демонстрации с установкой не сложны и сводятся в основном к следующему.

Когда установка собрана из насоса и вертушки, демонстрируется лишь циркуляция воды, аналогичная циркуляции зарядов в электрической цепи.

Насос при проведении аналогии сопоставляют с источником тока, а вертушку — с потребителем электрической энергии. Поочередно закрывая краны, показывают, что кран, а аналогично и выключатель в электрической цепи можно ставить где угодно.

В том случае, когда установка собрана полностью, наблюдают изменения тока воды в зависимости от изменения напора. При этом можно расходомер сравнивать с амперметром, а манометр — с вольтметром в соответствующей электрической цепи.

Отдельные узлы установки (гидродинамическая вертушка, насос, манометр) могут быть использованы в качестве самостоятельных приборов при изучении соответствующих вопросов.

### **Механическая модель для объяснения процессов, происходящих в электрической цепи**

Простейшая модель с проволочным желобом для скатывания шарика изображена на рис. 4, а. Основанием модели служит фанерный диск диаметром 25 см. Для крепления желоба по краям дис-

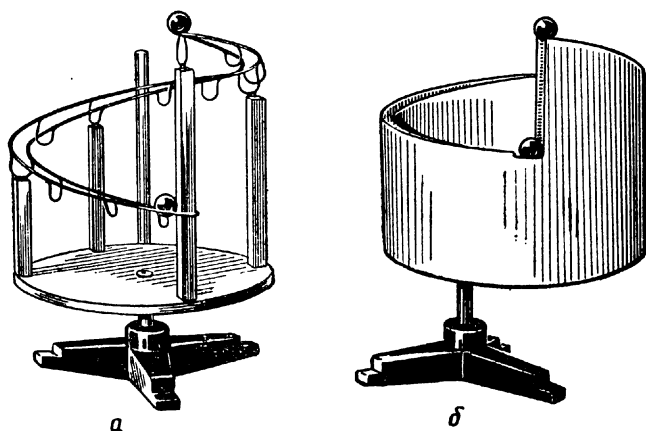


Рис. 4. Простейшая (а) и улучшенная (б) модель, иллюстрирующая энергетические преобразования в электрической цепи

ка устанавливают четыре деревянных стойки, высоту которых выбирают так, чтобы шарик опускался при движении примерно на 10 см. Желоб изготавливают из двух медных проволок диаметром 1—2 мм, соединяя их внизу изогнутыми дужками, которые припаивают к винтам, ввинченным в верхние торцы стоек. Ширину

желоба выбирают так, чтобы шарик при движении не проваливался между проволок и не соскакивал с них.

Однако более целесообразно изготовить модель так, чтобы была видна сама наклонная плоскость, а не только ее верхний край (рис. 4, б). Наклонную плоскость изготавливают из тонкой жести и укрепляют также на фанерном диске — основании. Для этого из листа жести вырезают заготовку в виде трапеции соответствующих размеров, один край трапеции прибивают к краю основания, а в месте стыка края жести припаивают друг к другу. Внутри образовавшейся наклонной плоскости помещают другой лист жести, вырезанный также в форме трапеции. Верхние края наружного и внутреннего листов жести образуют желоб для скатывания шарика. Чтобы обеспечить постоянство ширины желоба, между листами укрепляют деревянные стойки. Наружную поверхность модели целесообразно покрасить.

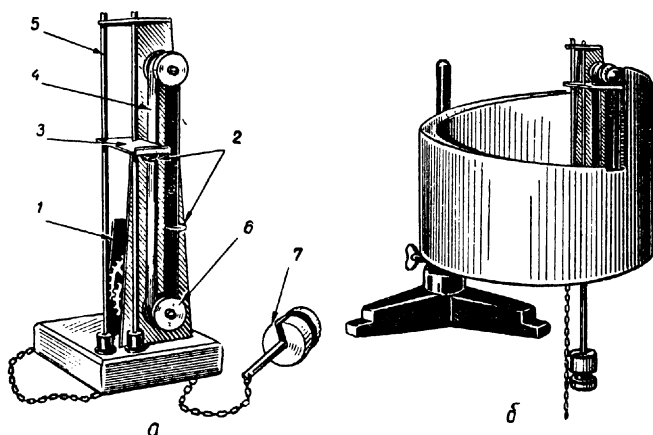


Рис. 5. Подъемный механизм (а) и модель для иллюстрации энергетических преобразований в электрической цепи с подъемным механизмом (б)

С описанной модели может быть использован подъемный механизм, который монтируют отдельно (рис. 5, а), где основным узлом является механизм 1 от часов-ходиков (без анкера), обладающий равномерным ходом. На оси часового механизма закреплен нижний барабан. Другой барабан установлен на стойке, прикрепленной к часовому механизму. На барабаны надета резиновая лента с двумя выступами 2. Часовой механизм работает за счет энергии опускающегося груза 7. Площадка 3, на которой поднимается шарик, свободно движется по двум направляющим 5, изготовленным из проволоки, и поднимается одним из выступов 2. Площадка изготавливается из жести и имеет бортики, чтобы удерживать шарик.

Когда площадка поднимается вверх, шарик с нее скатывается на наклонную плоскость, выступ на ленте освобождает площадку, которая свободно падает вниз, где на нее должен вновь попасть скатившийся за это время шарик. Далее площадка поднимается вверх следующим выступом на ленте и т. д.

Подъемный механизм крепится к модели с помощью винта, установленного в основании модели и гайки. Вид модели с подъемным механизмом показан на рис. 5, 6. При демонстрации модель устанавливают на кольцо, укрепленное в универсальном штативе. Высота установки должна быть такой, чтобы за время опускания груза шарик был поднят 3—4 раза.

### Механическая модель инерциального движения электронов<sup>1</sup>

Модель состоит из кольцевой стеклянной трубки, наполненной водой, в которую помещены твердые частицы (бусинки, крупинки, чаинки и т. д.). Если трубку быстро вращать, а затем затормозить, то жидкость в ней по инерции будет продолжать вращательное движение, что хорошо заметно по твердым частицам. Аналогично этому движутся свободные электроны при внезапной остановке катушки в опыте Л. И. Мандельштама и Н. Д. Папалекси.

Модель промышленностью не выпускается, но может быть легко изготовлена с помощью учащихся. Для изготовления модели наиболее целесообразно использовать круглую безэлектродную трубку от трансформатора Тесла, потерявшую вакуум. Трубку соединяют с металлической полосой с помощью изогнутых скобок (рис. 6). В центре полосы укрепляют конус для установки прибора на центробежной машине<sup>2</sup>. Часть запаянного отростка трубки отрезают и заполняют ее водой. Для того чтобы движение воды бы-

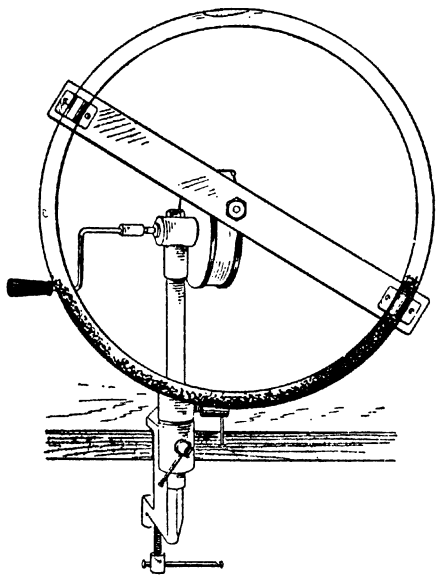


Рис. 6. Механическая модель инерциального движения электронов

<sup>1</sup> Модель предложена П. А. Рымкевичем, журн. «Физика в школе», 1952, № 4.

<sup>2</sup> Можно взять конус от диска Ньютона.



ло хорошо видно, в нее добавляют некоторое количество предварительно заваренного чая. Помещать в воду вместо чая какие-нибудь другие частицы (бусинки, шарики и т. п.) оказалось нецелесообразным. Это объясняется тем, что частицы чая так сильно увлекаются водой, что практически движутся с одинаковой скоростью, чего нельзя достигнуть с другими веществами. Трубку закрывают пробкой и заливают менделеевской замазкой. Полностью заполнять трубку водой не следует. Нужно оставить небольшой пузырек воздуха, так как температурное расширение стекла и воды различно и трубка может лопнуть.

Устанавливать модель можно на центробежной машине с червячной или с ременной передачей.

### **§ 3. КОМПЛЕКТ ПРИБОРОВ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ**

Успешное формирование правильных представлений о магнитном поле невозможно без его экспериментального изучения. Поэтому основные свойства поля должны быть показаны на опыте. Из опыта же должны вводиться основные характеристики поля. Однако в настоящее время промышленность не выпускает соответствующего учебного оборудования, позволяющего поставить демонстрационный эксперимент по теме «Магнитное поле». Ниже описан комплект приборов, прошедший многолетнюю проверку в школе № 215 г. Москвы. Основные приборы этого комплекта могут быть изготовлены участниками физического кружка в каждой школе.

#### **Индикаторы магнитной индукции и напряженности магнитного поля**

Особо важное значение имеют приборы, предназначенные для демонстрационного измерения величин индукции и напряженности магнитного поля. Эти приборы должны показывать не абсолютное значение измеряемых величин, а лишь их относительные значения, отмечая, во сколько раз напряженность или индукция в данной точке поля больше напряженности или индукции в другой точке поля. Такие приборы по существу являются индикаторами соответствующих величин.

Из общего курса физики известно, что напряженность магнитного поля может быть измерена по действию магнитного поля на тонкую длинную магнитную стрелку. Поэтому в качестве чувствительного элемента в индикаторе напряженности магнитного поля использована тонкая магнитная стрелка, уравновешенная на горизонтальной оси (рис. 7, а). На этой же оси укреплена уравновешенная стрелка-указатель, изготовленная из алюминиевой фольги.

Противодействующий момент создается двумя спиральными пружинами. Для того чтобы можно было вносить чувствительную часть индикатора внутрь демонстрационной катушки и в межполюсное пространство магнитов, ось прибора сделана длинной, а стрелка-указатель отнесена на расстояние 100 мм от магнитной стрелки, так как в противном случае она не могла бы вращаться.

Отклонение стрелки пропорционально напряженности магнитного поля. Индикатор дает возможность показать, что напряженность магнитного поля зависит от величины тока, формы проводника, расстояния от проводника и не зависит от магнитных свойств среды, в которой создано магнитное поле.

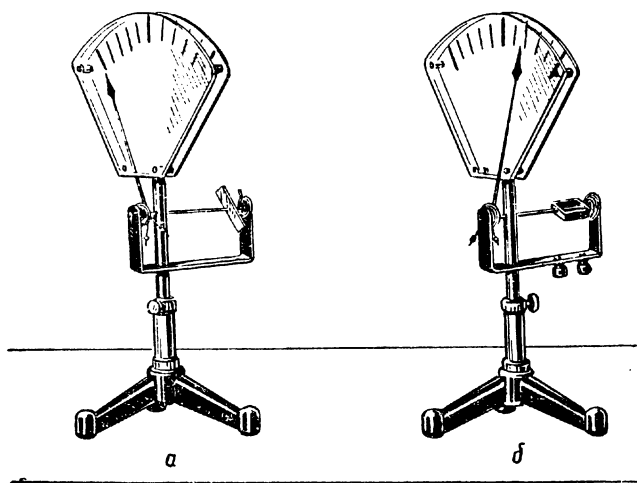


Рис. 7. Индикатор напряженности магнитного поля (а) и индикатор магнитной индукции (б)

Известно, что индукция магнитного поля может быть определена по действию магнитного поля на ток. Поэтому в качестве чувствительного элемента в индикаторе индукции взята небольшая катушка, которая питается от источника постоянного тока (рис. 7, б). На одной оси с рамкой укреплен уравновешенная алюминиевая стрелка-указатель. Ток к катушке подводится через спиральные пружины, которые одновременно создают противодействующий момент. Под действием магнитного поля катушка поворачивается на некоторый угол, пропорциональный величине индукции (сила, действующая на сторону рамки  $F = BIl$ ).

Размеры катушки должны быть достаточно малыми, чтобы магнитное поле в ее пределах можно было считать однородным. Стрелка-указатель, как и в индикаторе напряженности, отнесена на 100 мм от измерительной катушки.

## Демонстрационные катушки

Для изучения магнитного поля тока, проходящего по катушке, а также для некоторых других опытов необходимо изготовить две демонстрационные катушки. Схема намотки катушки и ее внешний вид показаны на рис. 8. Катушка имеет 10 отчетливо видимых

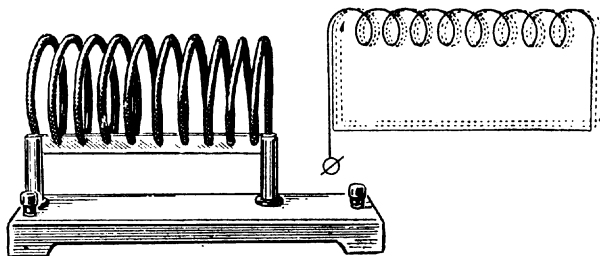


Рис. 8. Внешний вид и схема намотки (а) и демонстрационной катушки (б)

витков диаметром 100 мм. Каждый виток содержит примерно 100 витков провода ПЭ диаметром 0,3—0,5 мм. Нижние соединительные проводники уложены в паз подставки. Концы обмоток выведены к универсальным клеммам.

## Демонстрационный магнитный пускатель

Широкое использование магнитных пускателей на современных промышленных предприятиях настоятельно требует ознакомления учащихся с принципом работы этого электромагнитного аппарата. Изучая магнитный пускатель, учащиеся не только знакомятся с техническим устройством его, но и закрепляют свои знания об электромагнитном реле, одной из разновидностей которого является магнитный пускатель.

Демонстрационный магнитный пускатель (рис. 9) собран на вертикальной изолирующей панели размером 350 × 450 мм. Прибор состоит из небольшого электромагнита 1; трехполюсного контактора 6; блокконтактов 3 с прижимными пружинами, обеспечивающими надежность контакта, кнопок «пуск» и «стоп». Для подключения пускателя к трехфазной сети служат клеммы 7, а для подключения двигателя — клеммы 5. Кроме того, на панели имеются клеммы 2, которые служат для соединения пускателя с тепловым реле, а когда пускатель демонстрируется без реле, их замыкают накоротко перемычкой.

Кнопка «пуск» в нормальном положении разомкнута, а кнопка «стоп» — замкнута.

Монтаж пускателя выполнен толстым изолированным проводом. Рабочая цепь, цепь управления и цепь блокировки выполнены проводом различной окраски.

При нажатии на кнопку «пуск» ток от одной фазы через кнопки «пуск» и «стоп» пройдет через обмотку электромагнита и замкнется на вторую фазу. В это время электромагнит сработает и с помощью прикрепленной к нему тяги 8 замкнет рабочую цепь и цепь управления. При отпускании кнопки «пуск» рабочая цепь не размыкается, так как цепь управления замкнута через блокконтакты 3, шунтирующие кнопку «пуск».

Для размыкания рабочей цепи необходимо разорвать цепь питания электромагнита, что достигается нажатием на кнопку «стоп». При размыкании цепи электромагнита якорь его под действием силы тяжести и силы упру-

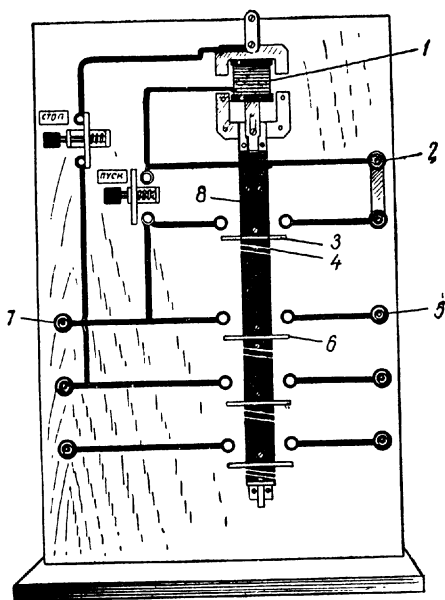


Рис. 9. Демонстрационный магнитный пускатель

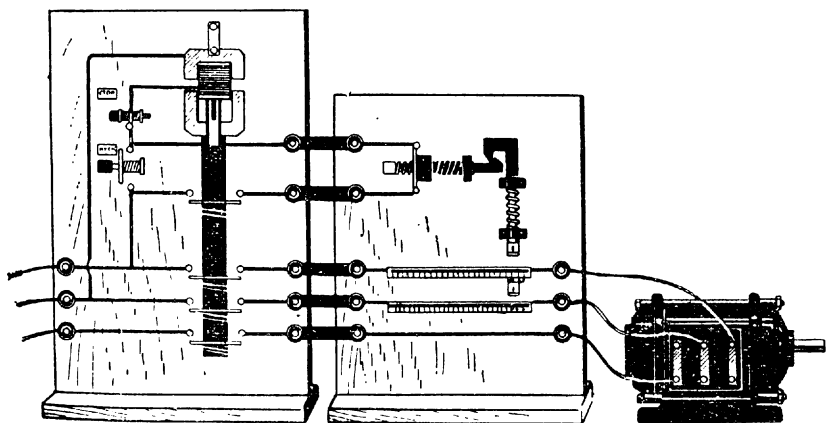


Рис. 10. Включение двигателя с помощью магнитного пускателя через тепловое реле

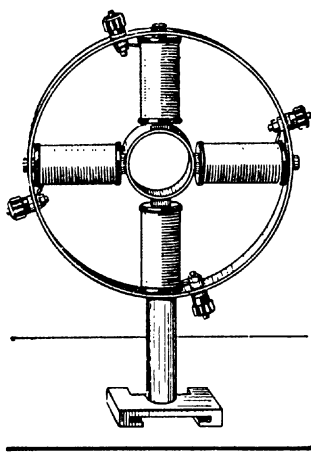


Рис. 11. Отклоняющая магнитная система к электронно-лучевой трубке

вода диаметром 0,1 мм (рис. 11).

Катушки навиты на каркас, имеющий внутренний диаметр 8—10 мм; длина катушек 8—10 см.

### Магнитная линза.

Магнитная линза (рис. 12) представляет собой многослойную катушку, намотанную из провода 0,1 мм в эмаливой изоляции.

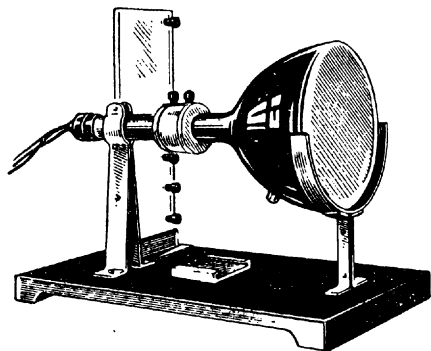


Рис. 12. Магнитная линза

гости прижимных пружин 4 возвращается в исходное нижнее положение. Обмотки электромагнита рассчитаны так, чтобы магнитный пускатель надежно срабатывал при напряжении 110 — 220 в.

Магнитный пускатель может быть использован и для автоматического отключения двигателя в случае его длительной перегрузки. На рис. 10 показано включение двигателя при помощи магнитного пускателя с тепловым реле.

### Отклоняющая магнитная система к электронно-лучевой трубке

На латунном или алюминиевом кольце диаметром 200 мм в двух взаимно перпендикулярных направлениях установлены четыре катушки, имеющие по 2000 — 3000 витков про-

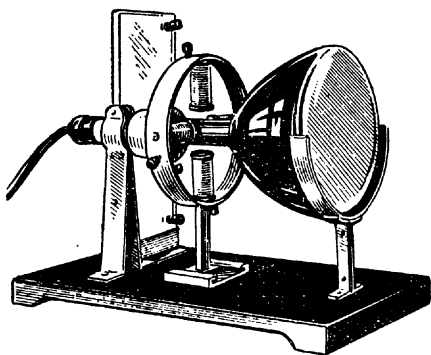


Рис. 13. Внешний вид установки для демонстрации магнитной фокусировки и отклонения электронного пучка магнитным полем

Длина катушки 60 мм, внутренний диаметр равен диаметру трубки; число витков составляет 2000—3000.

На рис. 13 показан внешний вид установки для демонстрации принципа магнитной фокусировки и отклонения электронного пучка магнитным полем.

### **Сердечник для наблюдения скачков Баркгаузена**

Никелевую проволоку диаметром до 1 мм, длиной 50—80 см для улучшения ее упругих свойств сильно вытягивают и навивают на барабан диаметром 5—8 см. Полученную таким образом спираль разрезают на 5—8 частей, чтобы получить отрезки длиной примерно по 10 см. Нарезанные проволоочки помещают в стеклянную или жесткую пластмассовую трубочку длиной 10 см. Внутренний диаметр трубочки должен быть таким, чтобы уложенные проволоочки находились в выпрямленном состоянии, но не превышать 10 мм.

### **Катушка для наблюдения скачков Баркгаузена**

Провод диаметром 0,1—0,15 мм навивают на каркас длиной 9—10 см с внутренним каналом диаметром 10 мм. Катушка имеет примерно 10 000 витков. Можно использовать высокоомную катушку от телефонного реле, вынув из нее стальной сердечник.

### **Рамки для изучения взаимодействия параллельных токов**

Размеры рамок составляют 100 × 200 мм. Каждая рамка состоит из 30—50 витков изолированного провода диаметром 0,2—0,3 мм. Концы рамки выведены на одну из ее коротких сторон.

### **Парамагнитная среда**

При изучении магнитного поля необходимо на опытах показать влияние среды на поле, в частности, на пондеромоторное взаимодействие токов, на величину индукции магнитного поля и т. п.

Для постановки соответствующих опытов необходима жидкая парамагнитная среда, ибо только в жидкую среду можно поместить индикаторы поля. Магнитная проницаемость среды должна быть в полтора-два раза больше магнитной проницаемости воздуха, так как только в этом случае станет заметным влияние среды. Наконец, среда не должна быть вязкой, чтобы не оказывать заметного тормозящего действия на индикаторы.

В природе нет веществ, удовлетворяющих одновременно этим условиям. Даже наиболее сильная парамагнитная жидкость —

насыщенный водный раствор хлорного железа ( $\text{FeCl}_3$ ) — имеет магнитную проницаемость, близкую к магнитной проницаемости воздуха. Однако, воспользовавшись принципом изготовления магнитодиэлектриков, можно создать парамагнитную жидкость с необходимой магнитной проницаемостью.

Тонкий ферромагнитный порошок размешивают в глицерине. Размеры зерен порошка во избежание быстрого оседания должны быть порядка нескольких микрон. Такие порошки выпускает наша промышленность для поливки магнитофонных лент. Вместо глицерина можно использовать не очень вязкое смазочное масло, а вместо готового порошка — пылеобразную ржавчину или, в крайнем случае, очень мелкие железные опилки. Однако следует иметь в виду, что в последнем случае опилки быстро оседают и поэтому парамагнитную жидкость надо готовить непосредственно перед демонстрацией.

В такой смеси можно рассматривать магнитное поле, усредненное по объемам, большим по сравнению с размерами взвешенных частиц. По отношению к такому среднему полю смесь является однородной и изотропной средой и поэтому может характеризоваться определенным эффективным значением магнитной проницаемости. Величина магнитной проницаемости зависит от количества размешанного порошка и в не очень сильных полях примерно постоянна.

Хорошо размешанный мелкий порошок и ржавчина в виде пыли не оседают на дно в течение 5—6 ч.

#### § 4. ДЕМОСТРАЦИОННЫЙ ОСЦИЛЛОГРАФ

Для постановки многих демонстрационных опытов, очень важных для формирования правильных представлений об электромагнитном поле, необходим демонстрационный осциллограф. К сожалению, наша промышленность учебного оборудования не выпускает подобных приборов. Лабораторные осциллографы типа ЭО-6 и ЭО-7 дороги, имеют малый экран сравнительно небольшой яркости. Этими же недостатками обладает и так называемый «Школьный осциллограф», выпускаемый заводом № 5 Главучтехпрома.

Однако лабораторные осциллографы ЭО-6 и ЭО-7 легко переделывать в демонстрационный осциллограф<sup>1</sup>. Для этого на их задней стенке в непосредственной близости от панели электронно-лучевой трубки 13ЛО37 надо установить дополнительную панель для подключения трубки 31ЛО33.

---

<sup>1</sup> Подробнее об этом можно прочитать в статье К. Дулепова, помещенной в журн. «Радио», 1960, № 3.



Трубка 31ЛО33 устанавливается в отдельном кожухе. Трубка к осциллографу ЭО-7 (или ЭО-6 м) подсоединяется экранированным кабелем, вторые концы которого заделаны в 14-штырьковый цоколь от вышедшей из строя трубки 13ЛО36 или 13ЛО37.

Очень удобен для постановки классных демонстраций осциллограф конструкции учителя физики средней школы № 18 г. Сумы Б. Ю. Миргородского. Такой осциллограф может быть собран на занятиях физико-технического кружка.

Принципиальная схема осциллографа приведена на рис. 14. Исследуемое напряжение подается на вход усилителя вертикального отклонения луча и через конденсатор  $C_1$  и потенциометр  $R_1$  подводится на управляющую сетку лампы 6Ж8. С помощью потенциометра  $R_1$  регулируется усиление по вертикали. Второй каскад усилителя собран на лампе 6П9 с анодной нагрузкой в виде трансформатора  $Tr_2$ , вторичная обмотка которого соединена с отклоняющей системой электронно-лучевой трубки. Напряжение на экранирующую сетку подается с делителя, образованного сопротивлениями  $R_8$  и  $R_{10}$ .

Блок горизонтальной развертки состоит из мультивибратора, собранного на лампе 6Н8С, и усилителя пилообразных колебаний на лампе 6П6С. Вторичная обмотка трансформатора  $Tr_3$  подключена к катушкам горизонтального отклонения луча.

Синхронизация развертки может осуществляться либо от сети, либо от исследуемого напряжения. Изменение вида синхронизации осуществляется переключателем  $P_2$ , с помощью которого на сетку левой (по схеме) половины двойного триода 6Н8С подается через конденсатор  $C_{15}$  либо напряжение накала, либо исследуемое напряжение, снимаемое с сопротивления  $R_7$ . Плавное изменение частоты развертки осуществляется потенциометром  $R_{23}$ .

Яркость изображения изменяется с помощью потенциометра  $R_{11}$ , а фокусировка потенциометром  $R_{16}$ .

Гашение обратного хода луча достигается подачей отрицательных импульсов с анода правой (по схеме) половины лампы 6Н8С через конденсатор  $C_{17}$  на управляющий электрод электронно-лучевой трубки.

Блок питания осциллографа осуществляется от обычного кенотронного выпрямителя на лампе 5Ц4С и высокочастотного преобразователя напряжения. Последний состоит из высокочастотного блокинг-генератора, собранного на лампе 6П3С, и высоковольтного выпрямителя на кенотроне 1Ц1С. Блокинг-генератор дает напряжение с частотой около 100 кГц, которое повышается в высокочастотном трансформаторе  $Tr_4$ . Конструкция подобных преобразователей была предложена В. Н. Геништа и А. И. Федоровым<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> Преобразователь описан в журн. «Радио», 1949, № 10.

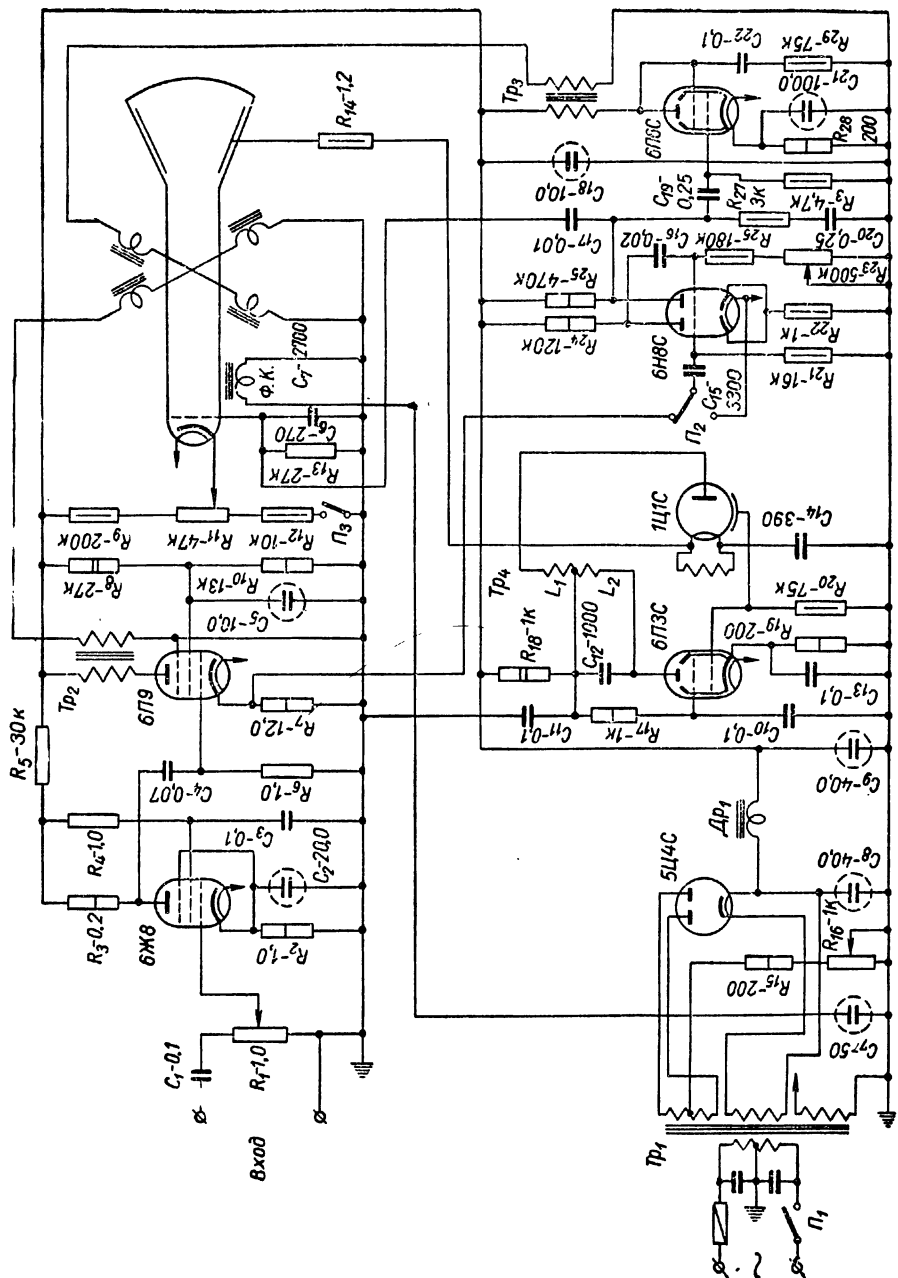


Рис. 14. Принципиальная схема электронного осциллографа конструкции Б. Ю. Миргородского

На передней панели осциллографа установлены только клеммы входа усилителя по вертикали. Ручки управления осциллографом сосредоточены на панели, расположенной на правой стенке прибора, что весьма удобно при постановке демонстраций. Все детали осциллографа фабричные. Силовой трансформатор  $Tr_1$  взят от приемника «Мир», трансформаторы  $Tr_2$  и  $Tr_3$  являются выходными трансформаторами кадровой развертки телевизора «Луч». Вторичная обмотка трансформатора  $Tr_3$  перемотана. Она имеет 300 витков провода ПЭЛ 0,35.

Данные об обмотках трансформатора приведены в табл. 1.

Таблица 1

Обозначение обмотки	Марка провода	Число витков	Тип магнитопровода и размеры в мм
Трансформатор $Tr_1$			
I	ПЭЛ 0,51	263+41+41+263	Ш — 40 × 50
II	ПЭЛ 0,29	700+700	
III	ПЭЛ 1,0	13	
IV	ПЭЛ 1,35	16	
Трансформатор $Tr_2$			
I	ПЭЛ 0,1	4750	Ш — 20 × 28
II	ПЭЛ 0,51	150	
Трансформатор $Tr_3$			
I	ПЭЛ 0,1	4750	Ш — 20 × 28
II	ПЭЛ 0,35	300	
Трансформатор $Tr_4$			
I	ПЭШО 0,07	3 × 1600	Без сердечника Каркас из органического стекла со щечками
II	ПЭШО 0,25	300	
III	ПЭЛ 0,2 в трубке	1	
Дроссель $Dp_1$	ПЭЛ 0,29	До заполнения каркаса	Ш — 20 × 20

Осциллограф широко используется при: постановке демонстраций в процессе изучения звука (наблюдение форм кривых, зависимость громкости звука от амплитуды, высоты тона, частоты, сложение колебаний и т. п.); изучении переменного тока (наблюдение форм кривых различных переменных токов, работа одно- и двух-

полупериодного выпрямителя, сглаживающего фильтра); при изучении темы «Электромагнитные колебания и волны» (демонстрация затухающих колебаний в колебательном контуре, зависимость затухания от величины активного сопротивления, демонстрация незатухающих колебаний, демонстрация модулированных колебаний и детектированных колебаний и т. п.). Используя электронный переключатель, можно наблюдать сдвиг фаз между током и напряжением для индуктивной и емкостной нагрузки, компенсацию сдвига фаз, резонанс напряжений.

Кроме демонстрационных опытов, электронный осциллограф используется и для лабораторных работ учащихся. Следует отметить, что все демонстрации с применением электронного осциллографа весьма наглядны, доступны для учащихся, а постановка их не требует большого труда учителя.

## **§ 5. ЭЛЕКТРОННЫЙ ПЕРЕКЛЮЧАТЕЛЬ К ОСЦИЛЛОГРАФУ**

При изучении переменного тока часто требуется проводить исследование двух переменных величин — тока и напряжения. Для этого необходим осциллограф, который позволял бы одновременно наблюдать две кривые. Можно воспользоваться специальной двухлучевой трубкой, в которой две независимые электронные пушки направляют два электронных луча через независимые отклоняющие системы на общий экран. Но осциллограф, построенный на такой трубке, был бы громоздким, сложным в управлении и дорогим, поэтому в настоящее время в технике для одновременного наблюдения двух кривых при помощи обычной однолучевой трубки применяют электронный переключатель.

Принцип действия электронного переключателя заключается в том, что он позволяет попеременно подавать на вход осциллографа два следующих один за другим сигнала. Сменяясь поочередно, эти сигналы создают на экране электронно-лучевой трубки две отдельные кривые. В зависимости от частоты переключения сигналов возможны два режима работы переключателя. Если частота переключений больше частоты исследуемых сигналов, последние воспроизводятся на экране пунктирной линией. В противном случае, на экране видны кривые в виде сплошных линий. Но для этого необходимо выбрать частоту переключений такую, чтобы она не находилась в кратном отношении с частотой исследуемых сигналов.

Выбор частоты переключений не критичен. Чаще всего частоту выбирают в пределах от 100 гц до 10 кгц.

В процессе исследования фазовых соотношений в цепях переменного тока часто бывает необходимо раздвинуть кривые, сместив их по вертикали относительно друг друга.

Расстояние между кривыми на экране при данной чувствительности осциллографа определяется соотношением анодных токов

усилительных ламп. Проще всего это осуществляется регулировкой смещения усилительных ламп.

На рис. 15 дана принципиальная схема электронного переключателя, описанного в журнале «Радио». Достоинством переключателя, собранного по этой схеме, является простота и надежность в работе.

Рассмотрим работу переключателя. Переключатель собран на двух двойных триодах 6Н15П. Исследуемые напряжения подаются на сетки левого триода лампы  $L_1$  и правого триода лампы  $L_2$ .

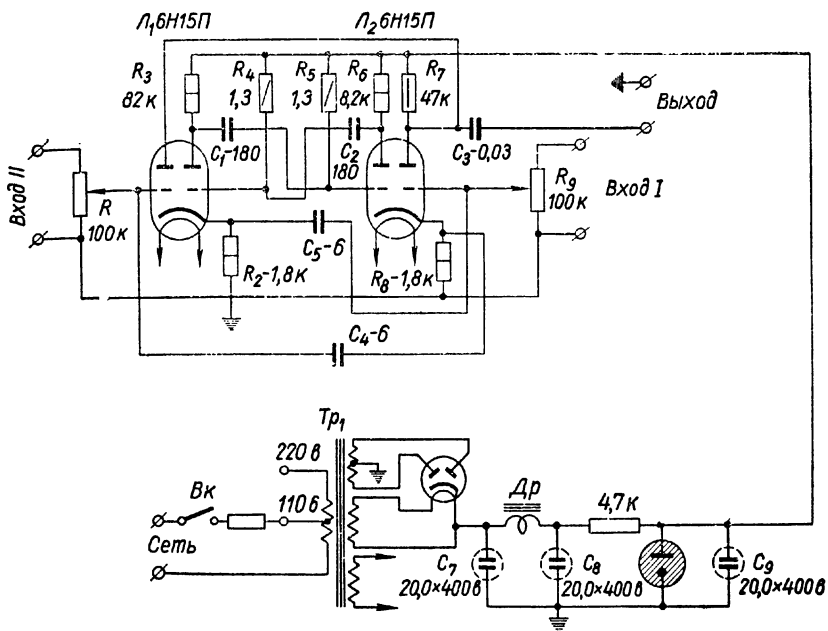


Рис. 15. Схема электронного переключателя

Эти триоды поочередно запираются прямоугольными импульсами, создаваемыми мультивибратором, собранным на правом триоде лампы  $L_1$  и левом триоде лампы  $L_2$ .

Допустим, что правый триод лампы  $L_2$  открыт и потенциал сетки по отношению к катоду равен нулю. Через лампу проходит большой ток, который создает на катode напряжение, достаточное для запираения левого триода. Тот же ток, проходя по сопротивлению  $R_3$ , создает на нем отрицательный потенциал, который запирает левый триод лампы  $L_2$ . При этом правый триод лампы  $L_2$  работает в режиме усиления с отрицательной обратной связью в

цепи катода. В таком состоянии схема находится до тех пор, пока конденсатор  $C_1$  не перезарядится настолько, что напряжение между сеткой левого триода лампы  $L_2$  и катодом станет равным напряжению отпирания. В этот момент мультивибратор опрокидывается и входы переключаются. Частота коммутации мультивибратора зависит от величин сопротивлений в цепи сеток и емкости конденсаторов  $C_1$  и  $C_2$ . В мультивибраторе частота импульсов равна 7 кГц.

Переключатель питается от кенотронного выпрямителя, собранного на лампе 5Ц4С, анодное напряжение в котором стабилизировано с помощью стабилитрона СГ-4С.

Переключатель собран на шасси, изготовленном из дюралюминия толщиной 2 мм. Габариты прибора с кожухом  $150 \times 200 \times 250$  мм.

На передней панели в левой ее части расположены четыре клеммы входов коммутатора, а слева — выход. Такое расположение клемм удобно для сборки цепей и наблюдения их учащимися. Ручки усилителей выведены на заднюю панель.

## § 6. ДЕМОСТРАЦИОННЫЕ АМПЕРМЕТР, ВОЛЬТМЕТР И ВАТТМЕТР

При изучении темы «Переменный ток» необходимо измерять ток, напряжение и мощность в цепях переменного тока.

Выпускаемые для школ демонстрационные амперметр и вольтметр магнитоэлектрической системы (с выпрямителем) мало пригодны для этой цели, а демонстрационные ваттметры вообще не выпускаются.

Однако без большого труда можно переделать в демонстрационные приборы выпускаемые промышленностью амперметры и вольтметры типа Д-170 и ваттметры типа Д-174. Такие приборы ферродинамической системы ударопрочны и предназначены для измерений в цепях переменного тока с частотой 50 Гц. Благодаря специальной форме магнитопровода шкала в этих приборах «растянута» на 270 мм, а угол максимального отклонения стрелки равен  $230^\circ$ . Рабочая часть шкалы амперметра и вольтметра лежит в пределах от 20 до 100%, а у ваттметра — 100% от ее длины, рабочее положение приборов — вертикальное. Класс точности — 2,5, что вполне достаточно для демонстрационных приборов.

Переделка приборов заключается в изготовлении новых шкал и корпусов, а также удлинении стрелки, что в свою очередь требует незначительного утяжеления противовесов.

Наиболее удобны для переделки амперметр на 5 А и вольтметр на 150 В; при этом электрическая схема их не изменяется.

Несколько сложнее переделка ваттметра. Ваттметр Д-174 предназначен для измерения активной мощности в цепи трехфазного

тока и представляет собой два отдельных однофазных ваттметра, подвижные системы которых находятся на одной оси и их вращающие моменты в процессе измерений складываются.

Для переделки следует взять ваттметр, рассчитанный на максимальный ток 5 а и напряжение 127 в (максимальная мощность 1000 вт). Токовые обмотки ваттметра надо соединить последовательно, а обмотки напряжения — параллельно. При таком соеди-

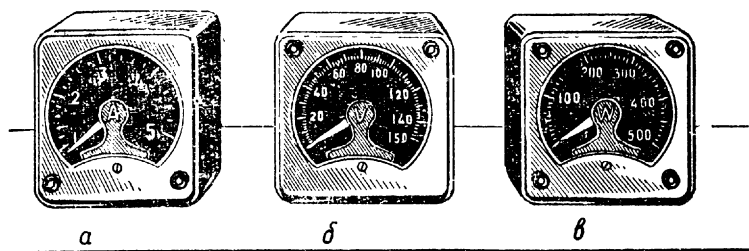


Рис. 16. Комплект демонстрационных электроизмерительных приборов:

а — амперметр; б — вольтметр; в — ваттметр

нении обмоток чувствительность прибора повышается вдвое и стрелка отклоняется на максимальную величину при мощности 500 вт.

Целесообразно изготовить для приборов прямоугольные корпуса размером  $270 \times 320 \times 10$  мм. Диаметр шкал в этом случае должен быть 250 мм, длина стрелки 85 мм, что обеспечивает очень хорошую видимость с любого места аудитории.

Шкалы амперметра и ваттметра целесообразно разделить на 5 крупных делений, каждое из которых в свою очередь надо разбить на 10 более мелких делений. Такая шкала позволяет измерять ток с точностью до 0,1 а, а мощность — с точностью до 10 вт, что хорошо согласуется с классом точности приборов.

Шкалы вольтметра следует разделить на 15 крупных делений, каждое из которых в свою очередь рекомендуется разделить пополам. Тогда напряжение может быть измерено с точностью до 5 в, что также хорошо согласуется с классом точности прибора.

Целесообразно шкалу прибора сделать черной, а деления и цифры нанести белой краской. Такая окраска шкалы обеспечивает хорошую видимость стрелки и высокую точность отсчета.

На рис. 16 показаны переделанные подобным образом приборы.



## § 7. КОМПЛЕКТ ПРИБОРОВ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ СВОЙСТВ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН

В теме «Электромагнитные колебания и волны» заканчивается формирование представлений учащихся об электромагнитном поле. Здесь особенно важен эксперимент, опираясь на который только и можно сделать глубокие обобщения.

Вопросам экспериментального оснащения разделов физики, связанных с формированием представлений учащихся об электромагнитном поле, отечественная и зарубежная методика уделяла большое внимание.

История школьного демонстрационного эксперимента непосредственно связана с классическими опытами Г. Герца. Следует отметить, что делались многочисленные попытки упростить приборы Герца и сделать их доступными для средней школы.

После того как была потеряна надежда создать достаточно простые искровые генераторы электромагнитных волн, методисты обратились к ламповым генераторам метрового диапазона. Было предложено большое число генераторов и приемников, которые, как правило, решали какую-либо одну из задач эксперимента по электромагнитному полю. Только в журнале «Физика в школе» было помещено около 30 статей, посвященных эксперименту по электромагнитному полю.

Наиболее удачное решение вопроса было найдено членом-корр. Академии педагогических наук РСФСР Б. С. Зворыкиным, предложившим конструктивно простой, методически глубоко продуманный комплект приборов для изучения свойств электромагнитных колебаний и волн.

Комплект приборов Б. С. Зворыкина выпускается промышленностью учебного оборудования и дает возможность убедительно показать получение незатухающих колебаний, резонанс контуров, излучение колебательного контура, принципы телеграфной и телефонной радиопередачи, управление объектами по радио.

Однако из-за большой длины волны (2 м) с имеющимися приборами нельзя показать преломление, дифракцию, поляризацию волн, а об отражении и интерференции приходится судить по косвенным признакам.

Между тем демонстрация этих свойств электромагнитных волн не только способствует более глубокому изучению электромагнитного поля, но, что особенно важно, позволяет показать единство природы электромагнитных и оптических явлений. Изучение свойств электромагнитных волн дает возможность рассматривать оптические явления как естественное продолжение учения об электромагнитном поле. Это в свою очередь значительно упрощает изучение всей физической оптики.

Для экспериментального изучения этих свойств электромагнитных волн достаточно иметь маломощный (порядка нескольких мил-

ливатт) генератор ультравысокой частоты с длиной волны в несколько сантиметров.

Несколько лет тому назад создание такого генератора для нужд средней школы было невозможным, так как не было электронных ламп, с помощью которых можно было бы генерировать волны столь малой длины. В настоящее время наша электровакуумная промышленность выпускает клистроны на волны длиной от долей миллиметра до нескольких сантиметров, а также стержневые лампы, с помощью которых можно генерировать волны порядка нескольких сантиметров.

Следует заметить, что конструкции подобных генераторов общеизвестны и широко используются в современной технике. Больше того, были попытки создания подобных генераторов и для учебных целей. Так в Московском планетарии и Политехническом музее одно время экспонировались генераторы сантиметровых волн на маломощном магнетроне. Аналогичный генератор использовался Г. С. Гареликом для постановки демонстрационных опытов в Горьковском университете. Однако эти генераторы не были приспособлены для школ.

В 1957 г. в 215-й школе Москвы был создан комплект приборов для изучения свойств электромагнитных волн на базе генератора сантиметровых волн.

Новый комплект приборов не заменяет комплекта приборов, сконструированных Б. С. Зворыкиным, а дополняет его и позволяет просто и убедительно показать основные свойства электромагнитных волн.

В комплект входят следующие приборы:

- генератор сантиметровых волн  $\lambda = 3$  см
- приемник с рупорной антенной
- приемник с дипольной антенной
- универсальный выпрямитель
- два металлических плоских зеркала
- две металлические пластинки
- линза из пластмассы
- призма из пластмассы
- две поляризационные решетки
- усилитель
- мелкие детали

Ниже дано описание основных приборов комплекта.

### **Генератор сверхвысокой частоты (СВЧ)**

Для генерации маломощных электромагнитных колебаний сверхвысокой частоты используют специальные электронные приборы — отражательные клистроны, конструкция которых была разработана в 1940 г. группой советских инженеров.

Известно, что частота свободных электромагнитных колебаний в контуре определяется соотношением

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}.$$

Следовательно, для получения сверхвысокочастотных колебаний необходимо уменьшить величины емкости и индуктивности контура. Однако это сопряжено с рядом трудностей, так как при больших частотах начинают сказываться распределенные емкости и индуктивности проводников. Так для генерации колебаний с частотой 10 000 мГц ( $\lambda = 3$  см) емкость контура при индуктивности 0,1 мкГн должна быть примерно 0,003 пф. Практически такой контур может быть выполнен в виде прямоугольного витка (рис. 17, а), длина сторон которого несколько миллиметров. Однако

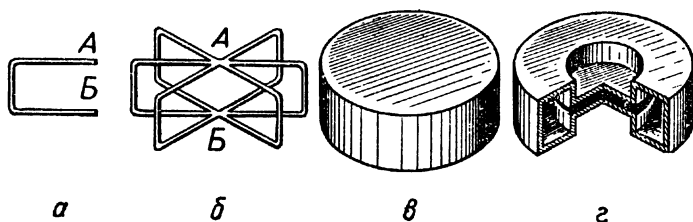


Рис. 17. Образование объемного резонатора

подобный контур непригоден для получения электромагнитных колебаний сверхвысокой частоты. Дело в том, что сверхвысокочастотные токи проникают в толщу проводника на весьма незначительную глубину. Так для частоты 10 000 мГц толщина слоя, по которому проходит ток, составляет  $6,3 \cdot 10^{-5}$  см и контур обладает большим активным сопротивлением, обуславливающим затухание колебаний в нем.

Кроме того, контур в виде витка по существу является открытым колебательным контуром и, следовательно, хорошим излучателем, что также ведет к потерям энергии и способствует затуханию колебаний.

Для того чтобы уменьшить активное сопротивление контура и устранить излучение, присоединим параллельно данному витку второй, третий и т. д. (рис. 17, б). Сопротивление такого контура (измеренное между точками А и В) будет уменьшаться по мере прибавления витков. Одновременно в два, три и т. д. раз возрастет емкость контура ( $C_{\text{общ}} = Cn$ ) и во столько же раз уменьшится его

индуктивность ( $L_{\text{общ}} = \frac{L}{n}$ ). Частота же свободных колебаний в контуре останется неизменной.

Увеличивая число присоединяемых витков, мы в конце концов получим полый металлический цилиндр, который принято называть объемным резонатором (рис. 17, в).

В технике сверхвысоких частот применяются объемные резонаторы самой разнообразной формы. Мы рассмотрим лишь тороидальный резонатор, применяемый в отражательных клистронах (рис. 17, г). Электрическое поле в тороидальном резонаторе сосредоточено в основном в его центральной части, а магнитное, главным образом, на периферии.

Допустим, что в средней части объемного резонатора сделаны отверстия, а ниже резонатора расположен раскаленный катод,

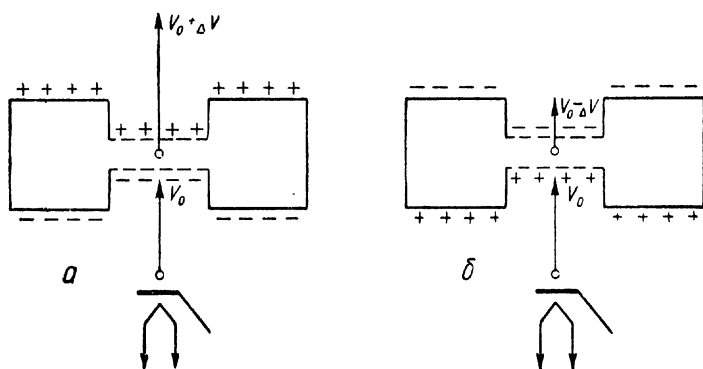


Рис. 18. Взаимодействие электронов с полем резонатора

излучающий электроны в направлении резонатора (рис. 18). Поток электронов, испускаемых катодом, не постоянен во времени. Его всегда можно представить как сумму постоянной и некоторой беспорядочно меняющейся составляющих; последняя получила название шумовой составляющей (название — шумовая составляющая отражает то обстоятельство, что в радиоприемных устройствах она вызывает характерный шум).

Исследования показали, что шумовая составляющая состоит из суммы синусоидальных колебаний со всевозможными частотами. Благодаря присутствию в шумовой составляющей колебаний, близких к частоте свободных колебаний резонатора, в нем возникнут слабые колебания.

Электроны, пролетая через объемный резонатор, будут испытывать воздействие электрического поля резонатора. Это воздействие

может быть двояким. Электрон, пролетающий через резонатор в момент, изображенный на рис. 18, а, будет дополнительно ускоряться полем резонатора на величину  $\Delta v$ . За пределы резонатора электрон вылетит с большей скоростью, чем та, с которой он в него влетел. Следовательно, электрон приобретет дополнительную энергию, а электромагнитное поле резонатора потеряет столько же энергии. Электрон, пролетающий через резонатор в момент, изображенный на рис. 18, б, будет тормозиться электрическим полем резонатора и вылетит из резонатора с меньшей скоростью, чем та, с которой он в него влетел. Электрон в этом случае передаст часть своей кинетической энергии электромагнитному полю, заключенному в объеме резонатора.

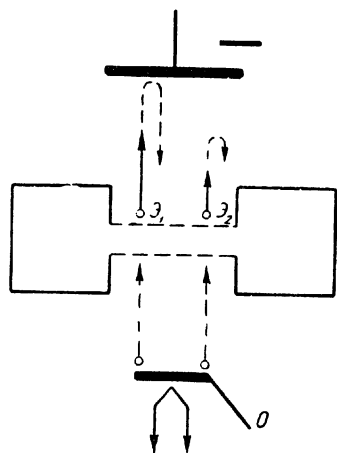


Рис. 19. К объяснению принципа работы отражательного клистрона

Очевидно, что число электронов, забирающих энергию от электромагнитного поля резонатора, и число электронов, отдающих энергию резонатору, за какой-то продолжительный промежуток времени будут равны между собой и в результате резонатор не приобретет дополнительной энергии.

Объемный резонатор получит от электронного потока избыточную энергию, при условии, если поле будет тормозить больше электронов, чем ускорять. Чтобы обеспечить это условие, расположим над резонатором электрод, имеющий по отношению к катоду отрицательный потенциал (рис. 19).

Тогда все электроны, пролетевшие через резонатор, попадут в тормозящее поле, создаваемое электродом, и будут им отражаться. Поэтому отражающий электрод получил название отражателя.

Проследим за движением двух электронов  $e_1$  и  $e_2$ . Электрон  $e_2$  вылетел из катода несколько позже, чем электрон  $e_1$ . Допустим, что время «запаздывания» электрона  $e_2$  равно половине периода свободных электромагнитных колебаний резонатора.

Электрон  $e_1$  попадает в ускоряющее поле резонатора, а  $e_2$  — в тормозящее, и их прохождение через резонатор по направлению от катода к отражателю не изменит энергии электромагнитного поля внутри резонатора: сколько энергии заберет от поля электрон  $e_1$ , столько же энергии отдаст  $e_2$ . Однако электрон  $e_1$  выйдет из резонатора с большей скоростью, чем электрон  $e_2$ . Обладая большим запасом кинетической энергии, электрон  $e_1$  будет сопротивляться тормозящему действию поля отражателя и подойдет

к нему ближе, чем  $\varepsilon_2$ . Вследствие этого, хотя электроны вылетели из катода в разное время, после отражения они войдут в резонатор одновременно.

Мы рассмотрели движение только двух электронов, но сказанное справедливо для всех электронов, испускаемых катодом: электроны, прошедшие резонатор в тот момент, когда поле было ускоряющим на обратном пути от отражателя, будут нагонять электроны, прошедшие резонатор позже, когда поле резонатора было тормозящим. Поэтому произойдет группировка отраженных электронов в своеобразное «сгущение», за которым следует «разряжение». Движение отраженных электронов напоминает волны морского прибоя, откуда и произошло название прибора: «клизо» — прибор (греческое), клистрон — прибор электронов.

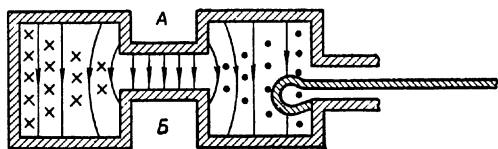


Рис. 20. Схема вывода энергии из отражательного клистрона

Можно подобрать расстояние между отражателем и резонатором и напряжение на электродах таким образом, что электронные сгущения будут входить в резонатор в момент, когда поле для них будет тормозящим. В этом случае электроны будут отдавать свою энергию электромагнитному полю резонатора.

В результате слабые электромагнитные колебания, возникшие в резонаторе под влиянием шумовой составляющей электронного потока, будут усиливаться и, достигнув определенной амплитуды, станут незатухающими.

Интересно отметить, что в отражательном клистроне обратная связь обеспечивается самим электронным потоком, пролетающим резонатор дважды. Это объясняется тем, что поле резонатора группирует электроны в сгущения, а сгущения передают энергию источника электромагнитному полю резонатора.

Как уже отмечалось, объемный резонатор представляет собой закрытый колебательный контур и не излучает энергии в окружающее пространство. Поэтому для вывода электромагнитной энергии внутри резонатора помещается проводник в виде петли, один конец которой припаян к стенке резонатора, а другой выводится наружу и проходит внутри металлического цилиндра, припаянного к отверстию в боковой стенке резонатора (рис. 20).

При изменении магнитного поля в петле возникают вынужденные электромагнитные колебания высокой частоты и она становится

ся генератором переменного тока. Стержень, являющийся продолжением петли, вместе с цилиндром, по оси которого он проходит, образует линию, по которой передается электрическая энергия.

На рис. 21 показаны элементы конструкции отражательного клистрона.

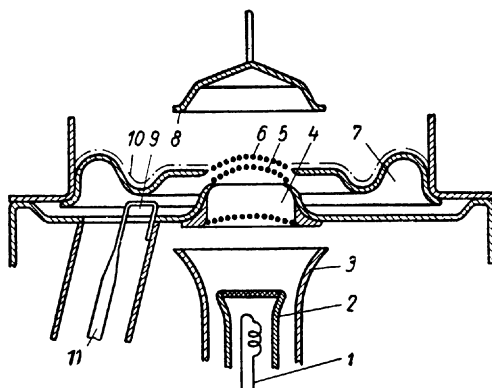


Рис. 21. Элементы конструкции отражательного клистрона:

1 — подогреватель; 2 — катод; 3 — катодный экран (фокусирующий электрод); 4 — ускоряющая сетка; 5 — первая сетка резонатора; 6 — вторая сетка резонатора; 7 — резонатор; 8 — отражатель; 9 — петля связи; 10 — гибкая часть контура; 11 — коаксиальная линия

В генераторе, описанном ниже, использован трехсантиметровый клистрон К-19 (или К-20), типовой режим которого следующий:

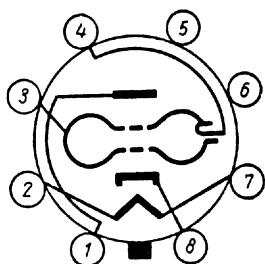


Рис. 22. Цоколевка малоомощных отражательных клистронов:

1 — отражатель; 2 и 7 — подогреватели; 3 — резонатор; 4 — вывод энергии; 5 и 6 — свободные штырьки; 8 — катод

напряжение накала . . . . .	6,3 в
напряжение на резонаторе . .	330 в
напряжение на отражателе . .	130—190 в
ток накала . . . . .	0,55 а
ток катода . . . . .	32 ма

Схема цоколевки клистрона показана на рис. 22.

Генератор СВЧ состоит из клистрона, волновода и рупорной антенны. Штырек вывода энергии клистрона через проходной изолятор вводится внутрь прямоугольного волновода, внутренние размеры которого 10 × 25 мм (стандартный трехсантиметровый волновод).

Чтобы электромагнитная волна распространялась только вдоль волновода к его открытому концу, штырек вывода энергии



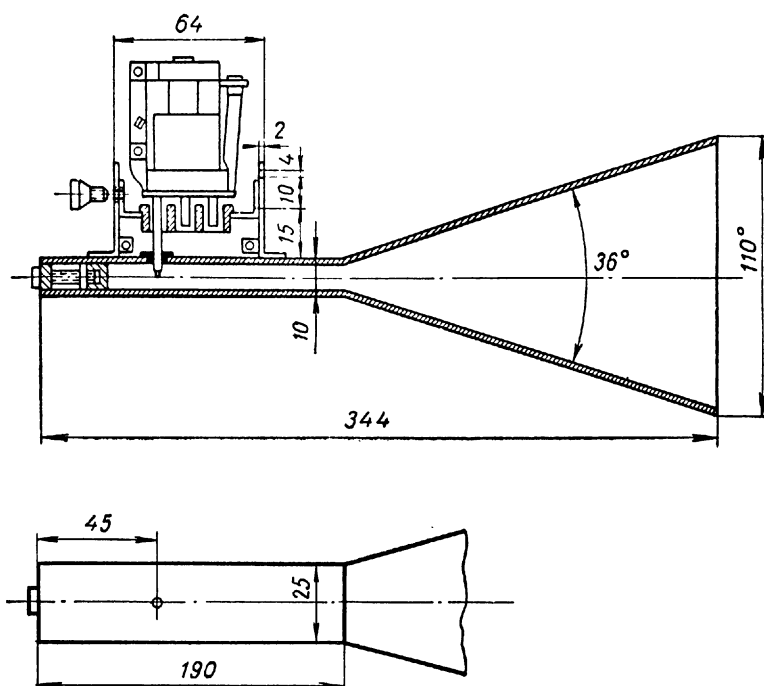


Рис. 23. Разрез генератора СВЧ

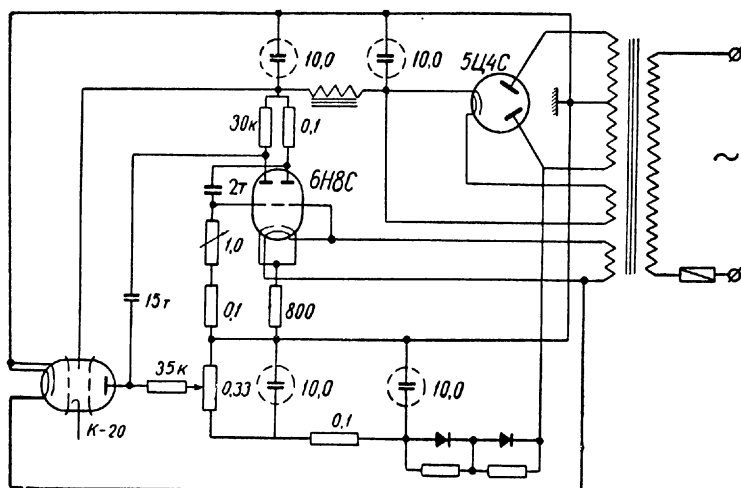


Рис. 24. Схема питания генератора СВЧ

клизотрона должен находиться примерно на расстоянии, равном нечетному числу четвертей длины волны от короткозамкнутого конца волновода. В этом случае отраженная от металлической поперечной стенки волна будет складываться в месте возбуждения с прямой волной, идущей к открытому концу волновода.

Для того чтобы можно было регулировать расстояние между возбуждающим штырьком и задней стенкой волновода, последняя сделана в виде закорачивающего поршня (рис. 23).

Меняя связь с волноводом путем изменения глубины погружения штырька, а также добываясь равнофазности отраженной и прямой волны с помощью перемещающегося поршня, можно обеспечить максимальную отдачу энергии генератора.

Размеры рупорной антенны, волновода и других деталей генератора показаны на рис. 23.

Питание генератора осуществляется от универсального выпрямителя. Принципиальная схема питания генератора показана на рис. 24. Для модуляции колебаний на лампе 6Н8С собран мультивибратор. Модулирующее напряжение подается на отражатель клистрона. Таким образом в генераторе осуществлена частотная модуляция сигналов.

## Приемники СВЧ

В комплект входит два приемника СВЧ. Простейшим приемником служит симметричный диполь, длина «уса» которого примерно равна длине волны. В разрыв диполя включен детектор Д-403 В. Непосредственно к детектору присоединен экранированный проводник, с помощью которого продетектированный сигнал подается на вход усилителя. Дипольная антенна обладает малой чувствительностью и плохой диаграммой направленности. Поэтому для опытов,

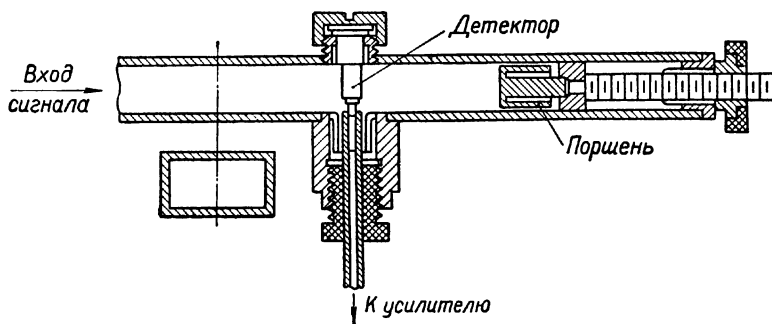


Рис. 25. Детекторная секция приемника СВЧ

в которых необходима большая чувствительность и хорошая направленность, используется рупорная антенна со стандартной волноводной детекторной секцией (рис. 25).

Волноводная детекторная секция представляет собой отрезок волновода, замкнутый накоротко с одной стороны перемещающимся поршнем. Детектор установлен в детекторной секции параллельно узкой стенке волновода (вдоль электрических силовых линий поля в волноводе), посредине широкой стенки волновода, где электрическое поле максимально.

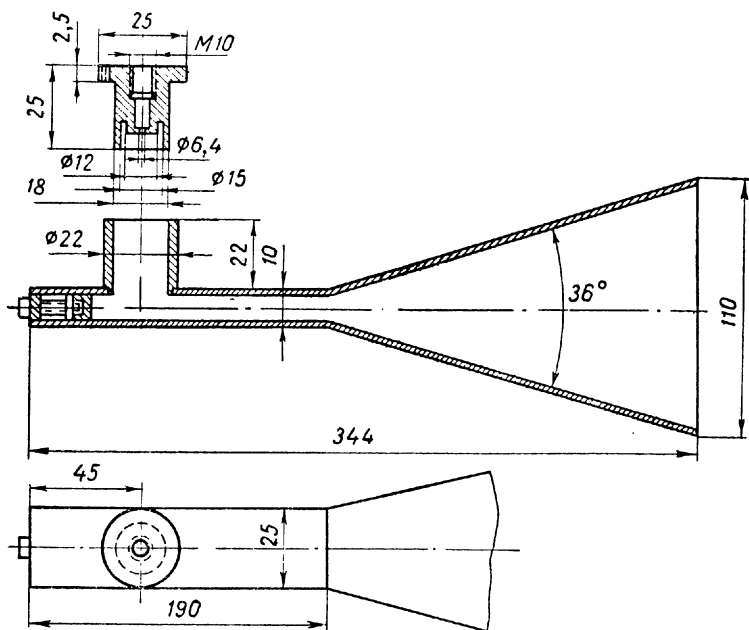


Рис. 26. Разрез приемника СВЧ

Расстояние детектора от замыкающего поршня волновода должно быть равно примерно  $\frac{\lambda}{4}(2n-1)$ . В этом случае через детектор проходит максимальный ток.

Как и дипольная антенна, рупорная антенна соединяется с усилителем. В качестве индикатора в приемниках СВЧ могут быть использованы электродинамический громкоговоритель, демонстрационный гальванометр, или осциллограф (без усилителя).

Рупорная антенна с упрощенной детекторной секцией показана на рис. 26.

## Другие детали комплекта

Для демонстрации преломления электромагнитных волн из непрозрачной пластмассы сделаны треугольная призма высотой

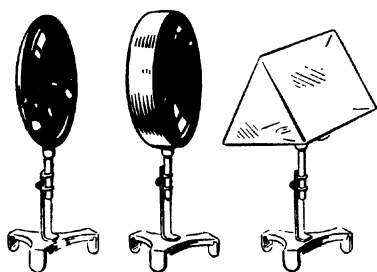


Рис. 27. Призма и линзы для электромагнитных волн сантиметрового диапазона

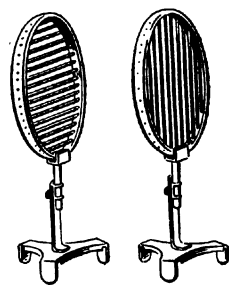


Рис. 28. Поляризационные решетки для электромагнитных волн сантиметрового диапазона

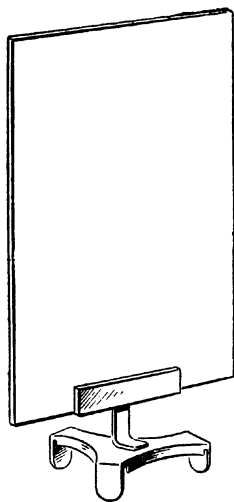


Рис. 29. Зеркала для отражения электромагнитных волн сантиметрового диапазона

150 мм и сторонами основания по 120 мм, линзы диаметром 120 мм и фокусным расстоянием примерно 80 мм и прямоугольный параллелепипед. Внешний вид призмы и линз показан на рис. 27.

Для демонстрации поляризации электромагнитных волн изготовлены две одинаковые поляризационные решетки (рис. 28) диаметром 150 мм. Каркас решетки пластмассовый. Диаметр стержней 2,5 мм, расстояние между стержнями 20 мм.

Для демонстрации отражения электромагнитных волн, интерференции и дифракции в комплекте имеются два алюминиевых плоских зеркала размером 150 × 300 мм (рис. 29) и одно точно такое же зеркало из винипласта. Кроме того, в комплект входят две пластинки размером 30 × 300 мм и специальные держатели для зеркал.

## ГЛАВА II

### ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЗАРЯДЫ. ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ.

#### § 1. УСЛОВИЯ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩИЕ УСПЕШНОЕ ПРОВЕДЕНИЕ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИХ ОПЫТОВ

Успешная постановка электростатических опытов зависит от ряда условий, которые обычно не существенны для демонстраций из других разделов физики. Это объясняется тем, что в электростатических опытах используются незначительные количества электричества и высокие разности потенциалов. Для предохранения утечки зарядов в этих условиях необходимо принимать ряд мер предосторожности.

Поэтому, прежде всего, необходимо при изготовлении электростатических приборов использовать хорошие изоляторы. Наиболее подходящим материалом для изготовления изолирующих частей электростатических приборов следует признать органическое стекло: оно прочно, долговечно, обладает исключительно высоким удельным сопротивлением и дешево.

Но хороший изолятор становится плохим, если на его поверхность оседают водяные пары, особенно при наличии на поверхности пыли. В этом случае поверхностное сопротивление изолятора уменьшается, что вызывает большую утечку электрических зарядов. В таких условиях не удаются даже простейшие опыты. Поэтому перед постановкой демонстрационных опытов по электростатике необходимо приборы просушить. Для этой цели в кабинете следует иметь специальный обогреватель (рис. 30), представляющий собой ящик размером  $30 \times 50 \times 15$  см,

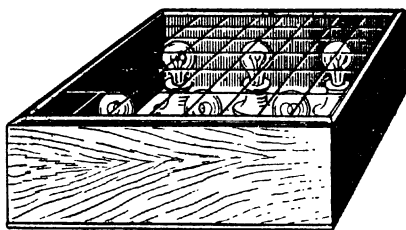


Рис. 30. Обогреватель для просушки электростатических приборов

обитый внутри асбестом или асбошифером. На дне ящика установлено 6—8 электрических лампочек мощностью 25—40 *вт.* Сверху ящика укреплена редкая сетка, на которую ставят приборы для просушки. Лампочки включают в три-четыре параллельные группы по две последовательно, вследствие чего лампочки светят вполне накала, обеспечивая достаточное количество тепла.

Если в кабинете нет специального обогревателя, можно использовать плитки, обогревательные рефлекторы и т. п.

Однако просушка приборов перед демонстрацией может оказаться недостаточной, если воздух в аудитории чрезмерно влажен (что часто бывает на последних уроках). В этом случае во время перемены необходимо тщательно проветрить кабинет, даже если на улице идет дождь, так как осенью при низкой температуре атмосферы и сравнительно высокой температуре в помещении абсолютная влажность воздуха в кабинете больше, чем на улице.

Особенно плохо удаются демонстрации в тех случаях, когда воздух в аудитории ионизирован, что может быть в результате горения газа, работы высоковольтного выпрямителя или катушки Румкорфа. В этом случае также необходимо тщательно проветрить аудиторию.

Грязная поверхность изолирующих частей электростатических приборов обладает хорошей электропроводностью, поэтому в случае сильного загрязнения изолирующих поверхностей их следует вымыть теплой водой с мылом и тщательно просушить.

Поверхность эбонитовых частей электростатических приборов под действием света изменяет свою структуру, становится зеленовато-бурого цвета и при этом значительно понижается удельное сопротивление материала. Поэтому электростатические приборы с эбонитовыми изоляторами необходимо хранить в темных отделениях шкафа, а если этого почему-либо сделать нельзя, то необходимо изготовить чехлы из темного материала или черной бумаги. Если же, несмотря на принятые меры, эбонит побуреет, то рекомендуется наждачной бумагой снять верхний слой и поверхность отполировать.

При пользовании палочками, изготовленными из диэлектрика, следует иметь в виду, что наэлектризованную палочку часто трудно полностью разрядить. Для полного разряда рекомендуется палочку быстро пронести через пламя спиртовки или газовой горелки.

В случае использования стеклянных изоляторов надо иметь в виду, что стекло гигроскопично. Для уменьшения утечки зарядов через стеклянные изоляторы полезно конец, за который берут их, смазать вазелином или же сделать на поверхности несколько вазелиновых кольцеобразных полосок.

При постановке электростатических опытов не нужно пользоваться проводами в бумажной изоляции, так как концы волокон представляют собой своеобразные острия, с которых происходит

утечка зарядов. Из тех же соображений следует оберегать металлические поверхности приборов от царапин.

Не рекомендуется пытаться получать очень большие заряды, так как при передаче их электрометру или кондуктору проскочившая между телом и палочкой искра может исказить результат опыта.

Если соблюдать перечисленные выше предосторожности, все описанные ниже электростатические опыты получаются сразу, без предварительной подготовки.

## § 2. ЭЛЕКТРИЗАЦИЯ ТЕЛ. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ЗАРЯД

Иногда при изучении электростатики не уделяется должного внимания логической последовательности демонстраций, что не способствует формированию правильных представлений об электрическом заряде.

Все электростатические явления необходимо изучать в строгой, логически выдержанной системе, при которой основные теоретические положения подтверждаются экспериментом.

Можно предложить следующий порядок демонстрации основных явлений:

- 1) электризация тел, притяжение наэлектризованным телом неэлектризованных тел;
- 2) проводники и непроводники электричества;
- 3) электроскоп;
- 4) дробление электричества;
- 5) одновременная электризация обоих соприкасающихся тел;
- 6) два рода зарядов, взаимодействие зарядов.

При предлагаемом порядке изложения материала каждое новое явление опирается на предыдущие и готовит учащихся к восприятию последующих явлений. Отправным фактом является электризация тел и притяжение наэлектризованным телом других тел. Вслед за этим рассматриваются проводники и непроводники электричества, ибо без этого нельзя объяснить устройство электроскопа. Рассказав об устройстве электроскопа, можно показать факт делимости электричества и одновременную электризацию обоих соприкасающихся тел. Только после этого можно ввести понятие о двух видах зарядов и показать взаимодействие тел, наэлектризованных противоположными зарядами.

### О п ы т 1. Электризация тел

О б о р у д о в а н и е: палочки для электризации тел длиной 50—60 см, изготовленные из эбонита или органического стекла, лопаточки для электризации, диэлектрическая стрелка на острие или кусочек ваты, подвешенный на длинной тонкой нити.

При изучении явления электризации очень важно показать, что электризуются все тела. Нельзя ограничиться только демонстрацией электризации диэлектриков, необходимо показать и электризацию проводников. Точно так же нельзя ограничиться показом электризации твердых тел, а надо показать и электризацию жидкостей.

Электризация диэлектриков может быть убедительно показана с помощью, например, стеклянной, эбонитовой, сургучной палочек длиной 40—60 см<sup>1</sup>, которых необходимо несколько раз коснуться мехом, кожей, бумагой или шелком. Лучше всего опыт получается при прикосновении мехом к палочке из органического стекла. Необходимо обратить внимание учащихся на то, что причиной электризации служит прикосновение. После того как это будет достаточно убедительно показано на опыте, можно заменить прикосновение трением, рассматривая последнее как многократное соприкосновение.

В первых опытах по электризации тел в качестве индикатора лучше всего использовать диэлектрическую стрелку (например, из дерева), установленную на игле с помощью агатового подшипника, или кусочек ваты, подвешенный на длинной тонкой нити.

Электризацию металлов проще всего показать следующим образом: металлическую лопаточку потереть о лопаточку, сделанную из органического стекла. Если после этого лопаточки поднести к стрелке или к клочку ваты, то заметно их притяжение.

Демонстрацию электризации жидкости следует показать позже, при изучении одновременной электризации обоих соприкасающихся тел.

Первые опыты по электризации тел должны убедить учащихся в том, что все вещества могут быть наэлектризованы.

## **Опыт 2. Притяжение наэлектризованным телом ненаэлектризованных тел**

**Оборудование:** палочка для электризации, кусок водопроводной трубы, штатив, сосуд с отверстием у дна, подставка, черный экран, прибор для получения двуокиси азота.

Единственным отличительным признаком, по которому учащиеся могут судить об электризации того или иного тела, является притяжение последним других тел. Обычно и в учебниках и в методических руководствах неверно акцентируется внимание учащихся на том, что якобы наэлектризованное тело притягивает только легкие тела. Наэлектризованное тело притягивает все тела, и легкие и тяжелые, но мы обычно замечаем только притяжение легких тел

---

<sup>1</sup> При меньшей длине палочек опыт получается менее выразительным.



Поэтому важно на опыте показать притяжение тяжелых тел. Для этого в центре тяжести отрезка водопроводной трубы диаметром 20—30 мм и длиной 2—3 м сверлится отверстие диаметром 5—6 мм (рис. 31). Труба одевается на острие, укрепленное в изолирующем штативе. Поднося параллельно трубе наэлектризованную

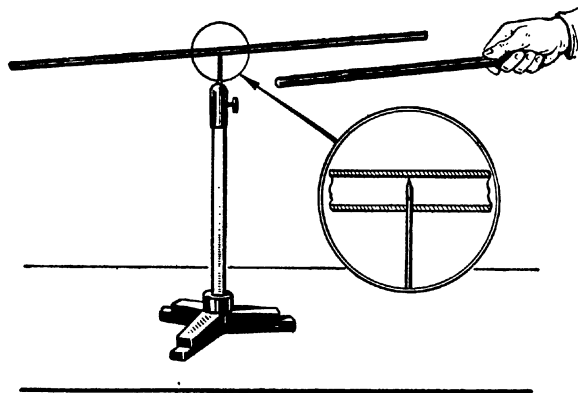


Рис. 31. Притяжение наэлектризованной палочкой тяжелого отрезка стальной трубы

палочку, можно заставить трубу вращаться в том или ином направлении.

Перед демонстрацией необходимо обратить внимание учащихся на сравнительно большой вес трубы (3—4 кг). Для объяснения опыта привлекают знания учащихся о втором законе Ньютона и объясняют, что при малых силах трения небольшая сила электростатического притяжения сообщает телу ускорение

$$a = \frac{F}{m}.$$

В результате этого труба приобретает скорость

$$v = at,$$

где  $t$  — время взаимодействия трубы и наэлектризованной палочки.

Для демонстрации притяжения наэлектризованным телом жидкости в сосуд с узким отверстием у дна наливается вода, забеленная мелом или молоком. В отверстие должна быть вставлена трубочка с краном. Против отверстия устанавливается противень или большая кювета. Открывается кран, и на черном фоне доски (или

экрана) отчетливо видна струя вытекающей жидкости (рис. 32).  
Сверху к струе подносится наэлектризованная палочка: струя резко изгибается вверх и разбрызгивается.

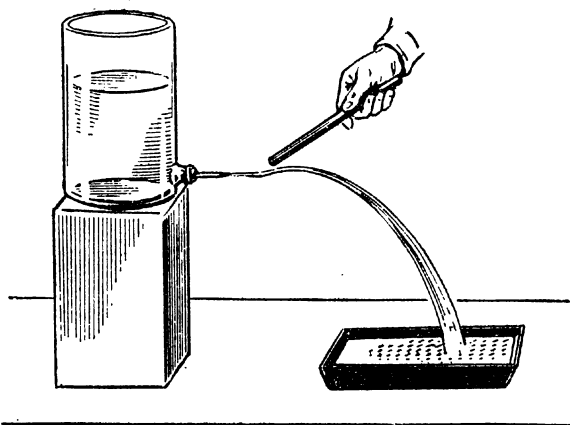


Рис. 32. Притяжение наэлектризованным телом струи жидкости

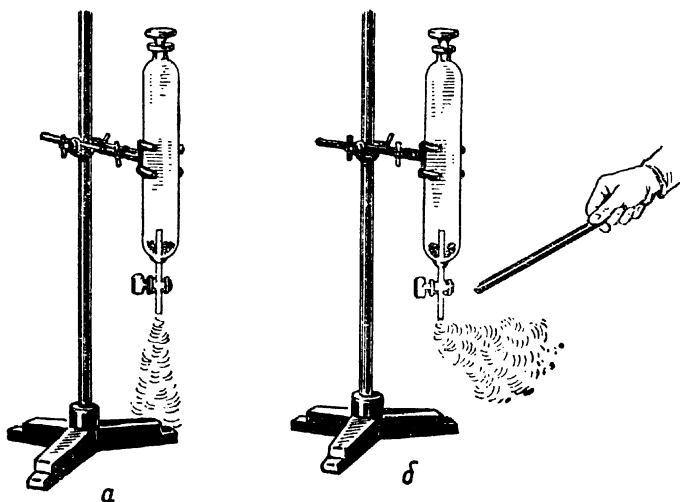


Рис. 33. Притяжение наэлектризованным телом газов:  
а — 1-я стадия опыта; б — 2-я стадия опыта.

Для демонстрации притяжения газов в специальный сосуд (рис. 33, а) насыпаются медные опилки и заливаются азотной кислотой. В результате реакции между медью и кислотой выделяется двуокись азота  $\text{NO}_2$ , имеющая ярко-бурый, хорошо заметный на белом фоне цвет. Открыв кран, наблюдают вытекание двуокиси азота из сосуда. Поднося к струе газа наэлектризованную палочку, замечают притяжение к ней газа (рис. 33, б).

При постановке данной демонстрации следует иметь в виду, что вдыхание значительных количеств двуокиси азота вредно, поэтому опыт следует проводить быстро и в конце урока. В перемену необходимо хорошо проветрить аудиторию.

### Опыт 3. Проводники и изоляторы

**Оборудование:** изолирующие штативы (два), шаровые кондукторы, диэлектрическая стрелка на подставке, кусок проволоки, капроновая (или шелковая) нить, диполь из комплекта приборов Зворыкина, неоновая лампочка.

В изолирующие штативы вставляют шары из комплекта, прилагаемого к электрометрам, и устанавливают штативы по концам демонстрационного стола. Против одного из шаров помещают легкую алюминиевую (или деревянную) стрелку.

Соединив шары проволокой, электризуют с помощью палочки шар, около которого нет стрелки. Замечают, что стрелка около второго шара повернулась. Делают вывод, что электричество перешло от одного шара к другому по проволоке.

Заменив проволоку шелковой или капроновой нитью, демонстрируют, что в этом случае стрелка около второго шара остается в покое. Следовательно, по капроновой (шелковой) нити электричество не может передаваться.

Полезно несколько видоизменить опыт: посередине проволоки включается неоновая лампочка типа МН-5.

Для того чтобы не делать специального проводника, можно использовать диполь из комплекта приборов Б. С. Зворыкина, в патрон которого ввертывается неоновая лампочка МН-5. При электризации первого шара лампочка ярко вспыхивает. Делается вывод о том, что прохождение электричества через разреженный газ сопровождается свечением газа.

### Опыт 4. Взаимодействие наэлектризованных тел

**Оборудование:** изолирующий штатив, электрический султан, две станиолевые гильзы на длинных нитях, палочка для электризации, сукно или мех.

С методической точки зрения целесообразно разделить во времени изучение взаимодействия одноименно заряженных тел от

взаимодействия разноименно заряженных тел. Это вызвано тем, что для изучения взаимодействия разноименно наэлектризованных тел учащиеся должны владеть понятием заряда и знать о существовании двух видов зарядов. Для изучения же взаимодействия одноименно наэлектризованных тел достаточно знать лишь явление электризации.

Для демонстрации явления взаимного отталкивания одноименно заряженных тел берут электрический султан и электризуют его при помощи палочки. При этом листочки султана расходятся во все стороны. Затем целесообразно повторить опыт с бумажными (или станиолевыми) гильзами. На основании опытов делается вывод о том, что наэлектризованные тела взаимно отталкиваются.

### О п ы т 5. Объяснение устройства и принципа действия электроскопа

О б о р у д о в а н и е: электроскоп, палочка для электризации, мех или сукно, экран к электроскопу.

После того как изучено взаимодействие наэлектризованных тел, следует рассказать учащимся об электроскопе и показать электро-

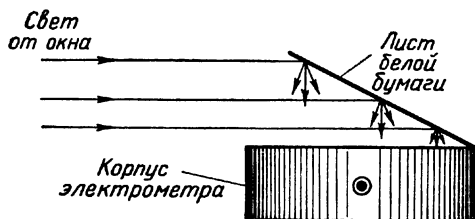


Рис. 34. Приспособление к электроскопу для увеличения освещенности его шкалы

скоп с листочками и стрелочный. При объяснении устройства электроскопа надо рассказать учащимся, что первый электроскоп был построен петербургским физиком Георгом Рихманом. Рассказ необходимо сопроводить демонстрацией диэлектрива.

Для того чтобы учащимся лучше была видна стрелка электроскопа, полезно сзади него прикрепить белый бумажный экран, который во время демонстрации отгибается на угол в  $40\text{--}60^\circ$  к стеклу так, чтобы свет из окна (или осветителя) падал на бумагу и отражался на заднем стекле прибора (рис. 34).

## Опыт 6. Делимость электричества

**Оборудование:** два электрометра, разрядник, палочка для электризации, мех или сукно.

Обычно понятие о заряде вводится догматически, как нечто само собой разумеющееся. Однако такое введение важнейшего понятия физики приводит к ряду неверных представлений у учащихся. Чтобы избежать этого, необходимо показать делимость электричества, что дает возможность ввести первоначальные представления о дискретности электричества и в какой-то мере обоснует введение термина «заряд».

Лучше всего это можно сделать следующим образом: из двух стоящих на столе одинаковых электрометров один электризуется. Соединяя наэлектризованный электрометр с ненаэлектризованным при помощи разрядника, замечаем, что показания стрелки наэлектризованного электрометра уменьшились на несколько делений, а показания стрелки второго электрометра увеличились на такое же число делений. Убрав соединительный проводник, разряжают один из электрометров и вновь повторяют опыт. Проведя опыт 2—3 раза, делают вывод о том, что электричество делимо. Для количественной характеристики вводится понятие заряда. О величине заряда можно судить по отклонению стрелки электрометра.

## Опыт 7. Распределение зарядов на проводнике

**Оборудование:** демонстрационный электроскоп, шаровой кондуктор, электрофорная машина или высоковольтный выпрямитель, цилиндр Фарадея, проекционная модель демонстрационного электроскопа.

Из факта отталкивания одноименных электрических зарядов непосредственно вытекает, что при электризации проводника заряды должны находиться на его поверхности, однако это явление важно показать на опыте.

На изолирующий штатив устанавливается металлический стержень, к которому в два «этажа» прикреплены бумажные полоски. Присоединив стержень к высоковольтному выпрямителю или электрофорной машине, наблюдают отклонение листочков при электризации стержня.

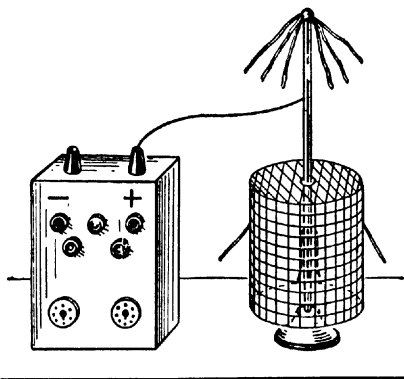


Рис. 35. Опыт с цилиндром Фарадея

Взяв демонстрационный цилиндр Фарадея за изолирующую ручку, одевают его на стержень (рис. 35). Вновь электризуют стержень и замечают, что листочки, находящиеся внутри цилиндра, не расходятся, а листочки на боковой поверхности цилиндра и на внешней части стержня расходятся.

Из опыта непосредственно видно, что электрические заряды располагаются на поверхности проводника. Опыт полезно видоизменить. На демонстрационный электроскоп одевается полый шар из набора и затем электроскоп сильно электризуют. При помощи пробного шарика и другого электроскопа убеждаются в том, что на поверхности шара есть электрические заряды, а внутри — нет.

### **Опыт 8. Полная передача заряда проводником**

**Оборудование:** два демонстрационных электрометра, два шаровых кондуктора, пробный шарик, высоковольтный выпрямитель или электрофорная машина.

Так как электрические заряды находятся только на поверхности проводника и отсутствуют внутри него, вытекает важный для эксперимента способ полной передачи электрического заряда одного проводника другому.

Для демонстрации этого факта поступают следующим образом: на стержни демонстрационных электрометров одевают полые шары. Наэлектризованным пробным шариком касаются внешней поверхности шара, находящегося на одном электрометре, и наблюдают отклонение его стрелки. Затем, не электризуя вновь шарика, то же самое делают с другим электрометром. Стрелка второго электрометра также отклоняется. Из опыта делается вывод, что при прикосновении к наружной поверхности шара заряд с пробного шарика полностью не передался.

Разрядив электрометры, вновь электризуют пробный шарик и помещают внутрь одного из электрометров и замечают отклонение стрелки, затем вынимают пробный шарик, опускают его внутрь полого шара, стоящего на втором электрометре, и убеждаются, что на шарике зарядов не осталось.

### **Опыт 9. Два рода электрических зарядов**

**Оборудование:** два демонстрационных электрометра, два изолирующих штатива, две иглы, две палочки из органического стекла, две эбонитовые палочки.

Наэлектризованную палочку из органического стекла устанавливают на игле, вставленной в изолирующие штативы, и подносят к ней вторую наэлектризованную палочку из органического стекла. Замечают взаимное отталкивание палочек, на основании чего

делается вывод, что палочка, установленная на острие, наэлектризована.

Аналогичный опыт делается с эбонитовой палочкой. Также делается вывод о том, что эбонитовая палочка наэлектризована.

Затем, установив наэлектризованные палочки из органического стекла и эбонита на иглах, вставленных в штативы, перемещают их навстречу друг другу и замечают взаимное притяжение. Результаты наблюдений позволяют сделать предположение о том, что электрические заряды этих палочек различны.

Далее снимают эбонитовую палочку с острия и электризуют с помощью ее один из электроскопов, а от стеклянной электризуют второй электроскоп (электроскопы по возможности необходимо электризовать в одинаковой степени). Соединяя электроскопы разрядником, наблюдают нейтрализацию зарядов (не уничтожение!).

Факт нейтрализации зарядов дает основание для того, чтобы говорить о зарядах с противоположными свойствами и приписать одним из них знак плюс, другим — минус.

### О п ы т 10. Одновременная электризация двух соприкасающихся тел

**О б о р у д о в а н и е:** два демонстрационных электрометра, комплект пластинок для электризации, разрядник, два полых шаровых кондуктора.

При соприкосновении двух тел на одном появляется положительный, а на другом — равный ему отрицательный электрический заряд.

Для демонстрации этого явления берут две пластинки на изолирующих ручках и, потеряв их друг о друга, вносят в полые шары, одетые на электроскопы. При этом стрелки электроскопов отходят на одинаковые углы, что указывает на одинаковую величину зарядов на обеих пластинках. Соединяя электроскопы при помощи разрядника, наблюдают нейтрализацию зарядов, что указывает и на их разноименность и на равенство.

Из набора пластинок, выпускаемого промышленностью, можно составить три пары пластин и проделать опыты с каждой из них, что придаст демонстрации более доказательный характер.

При этом демонстрацию можно несколько видоизменить. Потерев пластинки друг о друга, их вносят внутрь одного шара одновременно и наблюдают отсутствие заряда. Затем вынимают пластины и вносят в шары, установленные на разных электрометрах, и убеждаются в наличии зарядов. Тот факт, что в первой ста-

дии опыта присутствие зарядов не было обнаружено, говорит о том, что заряды имеют противоположный знак и равны по величине.

### О п ы т 11. Явление электростатической индукции

Об о р у д о в а н и е: два цилиндрических кондуктора с листочками, шаровой кондуктор, высоковольтный выпрямитель или палочка из органического стекла.

Для демонстрации явления электростатической индукции берут два кондуктора, установленные на отдельных изолирующих подставках, и ставят так, чтобы они соприкасались своими плоскими краями (рис. 36). Подносят к одному из кондукторов наэлектризо-

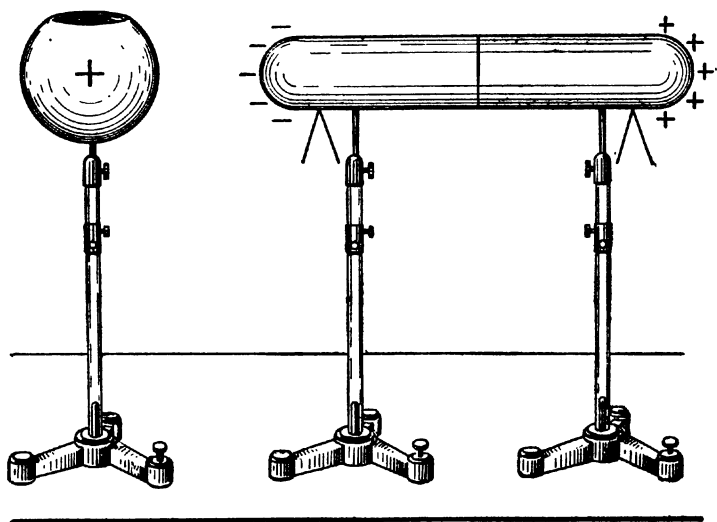


Рис. 36. Электростатическая индукция

ванный шар и, не касаясь его, замечают, что станиолевые листочки, прикрепленные к кондукторам, разошлись. Это свидетельствует о том, что кондукторы наэлектризовались. Отодвигая шар, замечают, что листочки сошлись. Следовательно, кондукторы электризуются только в присутствии наэлектризованного шара.

Вновь проделывают первую часть опыта и, не убирая наэлектризованного шара, отодвигают один из кондукторов. Затем убрав шар, убеждаются в том, что в этом случае кондукторы сохранили электрический заряд, появившийся при поднесении наэлектризованного шара. Сдвинув вновь кондукторы, убеждаются, что



заряды на кондукторах нейтрализуют друг друга. Из этого делают вывод, что заряды имели противоположный знак.

На основании опыта делается вывод о том, что электрические заряды противоположных знаков были в ненаэлектризованном проводнике в равных количествах и нейтрализовали друг друга. При поднесении наэлектризованного шара в проводнике произошло перемещение зарядов. При удалении шара заряды вновь распределились по всему проводнику. На третьей стадии опыта, раздвинув кондукторы, мы сохранили разделение зарядов в проводнике, происшедшее под влиянием наэлектризованного тела.

## Опыт 12: Пьезоэлектричество

**Оборудование:** кристалл сегнетовой соли, неоновая лампа МН-5, резиновый молоток.

Прямой пьезоэлектрический эффект можно рассматривать как один из возможных способов электризации. Разделение зарядов при деформации кристалла показывают следующим образом. Из кристалла сегнетовой соли вырезается параллелепипед, размеры которого должны быть не меньше  $1,5 \times 4 \times 4 \text{ см}^1$ .

Вырезанный таким образом кристалл зажимают широкими гранями между двумя вертикальными пластинками, укрепленными на подставке из органического стекла. Пластины соединены через клеммы с мало-мощной неоновой лампочкой (рис. 37).

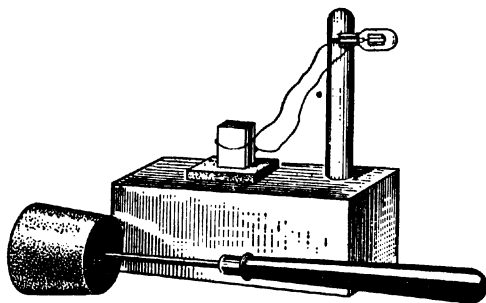


Рис. 37. Установка для демонстрации пьезоэлектричества

При ударе по верхней грани кристалла резиновым молоточком наблюдают кратковременную вспышку неоновой лампочки. Это свидетельствует о появлении на противоположных гранях кристалла электрических зарядов различных знаков.

## Опыт 13. Распределение зарядов на поверхности проводника

**Оборудование:** конусообразный кондуктор, высоковольтный выпрямитель, пробный шарик, демонстрационный электрометр.

<sup>1</sup> Р. В. Телеснин, Лекционные демонстрации по физике, ГИТТЛ, 1952.

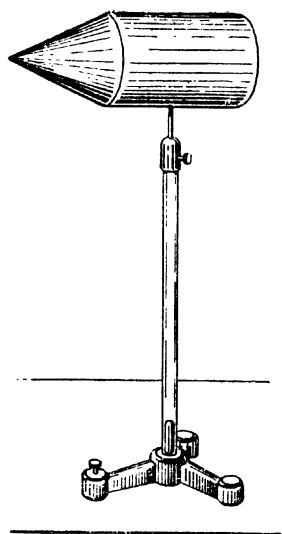


Рис. 38. Кондуктор для демонстрации распределения зарядов на поверхности проводника

Для демонстрации различной плотности электрических зарядов на поверхности проводника сложной формы берут цилиндрический проводник с конусообразной выступающей и внутренней торцевыми частями (рис. 38). Наэлектризовав проводник, прикасаются к различным точкам поверхности пробным шариком, перенося каждый раз заряд на электромметр.

Касаясь шариком внутренней конической поверхности и затем электроскопа, замечают, что стрелка последнего не отклоняется, что свидетельствует об отсутствии электрических зарядов на внутренней поверхности. При переносе зарядов с цилиндрической части отмечают отклонение стрелки каждый раз примерно на одинаковый угол, что свидетельствует о примерно одинаковой плотности электричества на этой части проводника. Переноса заряды с выступающей конической поверхности, замечают, что по мере приближения к вершине конической поверхности стрелка электрометра отклоняется каждый раз на больший угол. Это свидетельствует об увеличении поверхностной плотности электричества выступающей конической части проводника.

#### О п ы т 14. Заряды на остриях. Электрический ветер

**Оборудование:** шаровой кондуктор, острое, высоковольтный выпрямитель или электрофорная машина, свеча, два демонстрационных электрометра, колесо Франклина.

Если проводник имеет острые выступающие части, то плотность электрических зарядов на них может стать столь большой, что молекулы воздуха, находящиеся вблизи острия, начнут ионизироваться<sup>1</sup>, приобретая заряд, одноименный с зарядом острия.

В результате этого возникает поток ионов, направленный от острия. Подобный поток можно наблюдать, вставив в полый шаровой проводник острое, перед которым поставлена зажженная свеча, и соединив проводник, установленный на изолирующем штативе, с электрофорной машиной или высоковольтным выпрямителем.

<sup>1</sup> Н.А. Капцов, Электрические явления в газах и вакууме, Гостехиздат, 1947, стр. 615—619.

При включении выпрямителя пламя свечи отклоняется и свеча может погаснуть.

Чтобы показать, что от острия движется поток ионов, перед острием помещают шаровой проводник, одетый на второй электрометр. При вращении дисков электрофорной машины (или при включении высоковольтного выпрямителя) поток ионов заряжает второй электрометр. Соединив оба шара разрядником, по отклонению стрелок электрометров убеждаются в том, что заряды их одинаковы по знаку.

Отталкивание ионов от острия показывают с помощью «колеса Франклина» (рис. 39), которое электризуя заставляют вращаться. Этот опыт свидетельствует о том, что поток ионов, отталкиваемых от острия, заставляет колесо вращаться в противоположную сторону.

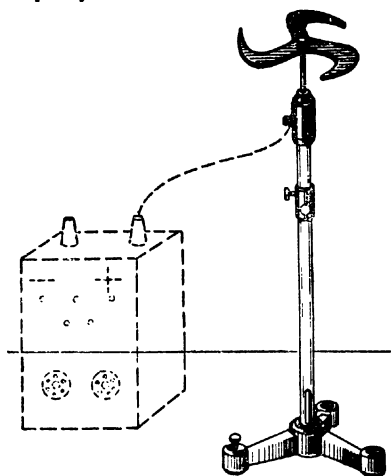


Рис. 39. Демонстрация отталкивания ионов от острия с помощью колеса Франклина

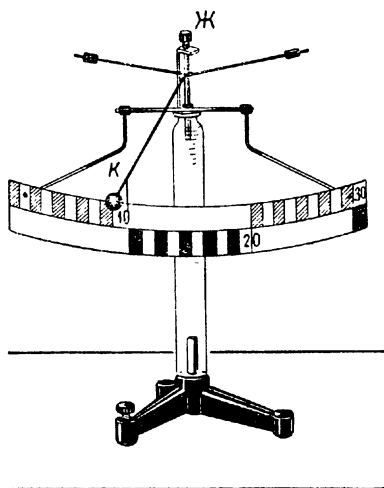


Рис. 40. Электростатический маятник

### § 3. ЗАКОН КУЛОНА

Закон Кулона является фундаментальным законом и лежит в основе всего учения об электрических явлениях, и ему в средней школе должно быть уделено большое внимание. Особенно важное значение имеет опытная проверка закона.

Предлагались различные установки для демонстрационной проверки закона. Недостатком большинства подобных установок была их относительная сложность и малая наглядность.

Справедливость закона Кулона просто может быть показана с помощью электростатического маятника (рис. 40). Маятник пред-

ставляет собой уравновешенную диэлектрическую стрелку, имеющую возможность вращаться вокруг вертикальной оси. На одном конце стрелки укреплен очень легкий полый пластмассовый снаружи обмедненный шарик диаметром 15 мм, а на другом — противовес. Посредством двух спиральных пружин маятник установлен в безразличном равновесии. Положение маятника определяется по шкале.

Арретир позволяет стрелку установить на нулевое деление. Для того чтобы можно было подключать шарик маятника к источнику высокого напряжения, ось маятника соединена электрически с клеммой Ж и зажимом К. Стойка прибора изготовлена из органического стекла. Основание маятника снабжено уравнильным винтом.

### О п ы т 15. Проверка закона Кулона

О б о р у д о в а н и е: электростатический маятник, два шарика на изолирующей ручке, высоковольтный выпрямитель, линейка.

Установка для проверки закона Кулона показана на рис. 41.

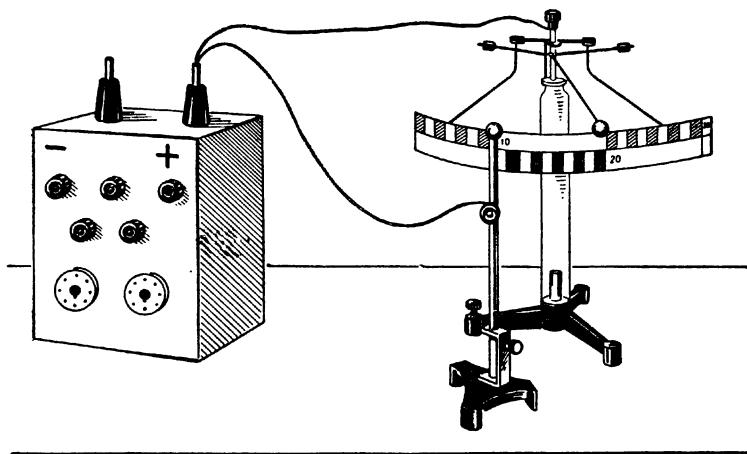


Рис. 41. Установка для опытной проверки закона Кулона

Наэлектризовав шарик маятника и шарик, укрепленный в изолирующем штативе, подвигают их настолько близко, чтобы сила взаимодействия была достаточной для отклонения стрелки на 2—3 деления шкалы. После этого касаются шарика маятника третьим шариком такого же размера (укрепленным на изолирующей руч-

kel) и, убрав последний, замечают, что сила взаимодействия уменьшилась примерно в два раза (расстояние между шариком оставляют постоянным).

Уменьшив аналогичным образом заряд шарика в 4 раза, замечают, что и сила взаимодействия уменьшилась примерно в 4 раза. Делают вывод о том, что сила взаимодействия пропорциональна величине одного из зарядов

$$F \sim Q_1.$$

Вновь электризуют оба шарика и, меняя аналогично величину заряда неподвижного шарика, убеждаются в том, что сила взаимодействия пропорциональна величине второго заряда

$$F \sim Q_2.$$

С помощью перемишки из очень тонкой проволоки соединяют шарик маятника с осью прибора. Подключив оба шарика к высоковольтному выпрямителю, что дает возможность поддерживать на них постоянные заряды, выясняют зависимость силы взаимодействия от расстояния. Для успешного проведения опыта существенно взаимное расположение маятника, неподвижного шарика, высоковольтного выпрямителя и подводящих проводников.

Установив шарики на расстоянии 5—10 см, увеличивают напряжение выпрямителя до величины, при которой шарик-маятника отклонится на максимальное число делений. При этом шарик-кондуктор непрерывно пододвигают так, чтобы расстояние между шариками было в пределах 5—10 см.

Уменьшая расстояние между шариками в 2 и 3 раза, убеждаются, что сила взаимодействия увеличивается примерно в 4 и 9 раз. Делается вывод, что сила взаимодействия обратно пропорциональна квадрату расстояния, т. е.

$$F \sim \frac{1}{R^2}.$$

Объединяя результаты наблюдений, записывают, что

$$F \sim \frac{Q_1 \cdot Q_2}{R^2}$$

или, переходя к знаку равенства,

$$F = k \frac{Q_1 \cdot Q_2}{R^2},$$

объясняют, что величина коэффициента пропорциональности  $k$  зависит от выбора единиц для измерения зарядов, силы и расстояния. Затем сообщают, что принято заменять коэффициент  $k$  другим

постоянным коэффициентом  $\frac{1}{4\pi\epsilon_0}$ . В этом случае формула для подсчета силы взаимодействия заряженных тел примет следующий вид

$$F = \frac{Q_1 \cdot Q_2}{4\pi\epsilon_0 \cdot R^2}.$$

Появление множителя  $4\pi$  объясняют шаровой симметрией взаимодействия заряженных тел<sup>1</sup>.

#### § 4. ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ

Электрическое поле есть одна из форм существования материи — к такому выводу обязан готовить учитель своих учеников. Этот вывод должен покоиться на прочных экспериментальных основаниях.

То обстоятельство, что все электростатические явления можно формально объяснить и с точки зрения теории мгновенного действия на расстоянии, не прибегая к понятию поля, не должно отвлекать учителя.

К сожалению, следует отметить, что до сих пор в методической (а иногда и учебной) литературе встречаются утверждения о том, что в пределах электростатики законны представления о дальнем действии.

Поэтому сторонники этой точки зрения считают, что понятие поля должно вводиться только в электродинамике.

Но науку нельзя представить себе как отдельные ячейки, в одних из которых действуют одни законы, а в других — другие. Здесь, на наш взгляд, уместна аналогия. Так все калориметрические опыты можно объяснить с точки зрения теории теплорода и тем не менее мы этого не делаем.

Учитель должен рассказать ученикам, что в связи с отсутствием у человека органов, с помощью которых он мог бы обнаружить существование поля, о последнем мы судим по его проявлениям. Затем надо показать на ряде опытов проявления электрического поля. Такими проявлениями поля являются: действие поля на неподвижный заряд, на диэлектрик; электрострикционные явления; свечение разреженных газов в трубках, движущихся в электрическом поле, и др.

#### Опыт 16. Проявление электрического поля

**Оборудование:** высоковольтный выпрямитель, диэлектрическая стрелка, две палочки из органического стекла, изолирующий штатив с острием, прибор для демонстрации спек-

<sup>1</sup> Мы пользуемся рационализованной формой написания уравнений электромагнитного поля. Если учитель будет пользоваться нерационализованной формой, закон Кулона следует записать так:

$$F = \frac{Q_1 \cdot Q_2}{\epsilon_0 \cdot R^2}.$$

тров электрических полей, универсальный проекционный аппарат, лист органического стекла, безэлектродная трубка, пьезоэлемент.

Действие электрического поля на диэлектрик показывают с помощью легкой стрелки, изготовленной из диэлектрика и укрепленной на остром иглы. Установив стрелку между кондукторами высоковольтного выпрямителя, замечают, что при включении последнего стрелка ориентируется (рис. 42).

Затем, наэлектризовав палочку из органического стекла, помещают ее на острие иглы и подносят к ней вторую наэлектризованную палочку и замечают взаимодействие их.

После демонстрации этих опытов перед классом ставится вопрос о том, как передается действие наэлектризованного тела на другие тела. Делается предположение, что вокруг наэлектризованного тела «что-то есть». Вот это «что-то» и назовем электрическим полем. Не надо бояться такого рыхлого и аморфного определения поля, ибо это — самое первое определение и, естественно, самое несовершенное. Дальнейшая задача учителя будет заключаться в конкретизации этого понятия.

Чтобы конкретизировать представления учащихся о поле, надо показать несколько картин поля (спектров), полученных с помощью кристалликов гипса или гидрохинона. В кювету для демонстрации картин электрических полей (рис. 43) наливают трансформаторное

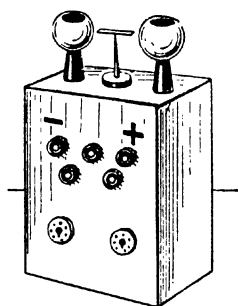


Рис. 42. Ориентация диэлектрической стрелки в электрическом поле

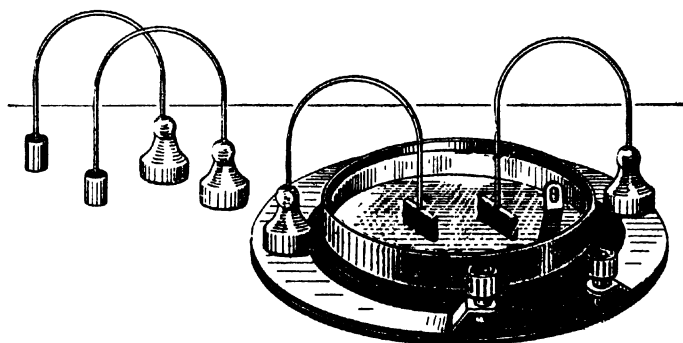


Рис. 43. Кювета для демонстрации электростатических полей с комплектом электродов

масло слоем 1—2 мм, на поверхность которого насыпают кристаллы гипса, гидрохинона или, в крайнем случае, манную крупу. Установив необходимые электроды, включают выпрямитель и проектируют картину поля на экран (рис. 44). Полезно показать несколько картин различных электрических полей.

Картины электрических полей, показанные на экране, создают геометрический образ поля, и в этом ценность описанной демонстрации.

Включив высоковольтный выпрямитель или наэлектризовав лист органического стекла, в затемненном классе перемещают вблизи них безэлек-

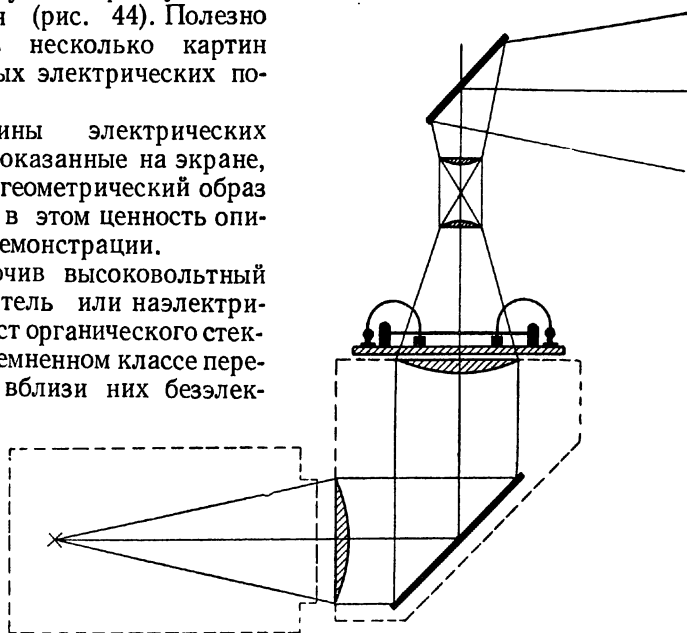


Рис. 44. Схема установки для проекции электростатических спектров на экран

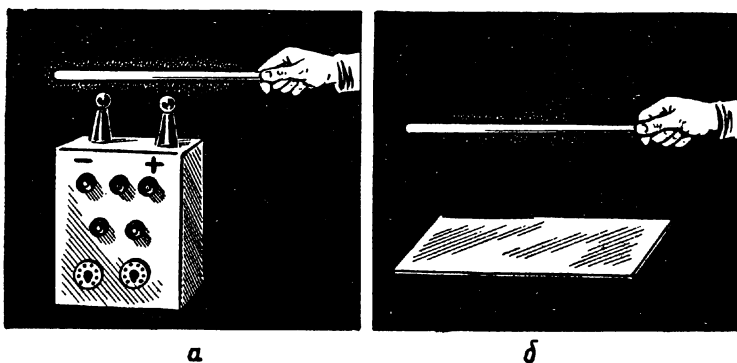


Рис. 45. Свечение газа в безэлектродной трубке при движении ее в электрическом поле:

а — высоковольтного выпрямителя; б — наэлектризованного листа органического стекла



тродную трубку с разреженным газом (рис. 45), замечая свечение газа в трубке.

Для усиления наблюдаемого явления необходимо трубку перемещать в горизонтальной плоскости. Выключив выпрямитель (или убрав наэлектризованный лист), повторяют опыт и убеждаются в том, что газ в трубке не светится. Делают вывод, что причиной свечения разреженного газа в движущейся трубке является электрическое поле.

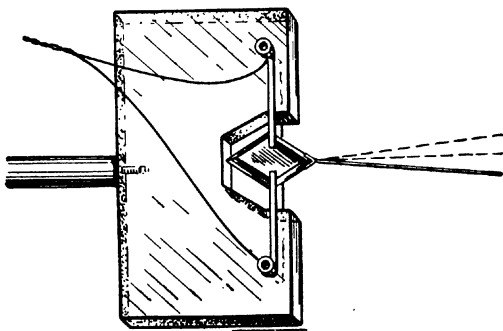


Рис. 46. Изгиб пьезоэлемента в электрическом поле

На стойке проекционного аппарата укрепляют пьезоэлемент, вынутый из громкоговорителя (или звукоснимателя), и проектируют его на экран. Подав на станиолевые обкладки напряжение, замечают изгиб пьезоэлемента. Для удобства наблюдения к пьезоэлементу надо прикрепить легкую алюминиевую стрелку (рис. 46).

Опыту дают следующее объяснение: электрическое поле вызывает изменение геометрических размеров некоторых кристаллов. Рассказывать в этом месте курса об устройстве пьезоэлемента не следует.

Проделанные опыты убеждают учащихся в том, что электрическое поле реально существует.

### **О п ы т 17. Напряженность электрического поля точечного заряда**

**О б о р у д о в а н и е:** электростатический маятник, шарик на изолирующей подставке, пробный шарик, демонстрационная линейка, высоковольтный выпрямитель.

После того как введено понятие о напряженности электрического поля, электрический маятник может быть использован как де-

монстрационный индикатор напряженности. С его помощью можно проверить справедливость формулы

$$E \sim \frac{Q}{R^2}.$$

Наэлектризовав шарик небольших размеров, помещают около него индикатор напряженности. Уменьшая заряд шарика при помощи пробного шарика, убеждаются в том, что напряженность поля пропорциональна величине заряда, т. е.

$$E \sim Q.$$

Соединив шарик электростатического маятника и шарик на изолирующей подставке с высоковольтным выпрямителем, увеличивают напряжение выпрямителя до величины, при которой на расстоянии 5—10 см шарики взаимодействуют с такой силой, что подвижный шарик отклоняется почти до упора.

Увеличивая расстояние между шариками в 2 и 4 раза, убеждаются, что сила взаимодействия уменьшается соответственно в 4 и 16 раз. Затем повторяют опыт, уменьшая расстояние в 2 и 3 раза, и замечают, что сила взаимодействия возрастает соответственно в 4 и 9 раз.

Делают вывод, что напряженность поля точечного заряда обратно пропорциональна квадрату расстояния от заряда

$$E \sim \frac{1}{R^2}.$$

Объединяя результаты наблюдений, записывают

$$E \sim \frac{Q}{R^2}.$$

#### О п ы т 18. Напряженность электрического поля между двумя длинными пластинами

О б о р у д о в а н и е: электростатический маятник, высоковольтный выпрямитель, две металлические пластины с изолирующими ручками, штативы.

Собирают установку, показанную на рис. 47. Передвигая конденсатор, образованный двумя металлическими пластинами, относительно электрического маятника, замечают, что стрелка последнего не отклоняется. Следовательно, сила, с которой поле действует на шарик маятника, постоянна, а потому, следовательно, постоянна и напряженность поля.

Подняв пластины так, чтобы шарик оказался на уровне их нижнего края, повторяют опыт и убеждаются, что в этом случае шарик маятника при передвижении пластин не остается в равновесии. На основании опыта вводят первоначальные представления об однородном и неоднородном электростатических полях.

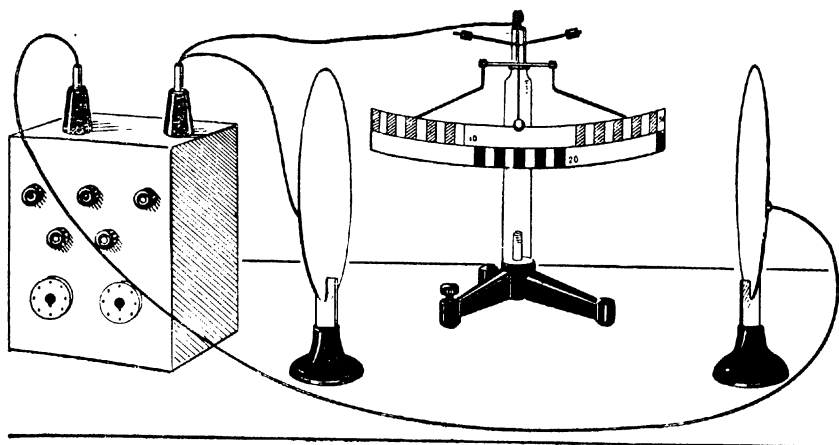


Рис. 47. Постоянство напряженности электрического поля между двумя длинными металлическими пластинами

### О п ы т 19. Экранирующее действие проводников

**Оборудование:** демонстрационный электрометр, металлический экран большого размера, шаровой кондуктор, полоска для электризации, электронно-лучевая трубка.

На стержень демонстрационного электроскопа одевают большой шар из прилагаемого к электроскопу набора. Поднося к электроскопу какое-либо наэлектризованное тело, замечают электризацию шара через влияние.

Между электроскопом и наэлектризованным телом ставят вертикально заземленный достаточно большой металлический лист. При этом стрелка электроскопа возвращается на нулевое деление, что свидетельствует об экранирующем действии проводника. Убрав экран, вновь замечают электризацию шара. Объяснив причину этого, повторяют опыт с незаземленным экраном. Экранирующего действия проводника не наблюдается. Этим подчеркивается важность заземления экранов. Экранирующее действие проводников широко используется в современной электро- и радиотехнике. В качестве иллюстрации демонстрируют экраны на радиолампах, электронно-лучевой трубке и на контурах радиоприемника.

### О п ы т 20. Поляризация диэлектрика

**Оборудование:** демонстрационный электрометр, диск к электрометру, палочка для электризации, лист органического стекла или эбонита, рычажные весы, высоковольтный выпрямитель.

На демонстрационный электроскоп одевают диск из набора, прилагаемого к электроскопу. Зарядив электроскоп, на диск кладут толстый лист диэлектрика, площадь которого в 2—3 раза больше площади диска (рис. 48).

Диэлектрик при этом поляризуется. Электрическое поле поляризационных зарядов ослабляет поле диска и угол отклонения стрелки электрометра уменьшается. После удаления диэлектрика

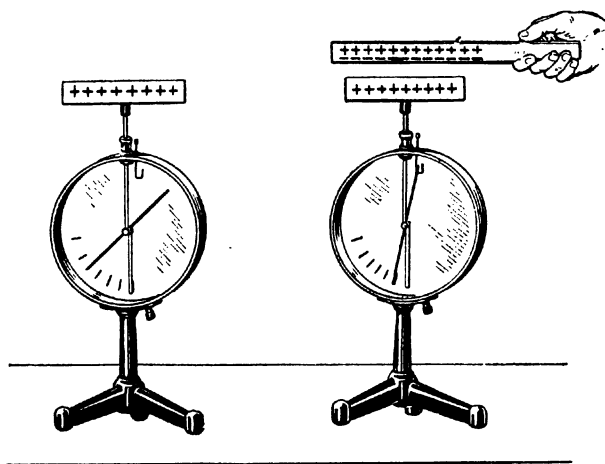


Рис. 48. Поляризация диэлектрика

стрелка электроскопа вновь отклоняется до первоначального положения.

Для успеха опыта существенное значение имеет чистота диэлектрика.

Поляризовавшийся в электрическом поле диэлектрик вытягивается в область поля с наибольшей напряженностью. Для демонстрации этого явления лист диэлектрика, часть которого находится в промежутке между пластинами демонстрационного конденсатора, уравнивается на рычажных весах. При включении высоковольтного выпрямителя равновесие весов нарушается, органическое стекло вытягивается в электрическое поле.

### Опыт 21. Энергия электростатического поля

**Оборудование:** два изолирующих штатива, простейший электростатический маятник, высоковольтный выпрямитель, обмедненный шарик от настольного тенниса, две направляющие стеклянные трубки.

1. Проволока с подвешенным к ней электростатическим маятником (рис. 49) укрепляется в изолирующем штативе. При одновременной электризации проволоки и шарика последний отходит от проволоки и поднимается по сравнению с начальным положением на высоту  $h$ .

Потенциальная энергия шарика увеличилась на величину  $mgh$ . Следовательно, какой-то вид энергии превратился в потенциальную энергию шарика. Естественно допустить, что это энергия электростатического поля.

2. Две хорошо вымытые и высушенные стеклянные трубки располагают с помощью изолирующих штативов горизонтально. У левого конца трубок устанавливают шаровой кондуктор  $A$ , соединенный с высоковольтным выпрямителем или с электрофорной машиной (рис. 50). Около кондуктора помещают легкий, сделанный из алюминиевой фольги, шарик  $B$  так, чтобы он касался шарика  $A$ . При включении высоковольтного выпрямителя оба шарика электризуются и шар  $B$  движется по направляющим трубкам от шарика  $A$ .

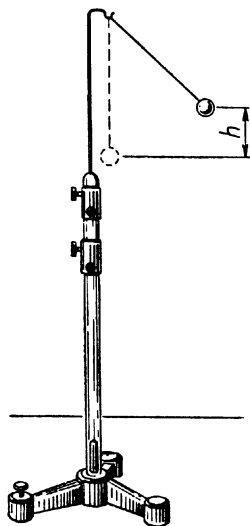


Рис. 49. Подъем наэлектризованного шарика в электрическом поле

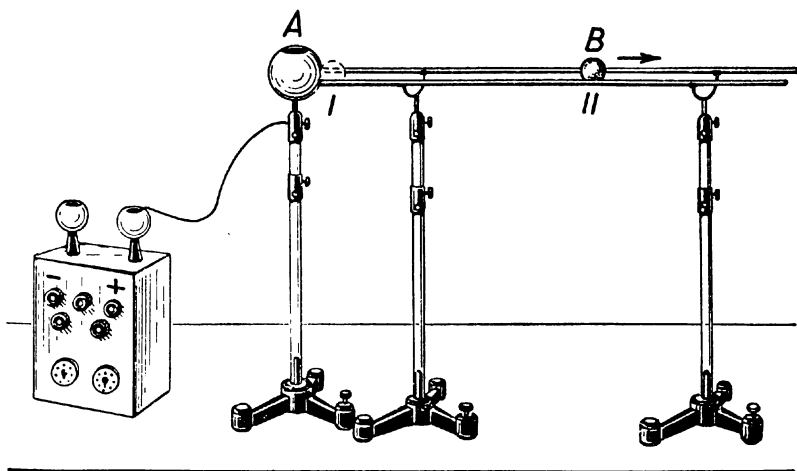


Рис. 50. Движение наэлектризованного шарика в электрическом поле

На основании опыта делается вывод о том, что электростатическое поле обладает энергией, которая в данном опыте переходит через работу против сил трения во внутреннюю энергию системы.

Как ни просты описанные опыты, но они дают возможность ввести понятие об энергии электростатического поля. Развивая идею этих опытов, вводят понятие о разности потенциалов как об энергетической характеристике поля.

Первоначальные понятия учащихся об энергии электростатического поля необходимо развивать и пополнять. В этом отношении большое значение имеет изучение вопроса об энергии заряженного конденсатора.

## О п ы т 22. Измерение разности потенциалов

О б о р у д о в а н и е: проекционный аппарат, модель электрометра для проекции, демонстрационный электрометр, электростатический вольтметр С-95 на 30 в, таблица.

После того как введено понятие разности потенциалов, необходимо разъяснить учащимся, что электрометр измеряет разность потенциалов между двумя точками электрического поля. Для этого надо показать картину электрического поля внутри электрометра. В ванну для проекции картин электрических полей помещают модель электрометра, и на экран проектируется картина электрического поля внутри электрометра (рис. 51).

Сила, с которой электрическое поле действует на элемент стрелки электрометра, будет

$$f_i = q_i E_i,$$

где  $q_i$  — заряд элемента стрелки;

$f_i$  — сила, действующая на этот элемент;

$E_i$  — напряженность поля в месте нахождения элемента объема стрелки.

Но так как  $E \sim U$ ,  
то  $f \sim U$ .

Следовательно, электрометр измеряет разность потенциалов между двумя точками электростатического поля.

Полезно показать, что если корпус электрометра изолировать от земли, а стержень соединить с землей, то при электризации корпуса электрометра стрелка его будет отклоняться, несмотря на то, что она соединена с землей.

В заключение демонстрации необходимо рассказать, что демонстрационный электрометр обладает весьма малой чувствительностью, но существуют электрометры с большей чувствительностью. Одним из таких приборов является электрометр С-95, который часто называют электростатическим вольтметром.

Пользуясь таблицей (рис. 52), рассказывают об устройстве электростатического вольтметра.

На изолирующем основании прибора укреплены две параллельные пластины 1 и 3, между которыми создается электростатическое поле. Пластины соединены с клеммами прибора. Между пластинами на тонких бронзовых ленточках подвешена легкая алюми-

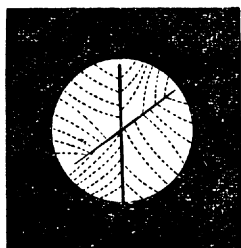


Рис. 51. Электрическое поле внутри электрометра

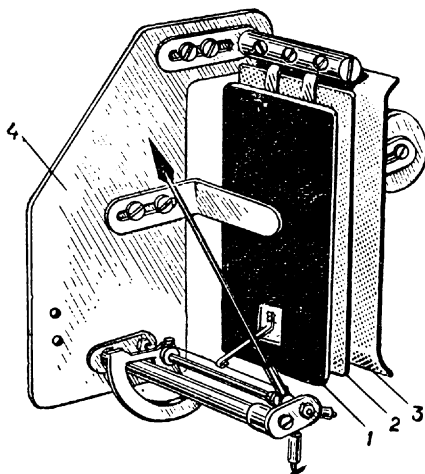


Рис. 52. Схема устройства электростатического вольтметра

ниевая пластина 2, электрически соединенная с одной из неподвижных пластин.

При электризации подвижная пластина перемещается и через бронзовую тягу 4 поворачивает ось прибора с укрепленной на ней стрелкой.

Сила тяжести пластины является противодействующей, стремящейся вернуть подвижную пластину в первоначальное отвесное положение.

В заключение измеряют с помощью электростатического вольтметра разность потенциалов разомкнутой батареи аккумуляторов.

### О п ы т 23. Потенциал заряженного проводника

Оборудование: конусообразный кондуктор, пробный шарик, электрометр, высоковольтный выпрямитель.

Наэлектризованный проводник имеет одинаковый потенциал во всех точках. Для демонстрации этого берут кондуктор с наружной и внутренней коническими торцевыми поверхностями и элект-

ризируют его с помощью высоковольтного выпрямителя. Пробный шарик соединяют длинной проволокой с электрометром. Касаясь пробным шариком какой-либо точки на поверхности проводника, наблюдают отклонение стрелки электрометра на некоторый угол.

Перемещая шарик по всей поверхности проводника (как наружной, так и внутренней), замечают, что угол отклонения стрелки остается прежним. Это свидетельствует о постоянстве потенциала проводника.

## § 5. ЭЛЕКТРОЕМКОСТЬ

В учебно-методической литературе описаны два способа определения электроемкости, которые считаются равнозначными. В одних книгах электроемкость определяется как характеристика уединенного проводника, величина которой определяется из соотношения

$$C = \frac{Q}{\varphi}.$$

В других — электроемкость определяется как характеристика системы проводников, и ее находят из соотношения

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

В первом случае изучение электроемкости связано с понятием «уединенного проводника». Такой проводник можно представить тремя способами.

1. Как проводник, бесконечно удаленный от других проводников. В этом случае одному из бесконечно удаленных проводников приходится приписывать нулевой потенциал, иначе нельзя измерить потенциал проводника, а следовательно, нельзя и измерить электроемкость. Таких «нулевых» проводников может быть сколько угодно. Следовательно, в этом случае мы имеем не один проводник, а систему проводников.

2. Можно уединить проводник, заключив его в электростатическую оболочку. Но в этом случае вновь имеется не уединенный проводник, а система проводников.

3. Можно уединенный проводник представить как единственный проводник, но в этом случае нельзя однозначно определить его потенциал.

Приведенные примеры показывают, что понятие «уединенного проводника» не имеет реального смысла. Потому не имеет смысла определять электроемкость того, что реально не существует. Электроемкость нельзя определить как свойство «уединенного проводника» еще и потому, что один и тот же проводник имеет различную электроемкость, в зависимости от того, каким диэлектриком он окружен.



Таким образом, следует констатировать, что определение электроемкости как свойства «уединенного проводника» становится неопределенным, т. е. перестает быть определением.

Электроемкость непротиворечиво и точно может быть определена как свойство системы проводников и разделяющего их диэлектрика накапливать заряды и энергию электрического поля.

## О п ы т 24. Измерение электроемкости

**О б о р у д о в а н и е:** два демонстрационных электрометра, большой шаровой кондуктор, малый шаровой кондуктор, высоковольтный выпрямитель, пробный шарик.

После того как введено понятие об электроемкости, устанавливают способ ее измерения. Для этого на стержень электрометра надевают малый полый металлический шар (рис. 53). Обращают внимание учащихся на то, что шар, стержень и стрелка электрометра являются одной обкладкой конденсатора, а корпус электрометра и земля — другой. Диэлектриком служит воздух и проходной изолятор.

Затем включают высоковольтный выпрямитель. Касаясь наэлектризованным от выпрямителя пробным шариком внутренней поверхности полого шара, передают ему последовательно заряды  $q$ . Замечают, что по мере увеличения заряда на шаре растет разность потенциалов между шаром и землей. В этом случае при зарядах  $q$ ,  $2q$ ,  $3q$ ,  $4q$  и т. д. разность потенциалов принимает значения  $U$ ,  $2U$ ,  $3U$ ,  $4U$  и т. д., возрастая пропорционально величине заряда. Но отношение величины заряда к разности потенциалов для данного конденсатора — величина постоянная

$$\frac{q}{U} = \frac{2q}{2U} = \frac{3q}{3U} = \frac{4q}{4U} = \dots = \text{Const.}$$

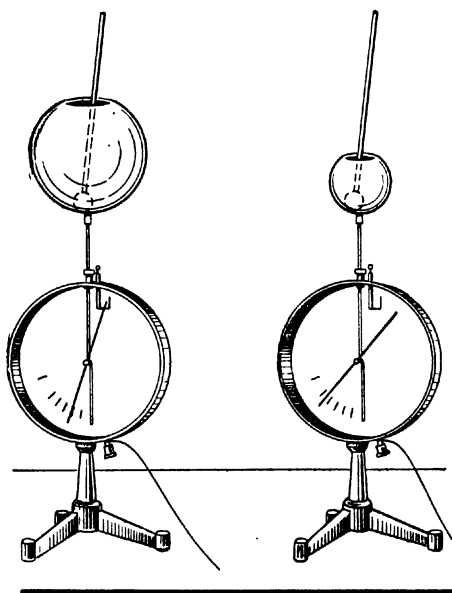


Рис. 53. Установление способа измерения электроемкости проводника

Надев большой шар, замечают, что и для нового конденсатора отношение величины заряда к разности потенциалов также величина постоянная

$$\frac{q_1}{U_1} = \frac{2q_1}{2U_1} = \frac{3q_1}{3U_1} = \dots = \text{Const.}$$

Но значение этого отношения иное, чем в первом случае.

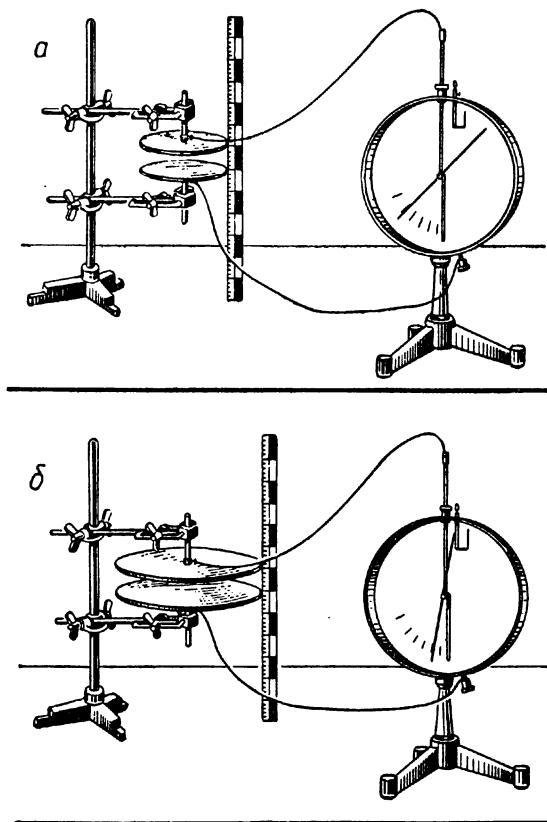


Рис. 54. Зависимость емкости конденсатора от площади пластин

Делают вывод о том, что емкость данного конденсатора может характеризоваться отношением заряда к разности потенциалов между пластинами, т. е.

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

Полученная формула позволяет установить единицу емкости.

## Опыт 25. Электроемкость плоского конденсатора

**Оборудование:** демонстрационный электрометр, две большие пластины на изолирующих ручках, две малые пластины на изолирующих ручках, демонстрационная линейка, пластинка из органического стекла.

Собирают плоский конденсатор из малых пластин. Присоединяют к пластинам электрометр (рис. 54, а). Расстояние между пластинами устанавливают 5 см.

Электризуют верхнюю пластину малым шаровым кондуктором, заряженным от высоковольтного выпрямителя. Замечают разность потенциалов между пластинами. Емкость конденсатора будет

$$C_1 = \frac{q}{U_1}.$$

Собирают плоский конденсатор, аналогичный первому, но с большими пластинами (рис. 54, б). Сообщают верхней пластине заряд  $q$  и замечают разность потенциалов между пластинами. Емкость этого конденсатора будет

$$C_2 = \frac{q}{U_2}.$$

По показаниям электрометров видно, что  $U_1 > U_2$ . Следовательно,  $C_2 > C_1$ . Из этого опыта следует, что электроемкость плоского конденсатора зависит от площади пластин: чем больше площадь пластин, тем больше электроемкость конденсатора, т. е.

$$C \sim S.$$

Приближая нижнюю пластину к верхней, замечают, что разность потенциалов между пластинами уменьшается. Следовательно, электроемкость конденсатора обратно пропорциональна расстоянию между пластинами  $d$ , т. е.

$$C \sim \frac{1}{d}.$$

Вновь электризуют верхнюю пластину конденсатора, добиваясь наибольшего отклонения стрелки электрометра. Вносят в промежуток между пластинами пластинку из органического стекла (рис. 55). Замечают, что электроемкость конденсатора увеличилась (разность потенциалов уменьшилась). Убрав пластинку, замечают, что электроемкость уменьшается (разность потенциалов увеличивается). Следовательно,

$$C \sim \epsilon.$$

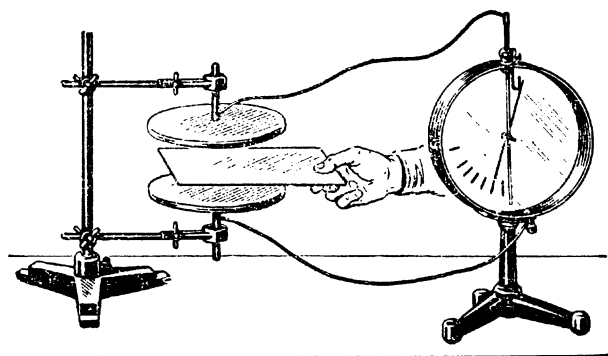


Рис. 55. Зависимость емкости конденсатора от свойств диэлектрика

Объединяя результаты измерений, можно записать, что

$$C \sim \frac{\epsilon S}{d}$$

или, переходя к знаку равенства,

$$C = k \frac{\epsilon S}{d}.$$

Значение коэффициента  $k = \frac{1}{4\pi}$  на данном этапе обучения не может быть объяснено учащимся и его приходится вводить догматически.

Если бы в школе пользовались рационализированной формой уравнений электромагнитного поля, то  $k = 1$ .

## О п ы т 26. Устройство конденсатора постоянной емкости

Оборудование: препарированный бумажный конденсатор большой емкости, подъемный столик, электролитический конденсатор, учебная таблица, комплекты раздаточного материала.

Предварительно препарированный бумажный конденсатор ставят на подъемный столик. В процессе объяснений учитель демонстрирует отдельные элементы конденсатора (обкладки, диэлектрик, корпус и проходные изоляторы). Для того чтобы все учащиеся могли хорошо видеть детали конденсатора, последний должен иметь большие размеры.

Устройство электролитического конденсатора демонстрируют аналогичным образом. В конце объяснения необходимо показать,

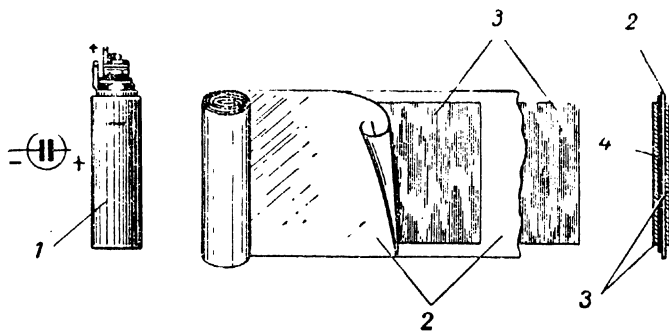


Рис. 56. Устройство электролитического конденсатора:

1 — электролитический конденсатор; 2 — бумага, пропитанная электролитом;  
3 — алюминиевая фольга; 4 — окислы

что в случае неправильного включения электролитический конденсатор не удерживает заряд. Так как слой окиси на алюминиевой обкладке не заметен, то в процессе объяснения используется учебная таблица (рис. 56).

Для конкретизации представлений учащихся об устройстве различных конденсаторов на столы раздают наборы конденсаторов.

Устройство керамических и пленочных конденсаторов показывается на классной доске, на которой рисуют соответствующие схемы.

### О п ы т 27. Устройство конденсатора переменной емкости

**О б о р у д о в а н и е:** демонстрационный электромметр, демонстрационный конденсатор переменной емкости, высоковольтный выпрямитель, соединительные проводники, подъемный столик.

Демонстрационный конденсатор переменной емкости устанавливают на подъемном столике или подставке и соединяют с электромметром (рис. 57, а).

Объяснив устройство конденсатора, электризуют (лучше при втянутом роторе) пластины, соединенные со стержнем электромметра. Замечают разность потенциалов между пластинами конденсатора. Выдвигая подвижные пластины, наблюдают за изменением разности потенциалов, что свидетельствует об изменении емкости конденсатора (рис. 57, б).

### О п ы т 28. Параллельное соединение конденсаторов

**О б о р у д о в а н и е:** стойка с высоковольтными конденсаторами, высоковольтный выпрямитель, демонстрационный электромметр.

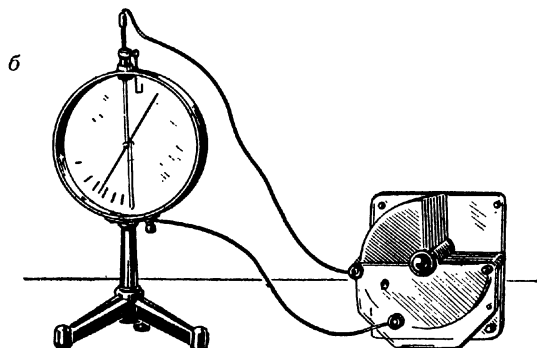
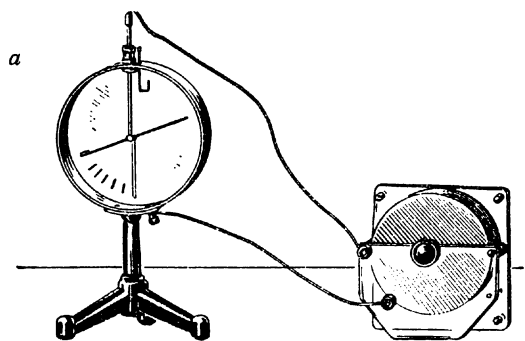


Рис. 57. Демонстрационный конденсатор переменной емкости:

*a* — первая стадия опыта; *б* — вторая стадия опыта

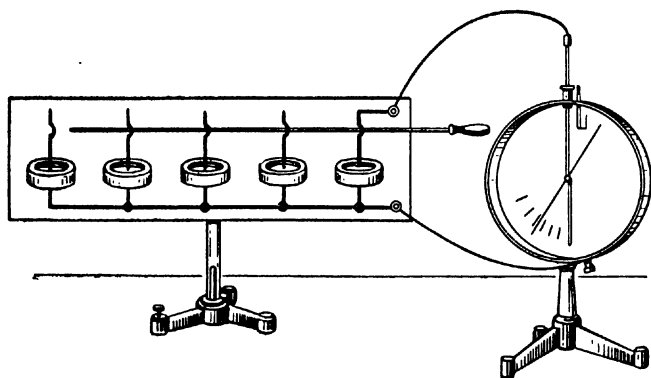


Рис. 58. Параллельное соединение конденсаторов

Из-за малой чувствительности школьного электрометра формула для подсчета электроемкости батареи параллельно включенных конденсаторов

$$C_{\text{пр}} = C_1 + C_2 + C_3 + \dots + C_n$$

не может быть установлена экспериментально и ее вывод должен быть дан теоретически, а справедливость полученной формулы проиллюстрирована опытом.

Для этого стойку с высоковольтными конденсаторами ( $U = 20 \text{ кВ}$ ;  $C = 500 \text{ пкф}$ ) соединяют с электрометром (рис. 58).

Включив один конденсатор, заряжают его от высоковольтного выпрямителя до максимального отклонения стрелки электрометра.

Передвигая стержень коммутатора, включают второй, а затем третий конденсатор. Замечают уменьшение разности потенциалов, что свидетельствует об увеличении емкости батареи. Если в батарее используются конденсаторы одинаковой емкости, то при включении второго и третьего конденсаторов разность потенциалов уменьшается соответственно в два и три раза.

После демонстрации конденсаторы необходимо разрядить.

### О п ы т 29. Последовательное соединение конденсаторов

О б о р у д о в а н и е: стойка с высоковольтными конденсаторами, демонстрационный электрометр, высоковольтный выпрямитель.

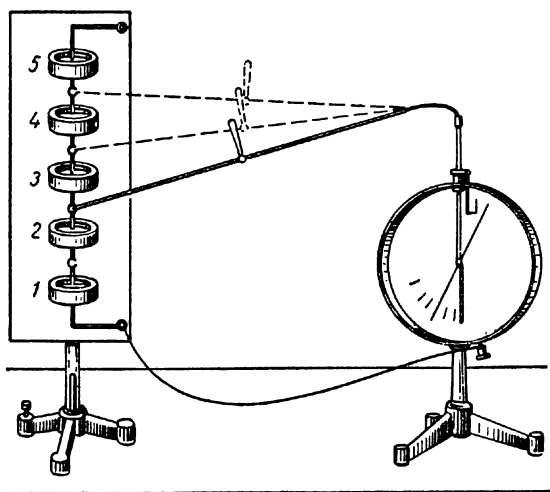


Рис. 59. Последовательное соединение конденсаторов

Этот опыт, как и предыдущий, служит для иллюстрации теоретически установленной зависимости емкости батареи последовательно соединенных конденсаторов от числа конденсаторов.

Стойку с высоковольтными конденсаторами (рис. 59) соединяют с электрометром. Включив один конденсатор, заряжают его так, чтобы стрелка электрометра установилась на одном из средних значений. Включив последовательно два, а затем и три конденсатора, наблюдают увеличение разности потенциалов, что свидетельствует об уменьшении емкости батареи конденсаторов.

Обращают внимание учащихся на то, что последовательное соединение конденсаторов применяется в том случае, если надо получить малую емкость. Оно используется и тогда, когда конденсатор должен работать в цепи с высоким напряжением. Например, конденсатор, рассчитанный на рабочее напряжение 400 в, нельзя включить в сеть с напряжением 800 в, а два одинаковых последовательно включенных конденсатора — можно.

### Опыт 30. Энергия заряженного конденсатора

**Оборудование:** батарея конденсаторов большой емкости, лампочка от карманного фонаря, источник постоянного тока низкого напряжения и источник постоянного тока высокого напряжения.

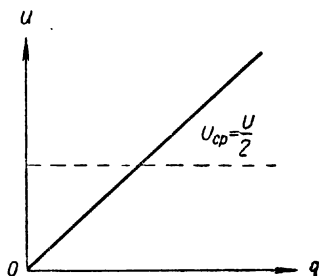


Рис. 60. Зависимость величины заряда конденсатора от напряжения

Описываемый опыт распадается на две отдельные демонстрации, цель которых: 1) показать, что заряженный конденсатор обладает энергией; 2) выяснить, от чего зависит энергия заряженного конденсатора.

Конденсатор большой емкости (например, 50 — 100 мкф) заряжают от источника постоянного тока и разряжают на лампочку от карманного фонаря. При этом лампочка ярко вспыхивает. Учащиеся разъясняют, что электрическая энергия заряженного конденсатора переходит во внутреннюю энергию нити и энергию излучения.

Полезно подсчитать энергию заряженного конденсатора, которая равна работе электрического поля по перемещению заряда  $q$  по цепи. Так как разность потенциалов в цепи меняется от величины  $U$  до нуля, то надо взять некоторое среднее значение. Из формулы  $\frac{Q}{U} = C$  видно, что разность потенциалов между пластинами прямо пропорциональна заряду (рис. 60). Следовательно, для



подсчета энергии конденсатора можно взять среднюю разность потенциалов

$$U_{\text{ср}} = \frac{U}{2}.$$

$$W_3 = A = qU_{\text{ср}}.$$

Но  $q = CU$ , поэтому  $W_3 = \frac{CU^2}{2}$ .

Для иллюстрации полученной зависимости батарею конденсаторов первоначально заряжают от источника низкого напряжения (например 20 — 30 в) и затем от источника высокого напряжения (300 — 400 в). Замыкая батарею на лампочку, убеждаются, что энергия батареи зависит от напряжения. Меняя емкость батареи, убеждаются, что энергия заряженного конденсатора зависит и от его емкости.

Формула  $W_3 = \frac{CU^2}{2}$  хотя и конкретизирует представления учащихся об энергии электрического поля, но не дает ответа на вопрос о том, где сосредоточена энергия конденсатора — в поле или в зарядах. Заменяя значение электроемкости и разности потенциалов через  $C = \frac{\epsilon S}{d}$  и  $U = Ed$ , получим формулу  $W_3 = \frac{\epsilon E^2}{2} V^1$ , где  $V$  — объем диэлектрика между пластинами конденсатора. Анализ полученной формулы говорит о том, что энергия заряженного конденсатора связана не с зарядами на его пластинах, а с электрическим полем между этими пластинами<sup>2</sup>.

<sup>1</sup> Мы пользуемся системой МКСА при рационализированной форме написания уравнений поля. Поэтому коэффициент  $4\pi$  в формуле емкости плоского конденсатора отсутствует.

<sup>2</sup> См. подробнее об этом в книге И. Е. Тамма «Основы теории электричества», Гостехиздат, М., 1954, стр. 85.

## ГЛАВА III

### ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК В МЕТАЛЛАХ. ЗАКОНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

#### § 1. ОСОБЕННОСТИ ЭКСПЕРИМЕНТА ПО ЗАКОНАМ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Хорошо известно, что без глубокого усвоения основных понятий данной темы невозможно успешное изучение всего последующего курса электричества. Здесь рассматриваются такие фундаментальные понятия, как ток, напряжение, сопротивление, э. д. с., и устанавливаются функциональные зависимости между ними. Однако неправильно думать, что трудности вызываются в основном насыщенностью темы материалом. Трудности в первую очередь объясняются тем, что сущность процессов, происходящих в электрической цепи, не может быть вскрыта непосредственным наблюдением, как, например, в механике. Демонстрационный эксперимент при изучении электрических явлений иллюстрирует и вскрывает в основном лишь действия электрического тока, т. е. внешние его проявления. Наблюдая за приборами в электрической цепи, еще ничего нельзя сказать о механизме проводимости и об энергетических преобразованиях, происходящих в ней, что вызывает основные трудности у учащихся.

Изучению тока в металлах предшествует изучение темы «Электрические заряды и электрическое поле». К сожалению, часто преподавание ведется так, что учащиеся ясно не сознают связь явлений в электрической цепи с изученными ранее электростатическими явлениями. Чтобы осуществить эту связь, в основу всего изложения должно быть положено чрезвычайно ценное и плодотворное положение о необходимости электрического поля, которое, действуя на свободные носители электрического заряда (в случае металлов—электроны), и создает электрический ток.

Однако действующее в этом случае электрическое поле существенно отличается от поля электростатического. Поэтому при изучении электрического тока в металлах недопустимо отождествление этих полей. Понятие электрического поля здесь должно быть углублено и расширено.

Не вызывает никакого сомнения и другое положение, что изложение данного раздела будет успешным лишь в том случае, если оно будет опираться на электронные представления. Некоторые сведения об этом учащиеся получают уже в восьмилетней школе. Но в старших классах электронные представления должны быть значительно расширены: необходимо создать с помощью моделей картину самого «механизма» электрического тока в металлах, конечно, не допуская при этом вульгаризации и чрезмерного упрощения.

Если в восьмилетней школе было возможно лишь качественное объяснение явлений, происходящих в электрической цепи, то на втором этапе обучения осуществимо и количественное их описание. Например, возможен вывод закона Ома для участка цепи на основе электронных представлений. Все это даст возможность избежать элементов формализма в знаниях учащихся.

Кроме того, весьма целесообразен здесь и энергетический подход. Вскрывая энергетические преобразования, происходящие в цепи постоянного тока, удастся достаточно глубоко выяснить роль источника тока в цепи, ввести понятие о сторонних силах и т. п.

Таким образом, в основе методики изучения электрического тока в металлах и законов постоянного тока лежат идеи использования понятия поля, электронных представлений и энергетического подхода к изучаемым явлениям. Чрезвычайно важно, что эти же идеи положены и в основу методики изучения последующих разделов. Поэтому целесообразно уделить больше внимания и времени рассмотрению электропроводности металлов и законам тока в цепях с металлическими проводниками. Изучение же явлений электрического тока в вакууме, газах, электролитах и полупроводниках после этого не должно вызывать затруднений.

Совершенно естественно, что демонстрационный эксперимент в данном разделе подчинен тем же методическим идеям. Нельзя не отметить распространенное, к сожалению, мнение о том, что эксперимент при изучении электрических явлений в цепях постоянного тока не сложен, что для него есть все оборудование и он не требует большой подготовки.

Действительно, если ограничиться только изучением электрических цепей, соединением проводников и не вникать в сущность процессов в цепи, то демонстрации весьма просты и основными приборами в этом случае являются хорошо известные учащимся еще из восьмилетней школы различные источники электрического тока (элементы, аккумуляторы), сопротивления, лампы накаливания, измерительные приборы (амперметр и вольтметр) и соединительные провода. Составление цепей, измерение тока и напряжения, конечно, не вызывает трудностей: учащиеся получили необходимые для этого навыки в восьмилетней школе. Идти по этому пути и дальше значит не развивать и не углублять знаний учащихся, а только укреплять навыки, уже приобретенные ими.

Если же мы поставим перед собой задачу глубокого понимания и изучения явлений, то демонстрационный эксперимент не является простым.

Недоступность непосредственного наблюдения электрических явлений приводит к тому, что здесь, наряду с обычным демонстрационным экспериментом наиболее широко применяются различные модели, а при объяснении — аналогии. Весьма полезно также использование мультипликационных учебных фильмов. Электронные представления по сути дела также являются модельными представлениями.

Эксперимент должен здесь являться не только для иллюстрации тех или иных представлений, а должен служить основой для определенных теоретических обобщений. Сочетание теории и демонстрационного эксперимента даст возможность создать стройную систему знаний.

На наш взгляд, идеалом для учителя должно быть такое изложение явлений, когда учащиеся, рассматривая соответствующие электрические цепи и наблюдая за показаниями приборов в них, видели бы не только эти показания, не только те или иные отклонения стрелок приборов, свечение ламп и т. д., а представляли бы и процессы, происходящие в цепи постоянного тока, механизм их и энергетические преобразования при этом.

Демонстрационные опыты по теме «Электрический ток в металлах. Законы постоянного тока» в основном могут быть поставлены на выпускаемом промышленностью и имеющемся в физических кабинетах школ оборудовании. Оно общеизвестно и в описании не нуждается. Но постановка ряда описанных далее принципиально важных опытов требует самодельных приборов. Это в основном модели, несложные по устройству и простые в изготовлении. Большие возможности дают и усовершенствования имеющегося оборудования. Все необходимые рекомендации будут приведены в соответствующих местах.

## **§ 2. УСЛОВИЯ СУЩЕСТВОВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА В ЦЕПИ. ЭЛЕКТРОННАЯ ПРОВОДИМОСТЬ МЕТАЛЛОВ**

Для существования постоянного тока необходимо:

наличие электрического поля;

наличие в цепи свободных носителей электрического заряда;

замкнутость электрической цепи.

В металлах носителями электрических зарядов являются свободные электроны. Они в проводниках движутся под действием электрического поля. Если цепь замкнута, то возможен постоянный электрический ток в ней.

Все это разъясняется следующими опытами.

## Опыт 31. Движение электрических зарядов

**Оборудование:** два электрометра демонстрационных стрелочных, два шаровых кондуктора к электрометрам, приемный диполь от генератора УКВ, неоновая лампа МН-5, стеклянная или эбонитовая палочки, мех или шелк, два осветителя для электрометров, соединительные провода.

Берут два кондуктора, укрепленные на электрометрах, и электризуют их. Соединив кондукторы проводником, наблюдают перемещение стрелок электрометров, пока потенциалы электрометров не сравняются. Однако движение электрических зарядов не наблюдается непосредственно, а о нем судят косвенно по изменениям потенциалов тел. Основание для этого есть, так как при разных потенциалах на заряды будут действовать силы и будет совершаться работа. Если же потенциалы на концах проводника станут равными, то на заряды в нем перестанут действовать электрические силы и они не будут перемещаться.

Известно, что электрический ток может быть обнаружен по его внешним проявлениям или действиям. В данном случае токи очень малы и кратковременны. Все же и в этих условиях вполне применима в качестве индикатора неоновая лампа. При прохождении тока неоновая лампа светится. Чтобы лучше видеть это небольшое свечение лампы, класс затемняют. Неоновая лампа должна быть рассчитана на небольшой ток. Хорошие результаты дает лампа МН-5.

Лампу надо поместить в разрыв проводника, соединяющего тела. Удобно использовать для этой цели приемный диполь от генератора УКВ, включив в него вместо лампочки накаливания неоновую лампу МН-5. Этот диполь и будет выполнять роль соединительного проводника.

Для демонстрации на столе устанавливают два электрометра на расстоянии, равном длине диполя, и одевают на их стержни большие шаровые кондукторы. Для улучшения видимости сзади электрометров помещают осветители. Применяют осветители различных конструкций. Так, например, можно сделать из толстой бумаги полые конусы, в вершине которых помещают низковольтные лампы (от карманного фонаря). Конусы основаниями прижимают к электрометрам и укрепляют в штативах. Для питания лампочек применяют аккумулятор или батареи гальванических элементов.

Проще вместо осветителей укрепить сзади электрометра лист белой бумаги (см. рис. 34).

С помощью палочек заряжают один шар, добываясь максимального отклонения стрелки электрометра. Другой шар будет незаряжен и, естественно, стрелка его электрометра находится на нулевом делении. Затем соединяют шары диполем (рис. 61).

При этом одновременно наблюдается свечение неоновой лампы, уменьшение показаний одного и увеличение показаний другого электрометра. Когда показания электрометров станут одинаковы-

ми, свечение лампы прекратится. Время наблюдения мало, и поэтому следует опыт повторить.

Повторяя опыт, заряжают теперь оба шара, но до разных потенциалов.

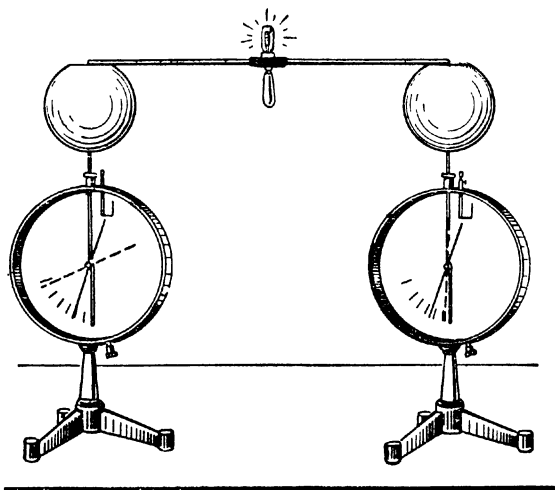


Рис. 61. Опыт с двумя электрометрами (пунктиром показано положение стрелок в начале опыта)

Показав опыт с свечением неоновой лампы, переходят к объяснению его, которое элементарно. Неоновая лампа светится при прохождении через нее электрического тока. Следовательно, и в опыте происходит движение зарядов. Движение зарядов совершается под действием сил электрического поля. Пока эти силы действуют, заряды движутся. При выравнивании потенциалов движение зарядов прекратится. Уславливаются за направление тока брать направление напряженности поля. Чтобы не было путаницы, подробно объясняют различие между направлением тока и направлением движения электронов.

Обращают внимание на то, что выравнивание потенциалов неправильно представлять как простое перетекание зарядов с одного шара на другой. В действительности, на второй шар перетекли заряды с соединительного проводника, а убыль зарядов на нем была восполнена за счет заряда на первом шаре. Подробно этот вопрос разбирается несколько позже, но не следует и здесь прибегать к неправильному объяснению. Имеет смысл также пояснить данное явление с помощью гидродинамической аналогии, сравнив его с перетеканием жидкости из одного сосуда в другой, когда уровни жидкости в них разные.

Весьма удачным является следующий вариант опыта, в котором, помимо указанных выше приборов, еще нужен электростати-

ческий вольтметр. Присоединяют к шаровым кондукторам электростатический вольтметр. При электризации шаров вольтметр показывает разность потенциалов между ними. Если соединить шары

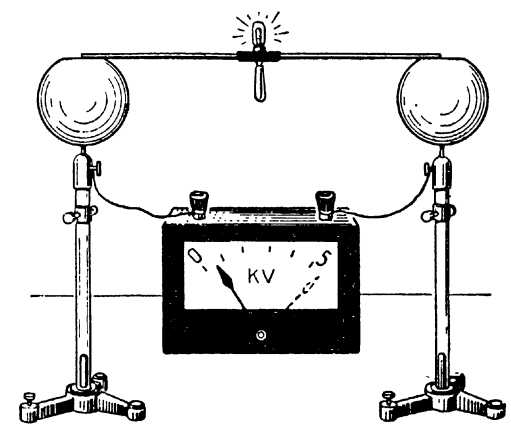


Рис. 62. Опыт с двумя шаровыми кондукторами и электростатическим вольтметром (пунктиром показано положение стрелки в начале опыта)

проводником (диполь с неоновой лампой МН-5), то вольтметр покажет исчезновение разности потенциалов и стрелка его при этом займет нулевое положение (рис. 62).

### Опыт 32. Условие, необходимое для существования постоянного тока в проводнике

**Оборудование:** универсальный выпрямитель (или электрофорная машина), электрометр или электростатический вольтметр, неоновая лампа МН-5 или другого типа, соединительные провода.

В опыте с двумя электрометрами электрический ток проходил очень непродолжительное время. Естественно возникает вопрос, как получить постоянный электрический ток. Очевидно, для этого необходимо поддерживать постоянно электрическое поле внутри проводника.

Берут универсальный выпрямитель и подключают к нему электрометр или электростатический вольтметр. Если включить выпрямитель в сеть, то электрометр или вольтметр покажет разность потенциалов на его зажимах. Записывают эти показания. Выключают выпрямитель и присоединяют к его зажимам неоновую лампу (рис. 63). Если теперь вновь включить выпрямитель, то лампа будет светиться. По показаниям электростатического вольтметра судят, что поле существует все время.

С другой стороны, все время светится неоновая лампа, т. е. все время проходит ток. Формулируют условие, необходимое для существования постоянного тока: наличие постоянного электрического поля в проводнике.

Если в физическом кабинете нет высоковольтного выпрямителя, то возможен и другой вариант опыта. Неоновую лампу в этом случае подключают к кондукторам электрофорной машины. Целесообразно здесь для улучшения наглядности оставить в каком-то месте

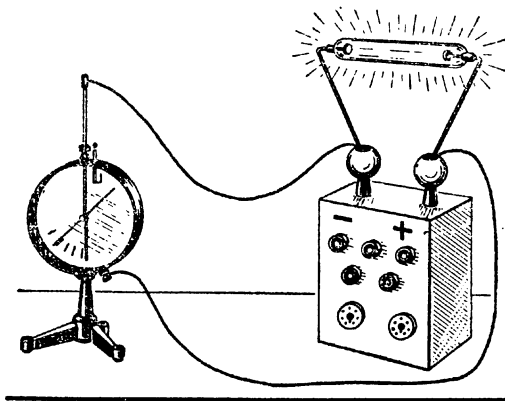


Рис. 63. Установка для демонстрации условия, необходимого для существования постоянного тока

очень небольшой искровой промежуток. Лампа при этом горит не непрерывно, а очень часто вспыхивает. Каждая вспышка лампы лучше заметна, чем постоянное свечение.

Сформулировав условие существования тока, останавливаются на том, что для создания поля в проводнике необходим в цепи источник тока, который правильнее было бы называть не источником тока, а источником поля.

### О п ы т 33. Отличие электростатического поля от электрического в проводнике при прохождении постоянного тока

**Оборудование:** универсальный выпрямитель (или электрофорная машина), два изолирующих штатива, пеньковая веревка (возможно применение толстой нитки или ленты от пишущей машинки) длиной 2—3 м, демонстрационный стрелочный электрометр, пробный шарик на изолирующей ручке, соединительные провода.

Поверхность электрически заряженного проводящего тела (когда по проводнику не проходит электрический ток) является эквипотенциальной, т. е. все точки ее имеют одинаковый потенциал.



Электрическое поле при этом существует вне проводника, а внутри его напряженность электрического поля равна нулю. Если же по проводнику проходит ток, то внутри его существует электрическое поле и потенциалы разных его точек неодинаковы. Таким образом, поле, существующее в проводнике, когда проходит электрический ток, отлично от электростатического поля. В этом случае в проводнике происходят преобразования электрической энергии в другие виды энергии.

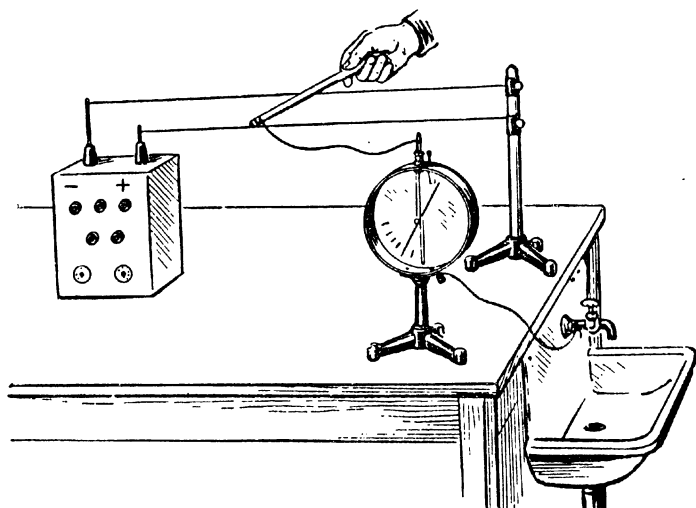


Рис. 64. Измерение значений потенциалов в разных точках нити при прохождении по ней электрического тока

Для демонстрации устанавливают на демонстрационном столе на расстоянии 1,5—2 м друг от друга два изолирующих штатива и натягивают между ними тонкую веревку (можно толстую нитку или, наконец, ленту от пишущей машинки). Веревка должна быть слегка увлажнена, чтобы обладать незначительной проводимостью. Для этого достаточно провести по ней влажными пальцами. Концы веревки должны иметь достаточную длину для подключения к зажимам универсального выпрямителя. Потенциалы в разных точках веревки измеряют с помощью электрометра. Для этого его корпус заземляют, а к стержню присоединяют гибкий проводник, к другому концу которого подключен пробный шарик на изолирующей ручке (рис. 64).

Вначале присоединяют только один конец веревки к одному из зажимов выпрямителя. Измеряют при этом потенциалы в разных точках веревки и убеждаются, что они везде одинаковы. Веревка заряжена, но заряд статический. Затем присоединяют оба конца веревки к зажимам выпрямителя.

Перемещая пробный шарик вдоль веревки, убеждаются, что она обладает в разных точках неодинаковыми потенциалами. Таким образом, поверхность проводника теперь не является эквипотенциальной. Это основное, что следует подчеркнуть в демонстрации.

На первый взгляд кажется более удачной демонстрация, когда к выпрямителю подключают лишь один конец веревки, а другой заземляют. Также заземляют свободную клемму выпрямителя. При этом потенциал вдоль цепи меняется от некоторого максимума до нуля. Однако доказательство, что поверхность не является эквипотенциальной, одинаково просто в обоих этих опытах. Последний же вариант имеет недостаток в том, что учащиеся не видят непосредственно замкнутую цепь.

При демонстрации данного опыта обычно применяли листочки-указатели, укрепляя их вдоль нити<sup>1</sup>. Угол расхождения их должен показывать потенциал данной точки на нити.

Однако учащиеся знают, что потенциал измеряется электрометром, а листочки-указатели подобно листочкам электроскопа показывают лишь наличие заряда. Поэтому опыт целесообразнее проводить с электрометром, хотя это не дает сразу общую для всей цепи картину падения потенциала. Чтобы показать общую картину, рисуют на доске нить и в соответствующих местах ее записывают показания электрометра.

Полезно также вычертить график изменения потенциала вдоль проводника.

При отсутствии универсального выпрямителя с успехом может быть применена электрофорная машина. Концы нити при этом присоединяют к кондукторам машины. В остальном демонстрация осуществляется также, как и с выпрямителем.

### О п ы т 34. Электронная проводимость металлов

О б о р у д о в а н и е: механическая модель инерциального движения электронов, центробежная машина.

Для объяснения природы электрического тока в металлах обычно рассматривается опыт Л. И. Мандельштама и Н. Д. Папалекси по инерциальному движению электронов (1912 г.). В этом опыте быстро вращалась вокруг вертикальной оси катушка с достаточным числом витков медного провода. Концы провода присоединялись к кольцам, по которым скользили щетки, соединенные с гальванометром. При внезапной остановке катушки гальванометр показывал ток, возникновение которого связано с тем, что вращающиеся с катушкой свободные носители электрических зарядов в случае остановки катушки по инерции продолжают движение относительно кристаллической решетки проводника. Отношение за-

---

<sup>1</sup> Д. Д. Г а л а н и н, Е. Н. Г о р я ч к и н и др., Физический эксперимент в школе, т. III, стр. 178.

ряда к массе  $\left(\frac{e}{m}\right)$  этих носителей зарядов оказалось равным  $\frac{e}{m}$  для электрона. Это экспериментально подтверждает, что электрический ток в металлах осуществляется движением электронов.

В силу больших экспериментальных трудностей данный опыт продемонстрировать в средней школе не представляется возможным. Изложение материала можно лишь сопровождать упрощенной схемой опыта (рис. 65).

Однако учащиеся с трудом улавливают идею опыта, если объяснение не сопровождать классной демонстрацией, иллюстрирующей ее.

Наиболее целесообразна здесь демонстрация механической модели инерциального движения электронов, описанная на стр. 13.

Для демонстрации опыта центробежную машину укрепляют на краю стола и устанавливают в ней модель. Чтобы улучшить видимость, сзади устанавливают белый экран. При демонстрации приводят центробежную машину во вращение (достаточно 2—3 оборота) и резко останавливают. Жидкость в трубке по инерции продолжает движение, что хорошо заметно по перемещению твердых частиц, помещенных в эту жидкость. Хорошо отцентрировать трубку не удастся, и поэтому не следует ее длительно вращать.

Рассматривая опыт Л. И. Мандельштама и Н. Д. Папалекси, к сожалению, в школе нельзя объяснить, как определялось значение  $\frac{e}{m}$ , оказавшееся

равным  $\frac{e}{m}$  электрона. Поэтому све-

дения о том, что движущимися носителями электрического заряда являются электроны, сообщаются учащимся без объяснения.

Другие варианты опыта можно найти в методической литературе<sup>1</sup>. При отсутствии в школе модели можно продемонстрировать фрагмент «Доказательство наличия свободных электронов в металле» из кинофильма «Электрический ток». В этом фрагменте проводится аналогичный опыт, только кольцевая трубка вращается в горизонтальной плоскости.

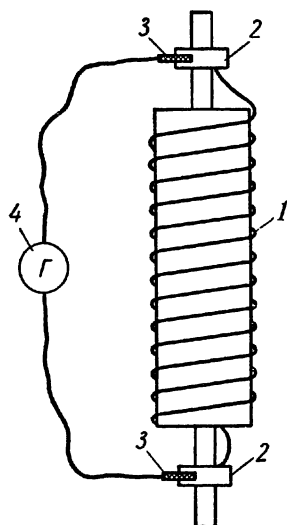


Рис. 65. Схема опыта Л. И. Мандельштама и Н. Д. Папалекси:

1 — обмотка из большого числа витков медного провода;  
2 — металлические кольца;  
3 — щетки; 4 — гальванометр

<sup>1</sup> П. А. Рымкевич, Повторение курса физики в 10 классе, Учпедгиз, 1957, стр. 88, рис. 29.

## О п ы т 35. Электрический ток в металлах

**Оборудование:** кинопроектор, кинофрагмент «Природа электрического тока» из кинофильма «Электрический ток», экран.

В заключение показывают кинофрагмент «Природа электрического тока». Средствами кино, с помощью мультипликации дается модель тока в металле. В результате просмотра кинофильма создается образное представление и длительно сохраняющееся зрительное впечатление самого механизма электропроводности металлов.

Первые кадры кинофрагмента дают модельное изображение строения металлического проводника. На экране видны ионы кристаллической решетки, совершающие некоторые движения относительно своих положений равновесия. Между ионами находится электронный газ — совокупность хаотически движущихся свободных электронов. Электрическое поле при этом отсутствует.

На следующих кадрах показано движение электронов под действием электрического поля. Хаотическое движение их сохраняется, но, помимо его, возникает поступательное движение. Чтобы представить это сложное движение электронов, следует вспомнить дрейф корабля. Именно поэтому и принято говорить о «дрейфе электронов».

Наблюдать движение всей совокупности электронов чрезвычайно трудно. Поэтому выделяется один электрон и наблюдается его движение. Это по сути дела неправильно, но приходится допустить при моделировании такое упрощение. Электроны в процессе своего движения сталкиваются с ионами кристаллической решетки. Удар при этом близок к упругому. Здесь подробности взаимодействия электронов с ионами не рассматриваются. Но полученные представления будут использованы и развиты дальше при изучении закона Ома для участка цепи.

### § 3. ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ЦЕПЬ. ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Для выяснения роли источника тока в электрической цепи и разъяснения различия между скоростью носителей тока и практически мгновенным распространением электрического поля весьма полезна гидродинамическая аналогия. В ней на основе аналогичности законов электрического тока и тока воды движение электронов в проводнике сопоставляется с движением воды в трубах.

Гидродинамическая аналогия также полезна при рассмотрении энергетических преобразований в электрической цепи постоянного тока. Однако больший эффект получается при применении механической модели, служащей для объяснения процессов, происходящих в электрической цепи. Непосредственное наблюдение данных

процессов, как известно, невозможно, а модель создает хорошо запоминающиеся образы. В модели используется аналогичность электрического поля и поля силы тяжести. Действительно, несмотря на разную природу этих полей, они имеют черты сходства: это потенциальные поля и работа в них не зависит от формы пути.

Все сказанное выше ни в коем случае нельзя понимать так, что при рассмотрении электрической цепи и процессов в ней демонстрируются лишь модели. Наоборот, в первую очередь демонстрируются соответствующие цепи, показываются действия тока, а лишь для осмысливания сущности процессов применяются аналогии и модели, что позволяет не формально, а в довольно доступной форме объяснить изучаемые явления.

В демонстрациях главное внимание должно обращаться на трактовку выводов из опытов, а не только на наблюдение их результатов. При этом в обсуждении опытов должны активное участие принять учащиеся. Отметим, что так как материал важен и сложен, то бояться излишнего повторения здесь не следует.

#### О п ы т 36<sup>1</sup>. Электрическая цепь. Гидродинамическая аналогия электрической цепи

**Оборудование:** батарея аккумуляторов 3-НКН-10 или 5-НКН-22, лампа от карманного фонаря на стойке, ключ однополюсный, соединительные провода, водяной центробежный насос с электродвигателем, гидродинамическая вертушка, соединительные резиновые трубки, кран, реостат (30—40 ом, 5 а), штатив лабораторный.

Вначале повторяют, из каких основных элементов состоит простейшая электрическая цепь. Затем вызывают к доске двух учащихся: один из них будет чертить схему цепи, а другой в это время собирает данную цепь. В цепи источником тока служит батарея аккумуляторов, потребителем энергии — лампа от карманного фонаря. Приборы следует располагать так, чтобы все элементы цепи и соединительные провода были хорошо видны (рис. 66). Демонстрируют цепь, показывают свечение лампочки при замыкании ключа.

Напоминают учащимся, что электрическая цепь в определенном смысле аналогична замкнутой гидродинамической системе, в которой циркулирует вода. Очень полезно начертить схему такой системы (рис. 67).

Показывают учащимся гидродинамическую систему, состоящую из центробежного водяного насоса, гидродинамической вертушки, резиновых соединительных трубок и крана.

---

<sup>1</sup> Часть опытов проводится повторно. В дальнейшем опыты, уже известные учащимся из восьмилетней школы, будут обозначаться звездочкой у номера опыта.

В этом случае насос сопоставляется с источником тока в электрической цепи, гидродинамическая вертушка — с потребителем энергии, соединительные трубки, наполненные водой, — с соединительными проводами, а кран — с ключом.

Установку заранее подготавливают для демонстрации, так как заполнение ее водой требует времени и специальных приспособлений.

Питание электродвигателя водяного насоса производится от городской сети, но для регулирования скорости вращения насоса используют реостат на 30—40 ом или автотрансформатор ЛАТР-1, ЛАТР-2.

Демонстрируют установку в действии. Регулируя напряжение, подводимое к электродвигателю, показывают изменение скорости

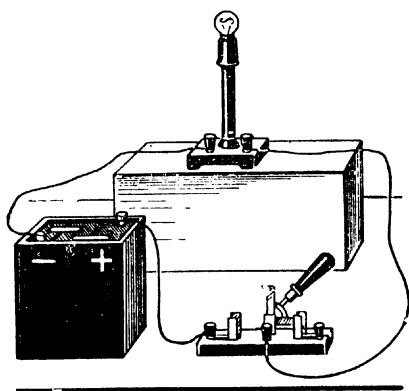


Рис. 66. Расположение приборов при демонстрации простейшей электрической цепи

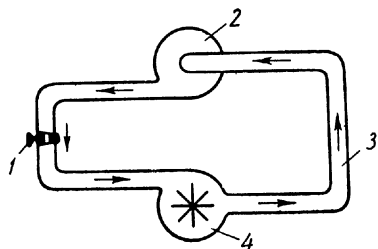


Рис. 67. Гидродинамическая аналогия электрической цепи:

1 — кран; 2 — насос; 3 — соединительные трубки; 4 — вертушка

вращения вертушки. При этом хорошо видно, что насос гонит воду, создавая напор (разность давлений), и движется гидродинамическая вертушка. Вращая кран, показывают прекращение движения воды и остановку вертушки. Это аналогично выключению электрической цепи.

Обращаются к рассмотрению тех вопросов, которые помогает уяснить гидродинамическая аналогия.

1. Роль источника тока в электрической цепи. Термин «источник тока» нельзя признать удачным, так как он способствует неправильному заключению, что источник тока является источником электрических зарядов в цепи. Для исключения такого представления разъясняют, что источник тока является как бы «возбудителем тока», т. е. он создает не заряды, а электрическое поле, которое и действует на электроны в проводни-

ках и приводит их в движение. Однако принятая терминология сложилась уже давно и нет острой нужды изменять ее. Необходимо другое — вскрыть физическую сущность, скрытую за этим термином. Последнему способствует аналогия и демонстрируемая модель. Действительно, источник тока не является источником зарядов, так же как и насос не служит источником воды; более того, как насос гонит воду в гидродинамической системе, так и источник тока создает электрический ток в цепи.

2. Место ключа в электрической цепи. Если ввести направление электрического тока, а после этого поставить вопрос о месте ключа в цепи, то нередко можно получить ответ: «Ключ должен быть на участке цепи между положительным полюсом источника и потребителем». В действительности ключ может быть установлен в любом месте электрической цепи. Чтобы разъяснить это, показывают учащимся, что течение воды в гидродинамической системе прекращается, если закрыть любой из двух установленных в ней кранов. Аналогично происходит и в электрической цепи: при разрыве цепи прекращается циркуляция электрических зарядов. Чтобы убедить в этом учащихся, переставляют ключ из одного места цепи в другое и показывают, что действие ключа от этого не изменилось.

3. Какие электрические заряды движутся в электрической цепи. Если источник тока не создает электрических зарядов, то уместно спросить: «Какие заряды движутся в цепи?» В случае затруднения учащихся при ответе напоминают строение металлического проводника. В проводнике имеется электронный газ. Когда источник тока создает электрическое поле, то эти электроны и приходят в движение.

Для создания образных представлений полезно сравнение проводника с трубой, наполненной водой (но не пустой).

4. Различие между незначительной скоростью носителей тока и практически мгновенным распространением тока в цепи. Этот вопрос в восьмилетней школе подробно не рассматривался. На второй ступени обучения его понимание необходимо.

Вначале убеждаются путем наблюдения, что гидродинамическая вертушка в установке начинает вращаться значительно раньше, чем до нее дойдет та вода, которую привели в движение в момент включения лопасти насоса. Благодаря передаче движения, вода пришла в движение по всей замкнутой системе. Аналогично и в электрической цепи: носители тока перемещаются под действием поля с небольшими скоростями, а скорость распространения поля велика (в вакууме  $300\,000\text{ км/сек}$ ). Электроны приходят в движение по всей цепи через очень короткий промежуток времени после замыкания ее.

Здесь же весьма уместна аналогия с газопроводом или нефтепроводом, в которых скорость частиц газа или нефти уподобляется

скорости носителей заряда, а «скорость тока» — скорости передачи давления в газопроводе или нефтепроводе<sup>1</sup>.

Аналогом напряжения является напор. В цепи, где источником тока вначале служит одна, а затем две и три банки аккумулятора, видно изменение свечения лампы. Также при изменении скорости вращения двигателя меняются напор и скорость вращения вертушки.

### Опыт 37. Механическая модель для объяснения процессов, происходящих в электрической цепи постоянного тока

**Оборудование:** модель винтовой наклонной плоскости, металлический шарик и универсальный штатив.

На внешнем и внутреннем участках замкнутой электрической цепи действуют электрические поля и движутся заряды (электроны в металлических проводниках). Внутри источника тока действуют так называемые сторонние силы, под действием которых происходит перемещение зарядов в источнике и образование избыточных зарядов на его полюсах. По мере накопления зарядов на полюсах растет и электрическое поле, созданное ими. Когда же величины внешней силы  $F_{ст}$  и электрической силы  $F_{эл}$  (рис. 68), действующих на заряды, станут равными, разделение зарядов прекратится. С энергетической точки зрения внутри источника тока совершается работа сторонних (не электрической природы) сил, т. е. происходит преобразование различных видов энергии в электрическую энергию. Так, например, в химических источниках тока (элементах и аккумуляторах) химическая энергия превращается в электрическую, в индукционных генераторах — механическая в электрическую и т. д.

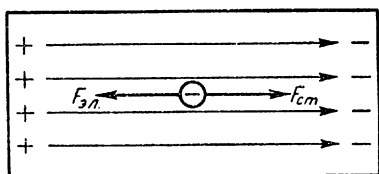


Рис. 68. Силы, действующие на электрон на внутреннем участке электрической цепи

При замыкании внешней цепи возникающее в соединительных проводниках электрическое поле действует на электроны и приводит их в движение и образуется ток во внешней цепи. Если же рассмотреть направление напряженностей полей внутри и вне источника тока, то они противоположны (рис. 69). В процессе движения зарядов в электрической цепи величина скачка потенциалов на зажимах источника тока должна была бы не только уменьшиться, но и стать в конце концов равной нулю, так как происходит

<sup>1</sup> А. В. Перышкин, Курс физики, ч. III, Учпедгиз, 1959, стр. 47.



нейтрализация зарядов. Однако при этом уничтожается равновесие сил внутри источника тока и благодаря работе сторонних сил или процессу преобразования одного из видов энергии в электрическую восстанавливается на зажимах источника тока постоянная разность потенциалов (напряжение).

Рассмотренные процессы не поддаются непосредственному наблюдению, но возможна их иллюстрация с помощью механической модели, имеющей вид винтовой наклонной плоскости, по которой скатывается шарик (см. рис. 4 и 5).

Перед демонстрацией модели в беседе выясняют условия, необходимые для существования тока в электрической цепи.

Затем на механической модели показывают скатывание шарика под действием силы тяжести и объясняют, что это движение

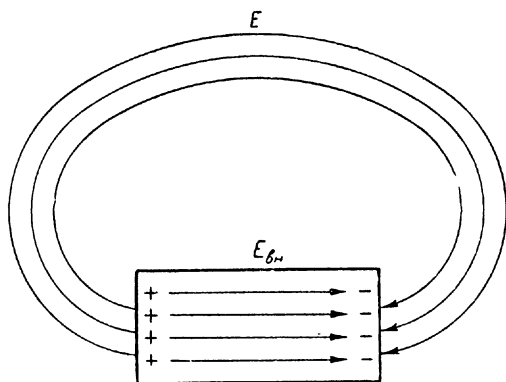


Рис. 69. Электрические поля внутри и вне источника тока

аналогично перемещению электрических зарядов во внешней электрической цепи под действием сил электрического поля. Сам шарик не может подняться вверх, так как для этого необходимо совершить работу против силы тяжести. Аналогично и в случае электрической цепи: необходимо действие сторонних сил. Поднимают шарик рукой, т. е. совершают работу против силы тяжести, аналогичную работе сторонних сил в источнике электрического тока. Чтобы в цепи проходил непрерывно ток, необходима и непрерывная работа сторонних сил, превращение какого-либо вида энергии в электрическую энергию. Этот процесс будет происходить до тех пор, пока не будет израсходован весь запас энергии источника тока.

Последнее иллюстрируется с помощью специального подъемного механизма (см. рис. 15). Пока не израсходуется запас энергии (энергия падающего груза), подъемный механизм поднимает шарик, и, следовательно, происходит его непрерывное движение.

В заключение делают выводы: во внешней цепи электроны движутся под действием сил электрического поля, а во внутренней цепи — под действием сторонних сил. Внутри источника тока при этом происходит процесс превращения какого-либо вида энергии в электрическую энергию.

#### § 4. СОПРОТИВЛЕНИЕ ПРОВОДНИКОВ. ЗАКОН ОМА ДЛЯ УЧАСТКА ЦЕПИ

Из курса физики восьмилетней школы учащимся знакомы понятия тока и сопротивления. Наибольшие затруднения учащиеся на I ступени обучения встречают при выяснении сущности напряжения. На II ступени обучения данный вопрос не вызывает таких затруднений, так как более глубоко изучается электрическое поле, понятие потенциала. Понятия тока и сопротивления, зависимость сопротивления от длины, сечения, материала проводника, а также закон Ома для участка цепи имеет смысл повторить. Ниже будет дано краткое описание необходимых опытов при этом. Новым вопросом является зависимость сопротивления металлических проводников от температуры.

##### О п ы т 38\*. Зависимость сопротивления от материала, длины и площади сечения проводника

**Оборудование:** набор проволок разных сопротивлений, аккумуляторный элемент НКН-10, гальванометр или демонстрационный амперметр, рубильник, соединительные провода и медный провод диаметром 0,5—1 мм для подбора шунта к гальванометру.

Главучтехпром выпускает набор проволок разных сечений в виде деревянной рамки с натянутыми на ней четырьмя проволоками. Возможно применение и самодельного прибора. Для справки приводим данные проволок набора диаметром 0,5 мм.

материал	длина, см	сопротивление, ом
железо . . . . .	50	0,56
константан . . . . .	50	1,3
константан (2 проволоки соединены параллельно) .	50	0,65
константан . . . . .	25	0,65

При подготовке к опыту включают проволоку с наименьшим сопротивлением и подбирают из медной проволоки к гальванометру такой шунт, чтобы стрелка гальванометра отклонялась на всю шкалу (рис. 70). Затем включают вторую проволоку и убеждаются в том, что величина сопротивления ее отличается (хотя длина и диаметр ее те же самые, что и у первой). После этого делают вывод о зависимости сопротивления от материала. Далее включают третью

и четвертую проволоки и убеждаются в зависимости сопротивления от длины и сечения проводника. Так сопротивление второй проволоки в два раза больше сопротивления третьей ( $l_2 = l_3$ ), так как ее общее сечение в два раза меньше сечения третьей проволоки. Сопротивление же четвертой проволоки меньше в два раза сопротивления второй, так как она в два раза короче второй.

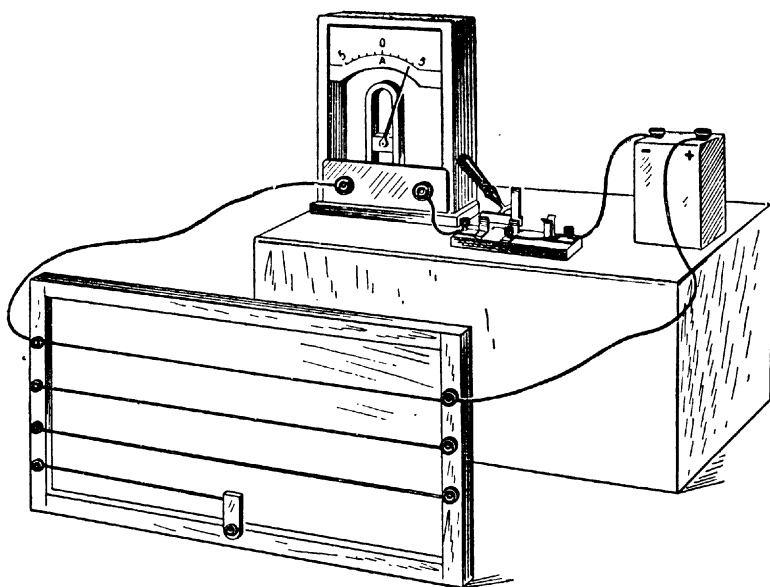


Рис. 70. Установка для выявления зависимости сопротивления от материала, длины и площади сечения проводника

Выявляя данные зависимости, ни в коей мере не следует спешить, так как производится почти одновременно четыре измерения и сопоставляются четыре результата. Это не простая задача и ее целесообразно иллюстрировать соответствующими чертежами и записями на доске.

Большие значения тока допускать нельзя, так как при этом будет значительно изменяться сопротивление проводников вследствие их нагревания. Поэтому в цепь включают лишь одну банку аккумулятора. Показания прибора зависят не только от сопротивления проволоки, а и от сопротивления всей цепи.

Вследствие этого сопротивление источника тока и соединительных проводов должно быть значительно меньше сопротивления включаемых проводников. Этим и объясняется применение в каче-

стве источников тока аккумуляторов, внутреннее сопротивление которых достаточно мало<sup>1</sup>. Необходимо также следить за надежностью контактов.

При отсутствии набора проволок заводского выпуска прибор изготавливают силами учащихся. В самодельном приборе можно применить никелиновую и нихромовую проволоки. Медную проволоку применять не следует из-за большого температурного коэффициента сопротивления. В этом случае лучше изготовить два набора: один из проволок разных материалов, но одинаковой длины и сечения; другой с двумя проволоками одного материала, причем одинаковой длины и сечения. Демонстрация в этом случае проводится так.

На первом наборе обычным путем показывают зависимость сопротивления от материала, а также вводят понятие удельного сопротивления (с этой целью имеет смысл брать проволоку длиной 1 м).

На втором наборе показывают зависимость сопротивления от геометрических размеров проводника. Для этого вначале включают одну из проволок, потом включают их последовательно и параллельно.

Этот вариант опыта требует большей подготовки, но дает и значительно больший эффект.

Итак, устанавливают, что  $R \sim l, R \sim \frac{1}{S}$ , записывают зависи-

мость  $R = \rho \frac{l}{S}$  и разъясняют, почему сопротивление зависит от материала проводника. Электрическое сопротивление объясняется тем, что электроны взаимодействуют с атомами кристаллической решетки, а последняя различна у разных металлов. Зависимость сопротивления от длины проводника связана с тем, что с увеличением длины при одной и той же разности потенциалов на концах проводника уменьшается напряженность электрического поля.

Действительно,  $E = \frac{\varphi_b - \varphi_a}{l}$ , где  $l$  — длина проводника. В связи с этим уменьшаются и силы  $F = eE$ , действующие на электроны, заряд которых обозначен нами  $e$ . Средняя скорость движения электронов, естественно, уменьшается, уменьшается и ток. Если же при  $U = \text{const}$  уменьшился ток, это соответствует увеличению сопротивления.

### О п ы т 39. Закон Ома для участка цепи

Об о р у д о в а н и е: батарея аккумуляторов 3-НКН-10 или 5-НКН-22, демонстрационный амперметр, демонстрационный вольтметр, демонстрационный магазин сопротивлений малый (на 10 ом),

<sup>1</sup> Следует взять аккумулятор, который после заряда не использовался.

реостат со скользящим контактом (25—30 ом, 5 а), однополюсный рубильник, соединительные провода.

В опыте последовательно соединяют источник тока, магазин сопротивлений, амперметр, реостат и рубильник. К амперметру подключают шунт на 3 а, а к вольтметру — дополнительное сопротивление на 5 в и устанавливают соответствующие шкалы. Вольтметр соединяют параллельно с магазином сопротивлений. Амперметр и вольтметр устанавливают на брус-подставке, чтобы были видны соединительные проводники (рис. 71). Реостат со скользя-

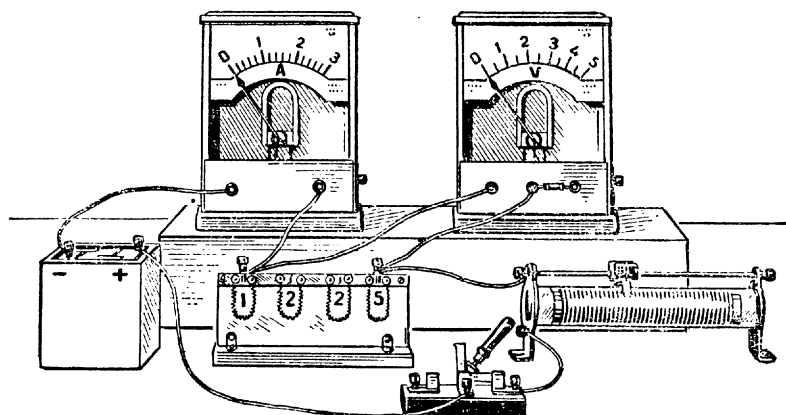


Рис. 71. Расположение приборов при демонстрации закона Ома для участка цепи

щим контактом нужен лишь для поддержания постоянного напряжения на внешнем участке цепи при изменении сопротивления, поэтому его лучше всего расположить сбоку. Но все же не следует его и скрывать; наоборот, учащимся необходимо объяснить его назначение. Полезно соединительные провода во всей замкнутой цепи взять одного цвета, а вольтметр присоединить проводами другого цвета.

Повторяют полностью демонстрацию из курса восьмилетней школы, когда устанавливают зависимость  $I = \frac{U}{R}$  на некоторых численных значениях. В опыте лишь устанавливают зависимость между током, напряжением и сопротивлением, которые введены до этого и независимо друг от друга.

Демонстрация состоит из двух последовательно проводимых опытов.

В первом опыте устанавливают зависимость тока от сопротивления участка цепи при постоянном напряжении 2 в и изменяют

сопротивление цепи с помощью демонстрационного магазина сопротивлений, последовательно устанавливая 1, 2 и 4 ом. Постоянство напряжения поддерживают с помощью реостата. Составляют соответствующую таблицу 2.

Таблица 2

$U = 2\text{ в}$	
$R, \text{ ом}$	$I, \text{ а}$
1	2
2	1
4	0,5

Таблица 3

$R = 2 \text{ ом}$	
$U, \text{ в}$	$I, \text{ а}$
3	1,5
2	1,0
1	0,5

Здесь легко обнаруживается обратная пропорциональная зависимость тока от сопротивления. Записывают  $I \sim \frac{1}{R}$ .

Во втором опыте берут постоянное сопротивление, например 2 ом, и определяют ток при разных значениях напряжения. Данные вновь заносят в табл. 3.

Теперь легко устанавливают прямую пропорциональную зависимость тока от напряжения и записывают  $I \sim U$ . Напряжение изменяют с помощью реостата. Можно также включить вначале всю батарею аккумуляторов, а затем постепенно уменьшать число аккумуляторных банок в батарее, сначала до двух, а потом до одной. Более точную регулировку напряжения все равно осуществляют реостатом. Заметим, что в опыте не следует применять батареи сухих элементов, так как внутреннее сопротивление их велико; внутреннее сопротивление аккумуляторов, наоборот, мало и напряжение на их зажимах при изменении сопротивления цепи будет изменяться незначительно.

В беседе с учащимися обобщают полученные зависимости  $I \sim U$  и  $I \sim \frac{1}{R}$ , что дает возможность записать  $I \sim \frac{U}{R}$ . Если же сопоставить все данные, полученные в опытах, то можно перейти от пропорциональности к равенству (при определенных единицах измерения  $I$ ,  $U$  и  $R$  (т. е. к закону Ома для участка цепи  $I = \frac{U}{R}$ )).

По данным опыта строят графики зависимости тока от напряжения при постоянном сопротивлении и тока от сопротивления при постоянном напряжении (рис. 72, а и б). Эти графики полезно сравнить с известными из курса алгебры графиками  $y = ax$  и  $y = \frac{a}{x}$ . На II ступени обучения целесообразно после этого сделать вывод закона Ома для участка цепи на основании электронных представлений.

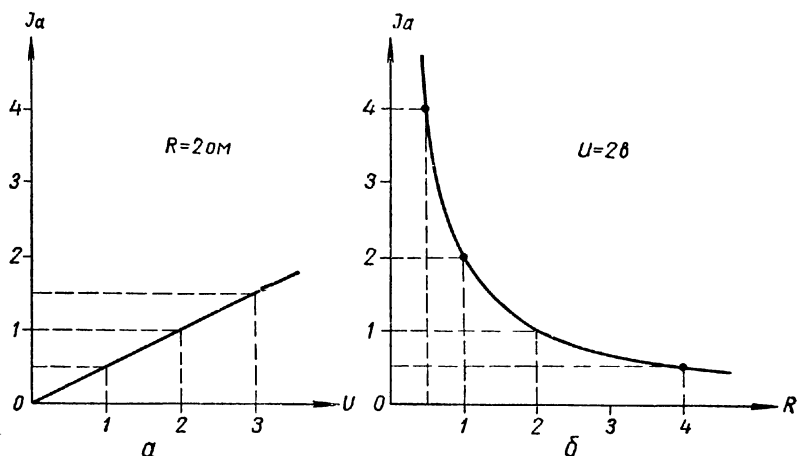


Рис. 72. Графики зависимости:

*a* — тока от напряжения при постоянном сопротивлении; *б* — тока от сопротивления при постоянном напряжении

Данный вывод учитель проводит на доске, но максимально привлекая учащихся к работе. Требовать в дальнейшем при опросе повторения вывода не следует, так как главная цель состоит в усвоении основных идей, использованных при этом.

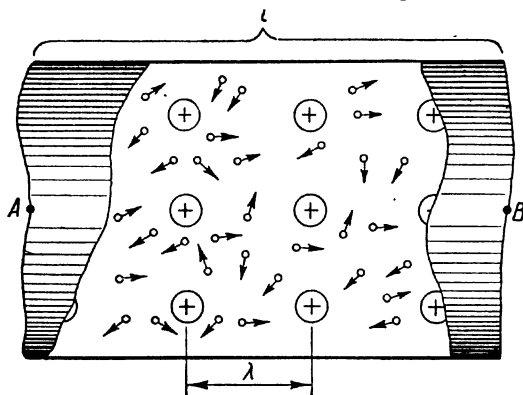


Рис. 73. К выводу закона Ома для участка цепи

В выводе рассматривается участок цепи  $A - B$  сечением  $S$  и длиной  $l$  (рис. 73). К концам участка приложено напряжение  $U = \varphi_B - \varphi_A$  и, следовательно, напряженность электрического поля в проводнике

$$E = \frac{\varphi_B - \varphi_A}{l} = \frac{U}{l}.$$

На свободные электроны, которые находятся в проводнике в состоянии хаотического теплового движения, действует теперь со стороны электрического поля сила

$$F = eE = e \frac{U}{l},$$

где  $e$  — заряд электрона.

Под действием ее электроны приобретают ускорение

$$a = \frac{F}{m} = \frac{eU}{ml},$$

где  $m$  — масса электрона. На хаотическое движение электронов накладывается поступательное движение. Характер этого сложного движения можно представить, сравнив его с дрейфом затертого во льдах корабля.

Расстояние, на котором электрон движется свободно от одного столкновения до другого, называют длиной свободного пробега и обозначают  $\lambda$ . Конечная скорость поступательного движения электрона перед столкновением с ионом кристаллической решетки

$$v = at = \frac{eU}{ml} \cdot t,$$

где  $t$  — время между двумя последовательными столкновениями электрона с ионами.

Определение этого времени и представляет главное затруднение.

Как уже было отмечено, электрон совершает сложное движение: хаотическое со скоростью  $V_{\text{тепл}}$  и поступательное со скоростью  $V_{\text{пост}}$ . Однако  $V_{\text{пост}} \ll V_{\text{тепл}}$ . Поэтому можно принять, что время между двумя последовательными столкновениями электрона с ионами будет

$$t = \frac{\lambda}{v_{\text{тепл}}}.$$

Между двумя столкновениями электрон движется ускоренно, но его движение можно также характеризовать средней скоростью

$$v_{\text{ср}} = \frac{v_0 + v}{2},$$

а при условии, что начальная скорость в нашем случае  $V_0 = 0$ , получаем значение

$$v_{\text{ср}} = \frac{v}{2} = \frac{eU \cdot t}{2lm} = \frac{eU\lambda}{2 \cdot l \cdot m v_{\text{тепл}}}.$$

Все приведенные до этого рассуждения по сути дела касались лишь выяснения вопроса о характере движения электрона в проводнике при действии электрического поля. В результате этого



создается довольно ясная картина этого движения, кроме того, расчеты  $E$ ,  $a$ ,  $v$ ,  $t$  и  $v_{\text{ср}}$  являются весьма хорошим повторением кинематики и законов динамики. Теперь можно найти аналитически зависимость тока от напряжения и сопротивления проводника.

Как известно, ток в проводнике

$$I = nev_{\text{ср}}S,$$

где  $n$  — число свободных электронов в  $1 \text{ см}^3$  проводника. Подставив в это выражение найденное выше значение  $v_{\text{ср}}$ , найдем зависимость  $I$  от  $U$  и некоторых величин, характеризующих проводник ( $n$ ,  $m$ ,  $e$ ,  $l$ ,  $S$ ,  $\lambda$ ,  $V_{\text{тепл}}$ ).

Действительно,

$$I = ne \frac{eU\lambda}{2lmv_{\text{тепл}}} \cdot S = \frac{U}{\frac{2mv_{\text{тепл}}}{e^2n\lambda}} \cdot \frac{l}{S}.$$

Выражение  $\frac{2mv_{\text{тепл}}}{e^2n\lambda}$  при неизменной температуре является постоянной величиной, зависящей только от структуры проводника. Ее обозначают  $\rho$  и называют удельным сопротивлением. Величина  $\rho \frac{l}{S}$ , зависящая как от структуры проводника, так и от его геометрических размеров, получила название сопротивления  $R$ .

Таким образом, можно записать  $I = \frac{U}{R}$  и  $R = \rho \frac{l}{S}$ .

#### Опыт 40. Зависимость сопротивления металлических проводников от температуры

**Оборудование:** батарея аккумуляторов 5-НКН-22 или 5-НКН-10, лампа автомобильная на 6 в и 30 вт, спираль из стальной проволоки сечением 0,3—0,5 мм<sup>2</sup> и длиной 0,5—1 м, спиртовка или газовая горелка, соединительные провода.

Данная демонстрация может быть поставлена в различных вариантах<sup>1</sup>.

Если демонстрацию осуществлять с питанием от городской сети, (127—220 в), то необходимо брать достаточно длинные проводники и нагревать их до довольно высоких температур. В школе же значительно проще собрать цепь с низковольтным источником тока и

<sup>1</sup> См. Д. Д. Галанин и др., Физический эксперимент в школе, Учпедгиз, 1954, т. III, стр. 166. Лекционные демонстрации по физике, вып. 6; Р. В. Телеснин, Электричество, ГИТЛ, 1952, стр. 58 и др.

включить в нее стальную специально подбираемую спираль из проволоки ( $l = 0,5—1$  м,  $S = 0,3—0,5$  мм<sup>2</sup>) и автомобильную лампу накаливания (желательно на 6 в). Включать в цепь дополнительные сопротивления или реостат не следует, так как эффект будет тем лучше, чем большую часть общего сопротивления составляет сопротивление нагреваемой спирали.

Установка для демонстрации не выпускается промышленностью, но ее легко изготовить (рис. 74). На стойке укрепляют патрон для

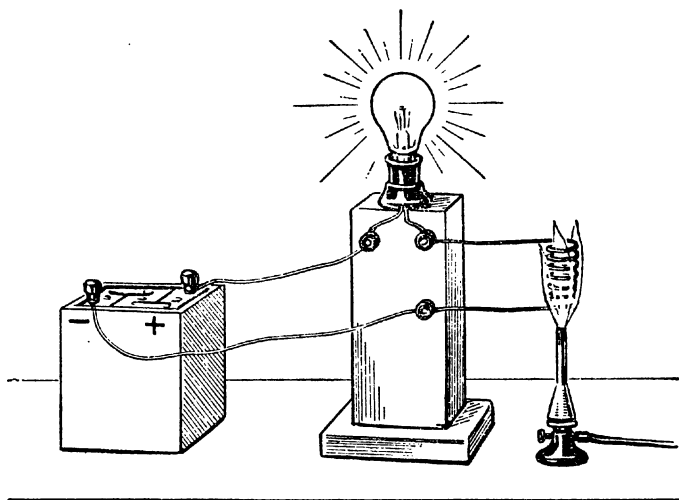


Рис. 74. Установка для демонстрации зависимости сопротивления металлических проводников от температуры

лампы, на ней же устанавливают спираль, так, чтобы ее удобно было нагревать спиртовкой или газовой горелкой. Когда спираль холодная, лампа горит ярко. Если нагревать спираль спиртовкой или газовой горелкой, то лампа горит тускло.

В опыте не производят никаких измерений, а делают лишь качественный вывод о зависимости сопротивления металлических проводников от температуры. Эта зависимость объясняется тем, что при нагревании изменяется интенсивность теплового движения атомов кристаллической решетки и увеличивается число столкновений электронов с атомами. Естественно, при этом увеличивается сопротивление проводника. Распространено ошибочное объяснение этого явления тем, что при изменении температуры значительно изменяется энергия теплового движения электронов; главную роль в изменении сопротивления играет увеличение числа встреч электронов с атомами.

Очень удобно в качестве нагреваемого сопротивления использовать нить от лампы накаливания. Для этого баллон лампы осторожно разбивают, не нарушая нить.

Хорошо получается демонстрация, когда берут спираль от разбитой кинопроекторной лампы на 127 в, 300 *вт*, а в качестве нагрузки и одновременно индикатора включают автомобильную лампу на 4 в, 3 *вт*. Спираль включают в цепь при помощи патрона, куда ввертывается цоколь от разбитой лампы. При отсутствии автомобильной лампы возможно измерение меняющегося тока демонстрационным амперметром с шунтом на 3 а.

Изменение сопротивления при очень незначительном изменении температуры легко демонстрировать с помощью мостиковой схемы, когда изучаемое сопротивление включается в одно из плеч моста<sup>1</sup>. Демонстрируют также и уменьшение сопротивления при охлаждении проводников. В этом случае спираль опускают в сосуд Дьюара с жидким воздухом.

## § 5. СОЕДИНЕНИЯ ПРОВОДНИКОВ

Демонстрируя различные соединения проводников, главное внимание нужно обратить на закономерности, имеющие место при таких соединениях. В первую очередь обращают внимание на распределение токов при параллельном соединении проводников и напряжения при последовательном соединении. Большое значение имеют также вопросы шунтирования амперметров, включения дополнительных сопротивлений к вольтметрам, изучение мостовой схемы и применение ее для измерения сопротивлений. Этот материал имеет принципиально важное общеобразовательное и политехническое значение.

Демонстрации соединений проводников не являются сложными. Все же некоторое затруднение вносит то обстоятельство, что монтажная схема обычно отлична от принципиальной схемы соединений. Большой методической удачей будет такое расположение всех приборов и проводников в опытах, когда имеется наибольшее совпадение реальной схемы с принципиальной. Значительные возможности для осуществления этого положения создают магнитные держатели и магнитная доска. С помощью магнитных держателей укрепляют на магнитной доске приборы. Всю схему при этом собирают в вертикальной плоскости и она очень близка к схеме, вычерченной на доске. Однако магнитная доска и магнитные держатели еще не успели войти в практику работы школ. Поэтому демонстрации описаны в обычной их постановке. Наличие в школе магнитных держателей дает возможность опыты несколько видоизменить. Мы ограничимся только указанием на эти возможности.

---

<sup>1</sup> Описание мостика Уитстона см. на стр. 104.

### Опыт 41\*. Последовательное и параллельное соединения проводников

Оборудование: батарея аккумуляторов 3-НКН-10 или 3-НКН-22, три лампы для карманного фонаря напряжением 1 в, две лампы для карманного фонаря на 3,5 в на стойках, демонстрационный вольтметр, демонстрационный амперметр, набор сопротивлений 1, 2 и 4 ом, ключ, соединительные провода.

Вначале собирают установку, в которой последовательно соединены три лампы на 1 в (рис. 75). Ток в цепи измеряют demonstra-

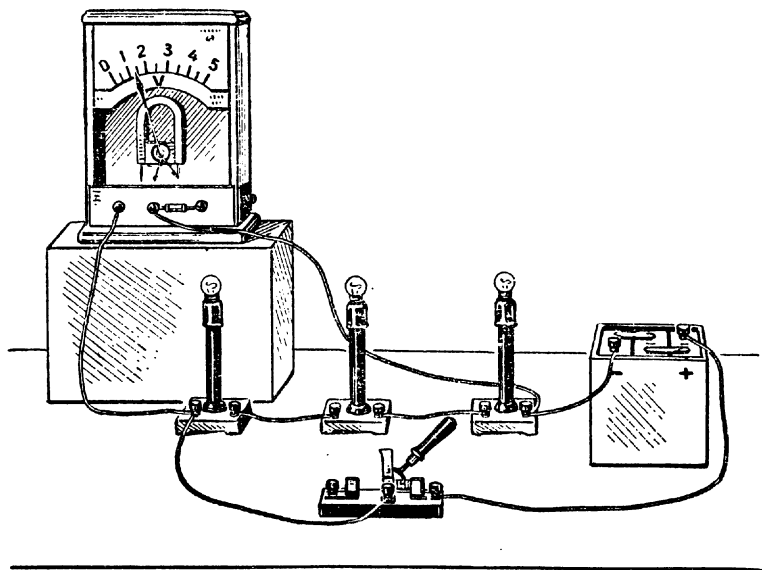


Рис. 75. Последовательное соединение проводников

ционным амперметром с шунтом на 3 а<sup>1</sup>, а напряжение — демонстрационным вольтметром с дополнительным сопротивлением на 5 в. Включают амперметр в разные участки цепи и обнаруживают, что ток при последовательном соединении проводников везде одинаков.

Вольтметром измеряют напряжение на каждой лампе  $U_1$ ,  $U_2$ ,  $U_3$  и общее напряжение  $U_{\text{общ}}$ . Опыт показывает, что  $U_{\text{общ}} = U_1 + U_2 + U_3$ . Данное соотношение является опытным фактом, но

<sup>1</sup> Амперметр на рисунке не показан. Заметим еще, что здесь целесообразен подбор шунта к амперметру, чтобы отклонение стрелки прибора было более заметное.

полезно его разъяснить и теоретически. Дело в том, что напряжение определяет работу, которая совершается при протекании  $I$  к по данному участку цепи. Очевидно, что работа, совершаемая во всей внешней цепи, равна сумме работ, совершаемых на последовательно соединенных участках.

Полученное опытным путем соотношение  $U_{\text{общ}} = U_1 + U_2 + U_3$  дает возможность вывести формулу для определения величины общего сопротивления при последовательном соединении проводников.

Для демонстрации распределения напряжения на последовательно соединенных проводниках соединяют потребители, имеющие разные сопротивления. Возможно применение набора сопротивлений для лабораторных работ. Сопротивления эти имеют малые габариты и их следует применять лишь в крайнем случае, когда нет других сопротивлений, наиболее удобных для демонстрации. Измерив  $U_1, U_2, U_3$ , убеждаются, что  $U_1 : U_2 : U_3 = R_1 : R_2 : R_3$ .

Возможны и другие варианты опыта, но при этом последовательность действий и основные выводы остаются теми же. При соответствующем источнике тока (аккумулятор, выпрямитель) целесообразно применение автомобильных ламп. В этом случае будут токи значительно больше, измерение которых проще. Очень нагляден опыт, когда включают две последовательно соединенные лампы накаливания на 127 в в сеть переменного тока 220 в. Можно включать лампы одной мощности и разных мощностей. Сопротивления включенных ламп надо сообщить учащимся (их определяют по данным ламп — мощности и напряжению). Измерение напряжения осуществляется демонстрационным вольтметром, переключив его на переменный ток с дополнительным сопротивлением на 250 в.

Далее демонстрируют параллельное соединение проводников. Для этого собирают цепь с двумя параллельно соединенными лампами на 3,5 в (рис. 76) и измеряют напряжение и ток. Вольтметр показывает общее напряжение для обоих соединенных параллельно проводников. Измеряют ток в общей цепи и в цепи каждой лампы. Опыт показывает, что общий ток равен сумме токов в параллельном разветвлении

$$I_{\text{общ}} = I_1 + I_2.$$

Ток в цепи каждой лампы при напряжении на ней 3,5 в будет 0,28 а, а в общей цепи 0,56 а. С помощью демонстрационного амперметра с шунтом на 3 а измерять такие токи затруднительно. Поэтому подбирают к амперметру шунт из толстой медной проволоки. Шкалу либо градуируют, либо используют имеющуюся, так как при измерениях не указываются сопротивления ламп и поэтому важно не само значение тока, а тот факт, что общий ток равен сумме токов в разветвлении. Результаты измерений дают возможность сделать вывод формулы для определения величины

общего сопротивления при параллельном соединении проводников.

При применении автомобильных ламп необходимость в подборе шунтов отпадает, так как токи будут значительно больше и возможно применение фабричных шунтов.

Демонстрируя распределение токов при параллельном соединении, заменяют лампы двумя проволоочными проводниками сопротивлением 1 и 2 ом.

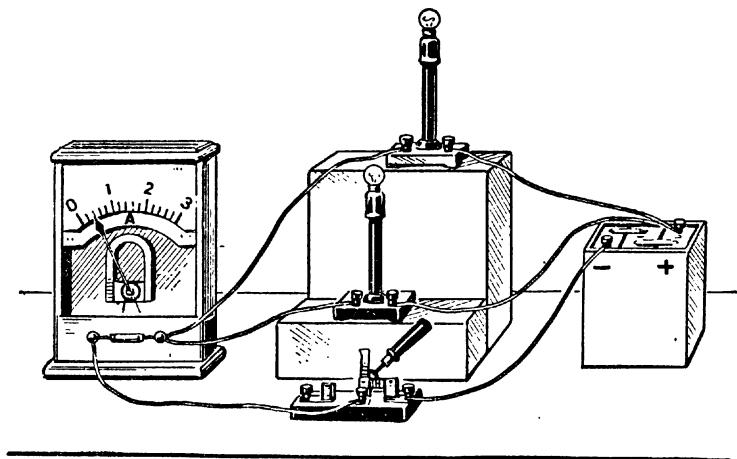


Рис. 76. Параллельное соединение проводников

Измеряют токи  $I_1$  и  $I_2$  и опытным путем получают зависимость

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

Также возможна демонстрация с лампами накаливания при питании от городской сети.

#### О п ы т 42. Мостик Уитстона

Оборудование: одна банка щелочного аккумулятора НКН-10 или НКН-22, демонстрационный реохорд, эталонное сопротивление 1 ом, измеряемые сопротивления (приблизительно 1 и 2 ом), демонстрационный амперметр, двухполюсный ключ или два однополюсных ключа, соединительные провода.

Новой программой предусмотрено изучение мостика Уитстона. Это вызвано огромным распространением мостиковых схем в электротехнике и измерительной технике. Так с помощью мостиковых схем осуществляется измерение сопротивлений, мостиковые схемы с термисторами дают возможность измерять излучаемые мощ-

ности, температуру и т. д. Современные выпрямители также собирают по мостиковым схемам.

Принципиальная схема измерительного моста (рис. 77) — замкнутый четырехугольник из четырех сопротивлений. В одну диагональ моста включен чувствительный гальванометр, а в другую — источник тока. В схеме имеется два ключа: один для включения тока, а другой — для включения гальванометра. Из четырех сопротивлений (плеч моста) неизвестным является одно, другое — эталонное сопротивление, а два сопротивления изменяются в процессе измерения. Мост балансируют так, чтобы ток через гальванометр не проходил, т. е. потенциалы точек  $A$  и  $B$  были равны. При этом  $I_x = I_3$ ;  $I_1 = I_2$  и согласно закона Ома

$$\left. \begin{aligned} \varphi_C - \varphi_A &= I_x \cdot r_x \\ \varphi_C - \varphi_B &= I_1 \cdot r_1 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

$$\left. \begin{aligned} \varphi_A - \varphi_D &= I_3 \cdot r_3 \\ \varphi_B - \varphi_D &= I_2 \cdot r_2 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Как уже говорилось,  $\varphi_A = \varphi_B$ . Значения  $r_1$  и  $r_2$  выразим через длину, сечение и удельное сопротивление проводника

$$r_1 = \rho \frac{l_1}{S_1} \quad \text{и} \quad r_2 = \rho \frac{l_2}{S_2}.$$

Обычно берется  $\rho_1 = \rho_2$  и  $S_1 = S_2$ . Для этой цели применяют реохорд, представляющий собой линейку с делениями с натянутой вдоль нее калиброванной проволокой из константана или манганина. Вдоль проволоки перемещается движок, имеющий надежный контакт с ней. Длину проволоки от одного ее конца до движка обозначим  $l_1$ , а длину проволоки от движка до другого конца —  $l_2$ .

Возвратимся к выводу формулы для определения  $r_x$ . Так как левые выражения в равенствах (1) и (2) равны, то равны между собой и правые, т. е.

$$I_x \cdot r_x = I_1 \cdot r_1. \quad (3)$$

$$I_3 \cdot r_3 = I_2 \cdot r_2. \quad (4)$$

С другой стороны,  $I_x = I_3$  и  $I_1 = I_2$ . При почленном делении равенства (3) на равенство (4) получим  $\frac{r_x}{r_3} = \frac{r_1}{r_2}$  и  $r_x = r_3 \frac{r_1}{r_2}$ .

Но

$$\frac{r_1}{r_2} = \frac{\rho \frac{l_1}{S}}{\rho \frac{l_2}{S}} = \frac{l_1}{l_2}.$$

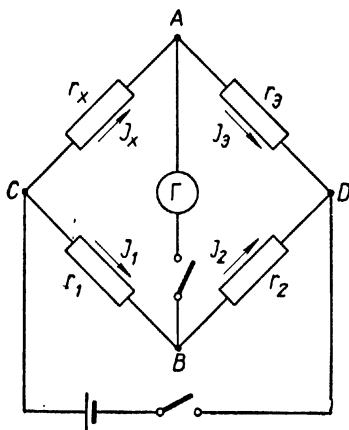


Рис. 77. Принципиальная схема измерительного мостика Уитстона

Окончательно формула для определения сопротивления с помощью измерительного моста приобретает вид

$$r_x = r_3 \frac{l_1}{l_2}.$$

Демонстрируют учащимся реохорд. Демонстрационный реохорд имеет достаточно большие размеры (1 м) и яркую шкалу. Показав эталонное и измеряемое сопротивления, собирают схему измери-

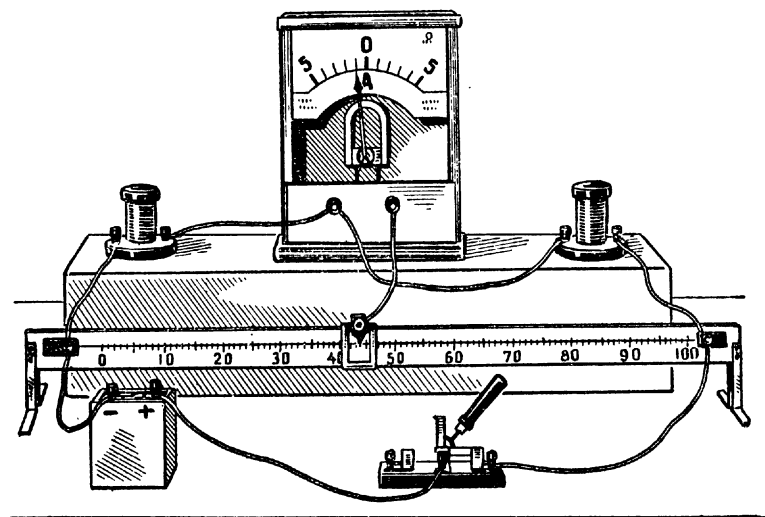


Рис. 78. Установка с демонстрационным реохордом

тельного моста. В качестве гальванометра используют демонстрационный амперметр, сделав на его боковой панели соответствующие переключения, а стрелку переводят на нуль в середине шкалы для гальванометра. Общий вид установки приведен на рис. 78. Чтобы не загромождать рисунок, ключ у гальванометра не показан.

При работе с мостом замыкают цепь источника тока, ставят движок примерно в среднее положение и присоединяют проводник от движка к клемме гальванометра. Его стрелка при этом отклонится. Передвигая движок, добиваются, чтобы стрелка гальванометра показывала нуль. Контактную пластину движка при перемещении его следует отжимать, чтобы не истирать проволоку реохорда. Сняв показания  $l_1$  и  $l_2$ , определяют искомое сопротивление.

Выключают цепь и заменяют сопротивление другим. Теперь балансировку моста удастся осуществить уже в другом положении движка. Опять вычисляют величину искомого сопротивления.

После демонстрации принципа действия простейшего измерительного моста не лишним будет указать на то, что измерительный мост не обязательно имеет реохорд в виде линейного проводника,



а им может служить и калиброванный потенциометр. Плечи моста при этом балансируются поворотом ручки. Следует показать измерительный мост, например, ММВ. Если же измерительного моста нет, то можно воспользоваться эпидиаскопом, показав его изображение.

Измерительный мост дает возможность измерять сопротивления с достаточно большой точностью. Однако для этого следует изменять в зависимости от значения  $r_x$  и  $r_g$ , чтобы при измерении различных сопротивлений балансировка моста осуществлялась при положении движка, близким к среднему ( $\frac{l_1}{l_2} \rightarrow 1$ ). В противном случае погрешности будут значительные.

### О п ы т 43. Шунтирование амперметра

Оборудование: батарея аккумуляторов 3-НКН-10, батарея элементов для карманного фонаря (старая), амперметр демонстрационный с шунтами на 3 и 10 а, магазин сопротивлений демонстрационный, лампа для карманного фонаря на стойке, ключ однополюсный, соединительные провода и провод медный диаметром 0,5—1 мм.

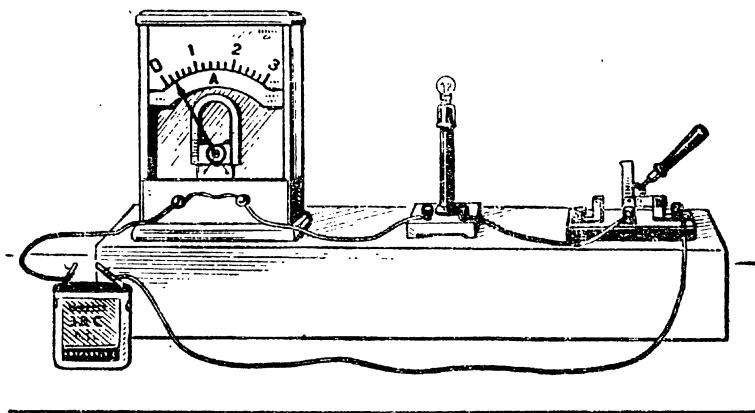


Рис. 79. Демонстрация шунтирования амперметра

При измерениях с чувствительными приборами есть опасность перегорания прибора, если по обмоткам его пройдет ток, величина которого больше допустимого. Для иллюстрации этого показывают простой опыт. В качестве источника тока берут старую, высохшую батарейку для карманного фонаря. Напряжение на ее зажимах столь мало, что нет опасности включать в ее цепь последовательно с лампой для карманного фонаря демонстрационный гальванометр

Гальванометр можно взять любой, но лучше всего демонстрационный амперметр, сделав соответствующие переключения. В собранной цепи (рис. 79) лампа естественно не светится, а стрелка гальванометра отклонится. Если параллельно гальванометру подключить медную проволоку диаметром 0,5—1 мм, то показания прибора изменятся.

После этого вводного эксперимента чертят схему включения шунта (рис. 80) и выводят формулу для определения его сопротивления. Общий ток в цепи  $I$  равен сумме токов, проходящих через гальванометр  $I_g$  и шунт  $I_{ш}$ . С другой стороны, при параллельном соединении токи обратно пропорциональны сопротивлениям ветвей соединения. Все это дает возможность вывести формулу для сопротивления шунта

$$R_{ш} = \frac{R_g}{n - 1},$$

где  $R_g$  — сопротивление гальванометра;  $n$  — величина, показывающая, во сколько раз ток в общей цепи больше, чем ток, проходящий через гальванометр.

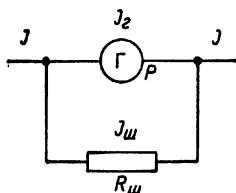
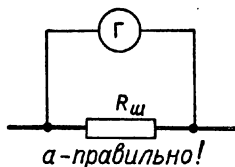
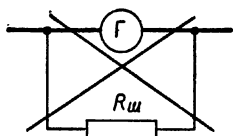


Рис. 80. Схема включения шунта



*а-правильно!*



*б-неправильно!*

Рис. 81. Правильная (а) и неправильная (б) схемы включения шунта

Шунты обычно изготавливают из манганина (сплав меди, марганца и никеля). Устройство шунта показывают, используя шунт от демонстрационного амперметра.

При включении шунта необходимо обеспечивать надежность контактов. Правильно гальванометр подключать к шунту (рис. 81, а), а не шунт к гальванометру (рис. 81, б). Это объясняется тем, что при включении по схеме рис. 81, а нет опасности перегорания обмоток прибора в случае, когда нарушается соединение шунта и прибора. Вопрос о балластных сопротивлениях, включаемых последовательно с гальванометром, обсуждать не следует.

Далее следует показать, что при изменении сопротивления шунта изменяется цена деления шкалы прибора. Для этого берут демонстрационный гальванометр и подключают к нему шунт на 3 а, поставив соответствующую шкалу. Измерения тока производят в цепи, источником в которой служит батарея аккумуляторов

З-НКН-10, а потребителем какое-нибудь сопротивление порядка 1 *ом* (демонстрационный магазин, либо демонстрационный рычажный реостат). Если выключить цепь и заменить у прибора шунт (с 3 на 10 *а*), то при включении цепи показания прибора изменятся. В действительности ток в цепи тот же самый. Чтобы его правильно измерить, следует заменить шкалу амперметра. Убеждаются, что при замене шкалы прибор дает те же показания, хотя отклонение стрелки меньше.

#### О п ы т 44. Добавочное сопротивление к вольтметру

О б о р у д о в а н и е: батарея аккумуляторов З-НКН-10, демонстрационный вольтметр с добавочными сопротивлениями на 5 и 15 *в*, магазин сопротивлений 1—5 *ом* (демонстрационный) или демонстрационный рычажный реостат, однополюсный ключ и соединительные провода.

При использовании гальванометров, сопротивление которых мало, в качестве вольтметров последовательно с ними включают сопротивления, получившие название дополнительных. Аналогично поступают и в том случае, когда надо расширить пределы измерения вольтметра. На рис. 82 приведена схема включения вольтметра с дополнительным сопротивлением в цепь. Объясняют учащимся, что дополнительное сопротивление  $R_{\text{доп}}$  рассчитывают по формуле

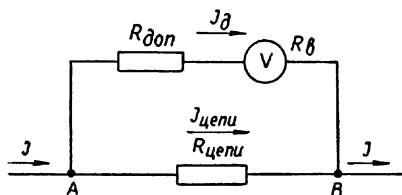


Рис. 82. Схема включения в цепь вольтметра с дополнительным сопротивлением

$$R_{\text{доп}} = R_{\text{в}}(n - 1),$$

где  $R_{\text{в}}$  — сопротивление вольтметра;  $n$  — число, показывающее, во сколько раз расширяются пределы измерения вольтметра.

Затем демонстрируют измерение напряжения с помощью вольтметра с разными дополнительными сопротивлениями. Исследуемая цепь состоит из батареи аккумуляторов, магазина сопротивлений или реостата, соединительных проводов и ключа. Если включить сопротивление порядка 1 *ом*, то падение напряжения на нем будет около 3 *в*, которое и измеряют. Подключают к демонстрационному вольтметру дополнительное сопротивление на 5 *в*, сделав соответствующие переключения на его боковой панели. Измеряют прибором падение напряжения на сопротивлении. Отключают вольтметр и меняют дополнительное сопротивление с 5 *в* на 15 *в*, шкалу при этом не меняют. Измеряют напряжение и наблюдают измене-

ние показаний прибора. Заменяв шкалу прибора шкалой на 15 в, получают те же значения, что и в первом измерении.

В заключение демонстрируют дополнительные сопротивления и обращают внимание на то, что их сопротивления велики в отличие от шунтов. Дополнительные сопротивления могут быть или сменными (демонстрационный вольтметр) или монтируются постоянно в корпусе вольтметра.

#### О п ы т 45. Реостаты

О б о р у д о в а н и е: рычажный демонстрационный реостат, реостат со скользящим контактом (25—30 ом, 5 а), магазин сопротивлений демонстрационный на 10 ом, магазин сопротивлений декадный, ламповый реостат (самодельный).

При изучении реостатов в VIII классе главное внимание обращалось на устройство и принцип действия реостатов со скользящим контактом и магазином сопротивлений. При этом нет возможности уделить большое внимание техническим данным реостатов, величинам их сопротивлений, допустимым токам и т. п. Не рассматривалось также устройство декадных магазинов, ламповых реостатов и способы включения реостатов в цепь. Все это должно быть в центре внимания при повторном изучении реостатов на II ступени обучения.

В первую очередь показывают демонстрационный рычажный реостат и реостат со скользящим контактом. Вызываются учащиеся для того, чтобы прочесть паспорта реостатов.

Более детально демонстрируют магазины сопротивлений. При этом не ограничиваются показом только демонстрационного магазина сопротивления, конструкция которого значительно отличается от обычных магазинов сопротивлений, а демонстрируют какой-либо магазин сопротивлений закрытого типа, например, Р-14. Здесь же объясняют, как осуществляется бифилярная безындукционная обмотка. Бесспорно, физическую сущность действия такой обмотки учащиеся уяснят несколько позднее — при изучении индуктивности.

Помимо штепсельных магазинов сопротивлений, существуют особые декадные магазины сопротивлений, с устройством которых учащиеся не знакомы. В штепсельном магазине сопротивлений для включения последних применяется несколько штепселей. В декадном магазине сопротивлений не требуется большого числа штепселей, а используется лишь один штепсель или переключатель. Для объяснения этого показывают с помощью эпидиаскопа схемы (рис. 83 и 84). На рисунке 83 дается схема включения сопротивлений в декадном магазине при помощи штепселя. Если вставить штепсель в любое гнездо, то получим сопротивление, величина которого обозначена цифрой у гнезда. На рисунке 84 приведена схема другого декадного магазина, в котором переключение осу-

ществляется особыми переключателями. Один из них переключает единицы омов, другой — десятки, третий — сотни, а четвертый — тысячи омов. Например, при положении переключателей, показанном на рисунке 84, включено сопротивление 3473 ом

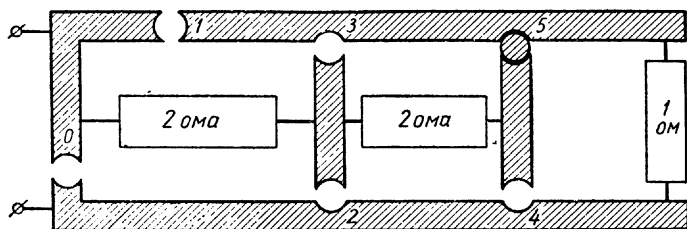


Рис. 83. Схема декадного магазина сопротивлений со штепселем

В заключение демонстрируют самодельный ламповый реостат. Ламповые реостаты применяют в качестве нагрузки в том случае, когда цепь питается от сети переменного тока и потребляется до-

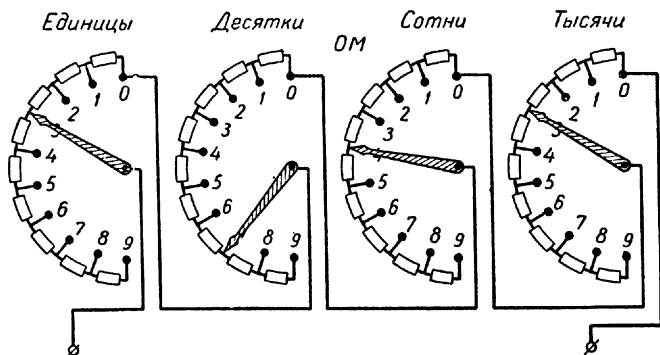


Рис. 84. Схема декадного магазина сопротивлений с переключателями

статочно большая мощность. Обязательно надо объяснить учащимся, что при увеличении числа включенных ламп уменьшается сопротивление цепи, так как лампы включаются параллельно и

$$R_{\text{общ}} = \frac{R_{\text{лампы}}}{n},$$

где  $n$  — число ламп.

Нагрузка же увеличивается, так как в цепи в этом случае проходит больший ток и выделяется большая энергия.

#### Опыт 46. Потенциометрическое включение реостата в цепь

Оборудование: реостаты со скользящим контактом (1000  $\Omega$ , 0,2  $A$  и 25—30  $\Omega$ , 5  $A$ ), лампа для карманного фонаря на стойке, демонстрационный амперметр, демонстрационный вольтметр, батарея аккумуляторов 3-НКН-10, соединительные провода, ключ однополюсный, метр демонстрационный, штатив лабораторный.

Реостаты могут включаться в цепь последовательно для ограничения и изменения тока в цепи. Кроме того, реостаты используют как делители напряжения, или потенциометры. Первая схема включения известна учащимся, но будет польза от повторения опыта. Собирают установку (рис. 85), в которой последовательно в

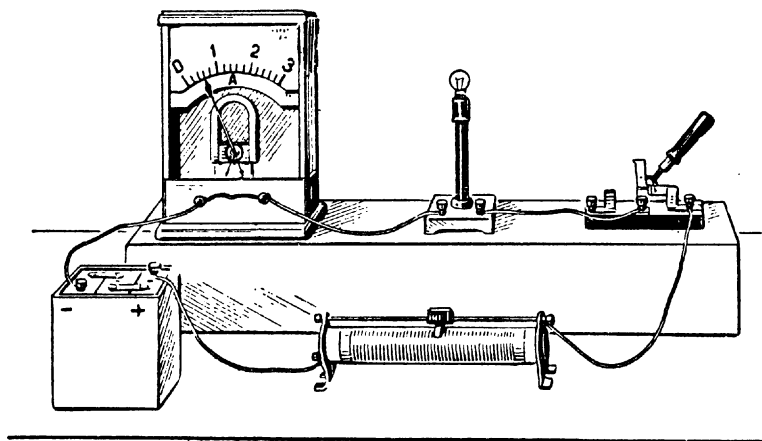


Рис. 85. Последовательное включение реостата в цепь

цепь включены реостат со скользящим контактом (25—30  $\Omega$ , 5  $A$ ) и лампа для карманного фонаря. Для измерения тока включен демонстрационный амперметр со специально подобранным медным шунтом. Меняя сопротивление реостата, показывают изменение тока и яркости свечения лампы.

Когда к потребителю надо подвести определенное напряжение, применяют делители напряжения. В этом случае реостат включается на полное напряжение источника тока, а с части его снимается требуемое напряжение. Падение напряжения пропорционально сопротивлению, а следовательно, пропорционально длине участка реостата, где происходит падение напряжения.

Собирают установку с реостатом, со скользящим контактом (1000  $\Omega$ , 0,2  $A$ ), включив его по схеме делителя напряжения (рис. 86). Вольтметр берут демонстрационный с добавочным сопротивлением на 5  $V$  и с соответствующей шкалой. Перемещая ползунок

реостата, демонстрируют изменение напряжения, снимаемого с него. Это видно по показаниям вольтметра. Показывают также и пропорциональность напряжения сопротивлению и длине однородного проводника (при постоянном сечении). Для этого сзади реостата помещают демонстрационный метр и отмечают положения ползунка и соответствующее напряжение. Потенциометры очень широко применяются в радиотехнических схемах. Показывают радиотехнические потенциометры и объясняют их устройство. Здесь же можно показать и постоянные сопротивления, применяемые в радиотехнике.

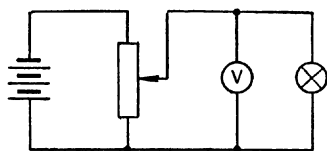


Рис. 86. Схема потенциометрического включения реостата в цепь

## § 6. ЗАКОН ОМА ДЛЯ ПОЛНОЙ ЦЕПИ

Закон Ома вызывает большие затруднения при изучении. Главное затруднение возникает из-за отсутствия наглядной экспериментальной основы при изучении закона. Существует большое число вариантов опытов по закону Ома для полной цепи, но они по сути дела доказывают закон Ома косвенным путем. Наиболее наглядный опыт был предложен М. А. Ушаковым<sup>1</sup>, в котором экспериментально доказывается, что э. д. с. постоянна и равна сумме падений напряжений на внешнем и внутреннем участках цепи  $E = U_{\text{внутр}} + U_{\text{внешн}}$ . Далее, используя закон Ома для участка цепи, приходим к закону

$$I = \frac{E}{R + r}.$$

Обратим внимание на трактовку некоторых понятий. Электродвижущая сила в физике определяется как энергетическая характеристика поля, создаваемого источником. Электродвижущая сила равна работе, необходимой для перенесения единицы заряда по всей замкнутой цепи  $(E = \frac{A_{\text{полн}}}{q})$ . На использованной уже нами модели в виде винтовой наклонной плоскости э. д. с. аналогична работа, совершаемая при подъеме шарика против сил тяжести. В электрической цепи эта работа совершается сторонними силами внутри источника тока, но расходуется данная энергия во всей цепи.

Источники тока, помимо э. д. с., имеют и другие характеристики, например внутреннее сопротивление, емкость, мощность и др

<sup>1</sup> М. А. Ушаков, К изучению законов электрического тока, Учпедгиз 1953, стр. 22.

Две первые характеристики рассмотрим на опыте с химическим источником тока. Электродвижущая сила такого источника тока зависит лишь от того, какие взяты электроды и электролит, но не зависит от массы и размеров электродов. Емкость источника тока или количество электричества, которое за все время работы источника пройдет через поперечное сечение проводников в цепи, наоборот, зависит от количества реагирующих веществ (электродов и электролита).

Закон Ома для полной цепи устанавливает зависимость тока от величины э. д. с. источника тока и полного сопротивления цепи. Данная зависимость значительно сложнее закона Ома для участка цепи ( $I = \frac{U}{R}$ ) и недопустимо отождествление этих законов. Следует разъяснить специфические особенности полной цепи в отличие от участка цепи, где нет источника с э. д. с.

Понятие внутреннего сопротивления усваивается учащимися без больших затруднений.

#### О п ы т 47. Электродвижущая сила и внутреннее сопротивление источника тока

**Оборудование:** стеклянный прозрачный сосуд прямоугольной формы, медная и цинковая пластинки, специальные держатели для пластин, раствор серной кислоты с добавлением двухромовокислого калия в качестве деполяризатора (электролит от элемента Грене), реостат (30 ом, 5 а), демонстрационный вольтметр, демонстрационный амперметр, ключ, соединительные провода.

Собирают электрическую цепь (рис. 87). В качестве источника включают ванну с цинковым и медным электродами и электролитом (рис. 88). Размеры сосуда должны быть таковы, чтобы можно было поместить в нем электроды на расстоянии 120—150 мм. При разомкнутом ключе вольтметр дает некоторые показания. Изменяют положение электродов в ванне, т. е. сближают их и меняют глубину их погружения в электролит. При этом показания вольтметра не изменяются. Вероятно, это некоторая характеристика источника тока, зависящая только от того, какие электроды и какой электролит применены в данном источнике тока. Эту характеристику принято называть э. д. с. источника.

После этого замыкают внешнюю цепь и наблюдают показания вольтметра и амперметра. Хотя нет еще всего необходимого для доказательства различия между э. д. с. и напряжением, сообщают учащимся, что вольтметр показывает напряжение, а амперметр — ток в цепи.

Но главная цель опыта не в этом. Необходимо ввести еще одну характеристику источника тока — внутреннее сопротивление. Не изменяя нагрузку во внешней цепи, изменяют расстояние между электродами, меняют глубину их погружения в электролит.



При этом изменяются как ток, так и напряжение. Здесь следует главное внимание обратить на изменения тока. При увеличении расстояния между электродами ток уменьшается. В чем причина уменьшения? Вероятно, только в изменении сопротивления на участке внутри источника. То же самое происходит и при уменьшении глубины погружения электродов в электролит.

Указывают учащимся, что ток в цепи зависит не только от внешнего сопротивления  $R$ , но и от внутреннего сопротивления  $r$ . Характер зависимости тока от э. д. с. и сопротивления цепи определяется законом, получившим название закона Ома для полной цепи.

Демонстрация может быть осуществлена также с элементом Грене. В данном элементе имеется возможность изменять глубину

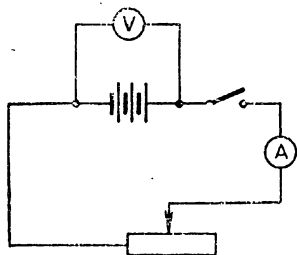


Рис. 87. Схема электрической цепи для введения понятий э. д. с. и внутреннего сопротивления

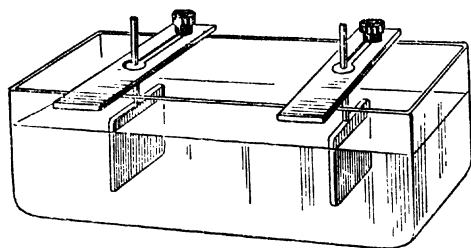


Рис. 88. Прибор для демонстрации закона Ома для полной цепи

погружения в электролит цинкового электрода. Это достаточно, чтобы показать, что  $E = \text{Const}$ , если внешняя цепь разомкнута, а также, что ток во внешней цепи зависит от внутреннего сопротивления источника тока.

#### Опыт 48. Закон Ома для полной цепи

**Оборудование:** стеклянный прозрачный сосуд прямоугольной формы, медная и цинковая пластинки, раствор серной кислоты с добавлением двуххромовокислого калия, реостат ползунковый (30 ом, 5 а), амперметр и вольтметр I класса точности или демонстрационные амперметр и вольтметр, соответствующим образом градуированные, щупы для подключения прибора к различным точкам электролита, соединительные провода.

В сосуд наливают электролит и опускают электроды — медную и цинковую пластинки. Пластинки укрепляются в специальных держателях, позволяющих регулировать расстояние между пластинками и изменять этим путем внутреннее сопротивление источ-

ника тока. В качестве нагрузки применяется реостат со скользящим контактом. В опыте внешнее сопротивление берется вначале порядка 10 ом.

Ток и напряжение в цепи должны измеряться приборами I-го класса точности, так как в противном случае нельзя получить удовлетворительного результата. Если делать из эксперимента не количественные, а лишь качественные выводы, можно применять и демонстрационные амперметр и вольтметр. Для этого нужно предварительно подобрать к ним шунт и дополнительное сопротивление

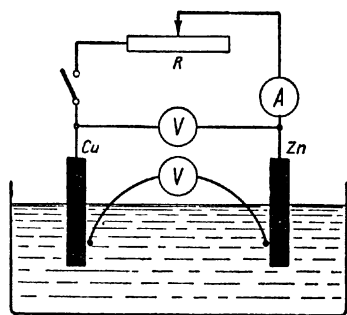


Рис. 89. Принципиальная схема опыта по закону Ома для полной цепи

и отградуировать их в соответствующем интервале, так как напряжение, измеряемое прибором в опыте около 1 в, а демонстрационный вольтметр, имеет дополнительные сопротивления на 5 и 15 в. Гальванометры старых выпусков имеют дополнительные сопротивления на 1 в и могут быть использованы непосредственно. Ток в измеряемой цепи составляет десятки и сотни миллиампер и поэтому применять амперметр с шунтами на 3 и 10 а бессмысленно.

Измерения производят по схеме, показанной на рисунке 89. Напряжение на зажимах источника тока  $U_1$ , а второй — между двумя

точками в электролите, находящимися в непосредственной близости от электродов  $U_2$ . Напряжение  $U_1$  соответствует падению напряжения во внешней цепи, а  $U_2$  — во внутренней цепи.

Включение вольтметра для измерения величины  $U_2$  осуществляется с помощью двух щупов, изготовленных из химически однородного металла. В простейшем случае это просто два провода, опущенные в раствор. Щупы не должны касаться электродных пластин и в то же время должны быть в непосредственной близости от них. Наиболее просто это осуществить путем крепления щупов к стерженькам из изолирующего материала. В этом случае касаются одной стороной стерженька электрода, а щуп, присоединенный к другой его стороне, оказывается при этом изолированным от последнего.

Щупы должны иметь малую площадь по сравнению с площадью электродов элемента. В противном случае они будут влиять на показания вольтметра, измеряющего напряжение на внешней цепи.

При демонстрации опыта, не замыкая цепь, измеряют  $U_1$ . Затем измеряют  $U_2$  и убеждаются, что при любых положениях щупов  $U_2 = 0$ . Следовательно, нет падения напряжения на внутреннем сопротивлении источника тока при разомкнутой внешней цепи.

Затем замыкают внешнюю цепь и несколько раз измеряют величину  $U_1$  и  $U_2$  при разных нагрузках, постепенно изменяя сопротивление в цепи. Последнее измерение производят при коротком замыкании, но при этом следует выключить амперметр. Полученные значения напряжений  $U_1$  и  $U_2$  записывают на доске и убеждаются, что сумма этих напряжений остается постоянной. Можно сделать вывод, что  $U_1 + U_2 = \text{Const}$ . Значения тока не нужны при выводе закона Ома для полной цепи, но они необходимы для построения графика зависимости напряжения на внешней цепи от тока.

Сумма внешнего и внутреннего падений напряжения, остающаяся постоянной при любом режиме работы цепи, таким образом, является энергетической характеристикой источника тока. Эта величина определяет способность источника тока расходовать энергию при перемещении по всей замкнутой цепи единицы количества электричества. В соответствии с принятым определением это будет э. д. с.

Итак,  $U_1 + U_2 = E$ . Используя закон Ома для участка цепи, записывают, что  $U_1 = IR$ , а  $U_2 = Ir$ , где  $R$  и  $r$  — соответственно сопротивления внешней и внутренней цепей.

Тогда

$$IR + Ir = E \quad \text{или} \quad I = \frac{E}{R + r}.$$

Последнее соотношение и является законом Ома для полной цепи. Здесь необходимо разъяснить, что э. д. с. является характеристикой поля, создаваемого источником тока. Электродвижущая сила равна сумме падений напряжения на внутренней и внешней цепях. Отсюда, э. д. с. и напряжение на зажимах источника численно равны лишь в случае отсутствия тока. Во всех других случаях напряжение не равно э. д. с., а меньше его. Электродвижущая сила может быть измерена электростатическим вольтметром, если его подключить к зажимам источника тока при отключенной внешней цепи.

Закон Ома для полной цепи может быть выведен и исходя из закона сохранения и превращения энергии. Действительно, работа, совершаемая во всей цепи, равна сумме работ на внешней и внутренней цепях

$$A_{\text{полн}} = A_{\text{внешн}} + A_{\text{внутр}}.$$

Разделим все члены равенства на заряд  $q$

$$\frac{A_{\text{полн}}}{q} = \frac{A_{\text{внешн}}}{q} + \frac{A_{\text{внутр}}}{q}.$$

Из определения э. д. с.  $E = \frac{A_{\text{полн}}}{q}$  и напряжение  $U = \frac{A}{q}$  можем записать  $E = U_{\text{внешн}} + U_{\text{внутр}}$ .

Далее вывод формулы аналогичен описанному выше. Однако несмотря на изящество данного вывода, экспериментальный подход дает значительно больший эффект.

В заключение обратим еще раз внимание, что опытным путем мы не получаем закон Ома для полной цепи. Опыт лишь доказывает, что  $E = \text{Const}$  и, кроме того,  $E = U_{\text{внутр}} + U_{\text{внешн}}$ . Закон Ома для полной цепи может быть выведен из данного опытного результата, если применить известный нам закон Ома для участка цепи.

#### Опыт 49. Различие между э. д. с. источника и напряжением

**Оборудование:** батарея аккумуляторов 3-НКН-10 или 5-НКН-22, реостат со скользящим контактом (30 ом, 5 а), демонстрационный амперметр, электростатический вольтметр, ключ, соединительные провода.

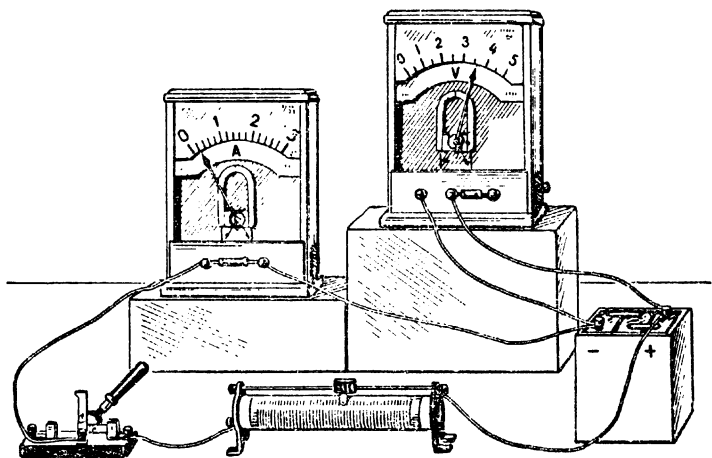


Рис. 90. Установка для демонстрации различия между э. д. с. и напряжением

динительные провода, центробежный водяной насос с электродвигателем, гидродинамическая вертушка, расходомер, чувствительный манометр, трубки соединительные, кран, штатив лабораторный, автотрансформатор Латр-1 или Латр-2.

Собирают электрическую цепь, последовательно соединив батарею аккумуляторов, реостат и ключ (рис. 90). Ток измеряют демонстрационным амперметром, а напряжение — электростатическим вольтметром<sup>1</sup>. К амперметру подключен шунт на 3 а.

<sup>1</sup> При отсутствии электростатического вольтметра можно применить демонстрационный вольтметр с добавочным сопротивлением на 5 в.

При разомкнутой цепи тока нет и практически вольтметр измеряет э. д. с. источника тока. Заметив показания прибора, замыкают цепь и наблюдают уменьшение показаний его. В этом случае вольтметр измеряет уже не э. д. с., а напряжение на зажимах источника тока. Значение напряжения меньше значения э. д. с. Уменьшая сопротивление цепи, наблюдают увеличение тока и одновременное уменьшение напряжения. Записывают при этом 2 или 3 значения токов и напряжений.

Несколько значений  $I$  и  $U$ , полученных в опыте, дают возможность построить график зависимости напряжения от тока (рис. 91).

Точки пересечения наклонной прямой с осями координат дают значения э. д. с. (точка  $A$ ) и тока короткого замыкания (точка  $B$ ). Полезно дополнить график горизонтальной прямой  $E = \text{Const}$ . Для любого тока ордината до наклонной прямой дает значение  $U_{\text{внешн}}$ , а отрезок от нее до горизонтальной прямой  $E = \text{Const}$  показывает  $U_{\text{внутр}}$ .

Действительно,

$$E = U_{\text{внутр}} + U_{\text{внешн}} = \text{Const}.$$

Зависимость напряжения от тока может быть объяснена. Дело

в том, что при увеличении тока в цепи увеличивается падение напряжения внутри источника тока ( $U_{\text{внутр}} = Ir$ ), а  $U_{\text{внешн}}$  уменьшается. Следует обратить внимание учащихся на то, что объяснение данной зависимости требует применение закона Ома для полной цепи, и ни в коем случае нельзя исходить из зависимости

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

Кроме того, необходимо исходить при объяснении и из того, что э. д. с. характеризуется энергией, которую израсходовал бы источник тока для перенесения единицы заряда по всей цепи; напряжение же характеризуется энергией, которую расходует источник тока при перемещении единицы заряда только на внешней цепи.

Отличие э. д. с. от напряжения и зависимость напряжения от тока в цепи очень хорошо иллюстрируется с помощью гидродинамической аналогии электрической цепи. Для тока воды и напора в водяном потоке существует совершенно аналогичная зависимость. В данном случае простейшая гидродинамическая установка дополняется расходомером, являющимся аналогом амперметра, и чувствительным манометром — аналогом вольтметра (см. рис. 2).

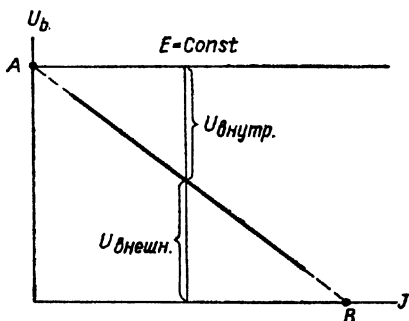


Рис. 91. График зависимости напряжения от тока в электрической цепи

Когда кран *б* закрыт, манометр показывает максимальную разность давлений, максимальный напор, который мы сопоставляем с э. д. с. Открывают кран вначале незначительно — ток небольшой, и манометр показывает разность давлений, несколько меньшую. Эта разность давлений аналогична напряжению. Если же кран открыть полностью, то ток увеличится, разность давлений уменьшится.

Помимо этого, полезно различать э. д. с. и напряжение таким образом: э. д. с. — это характеристика поля, создаваемого источником тока, и определяется как  $\frac{A_{\text{стор}}}{q}$ , т. е. работой сторонних сил; напряжение же характеризует энергию электростатического поля. При отсутствии на данном участке цепи источника тока напряжение равно разности потенциалов между двумя точками в поле, т. е. на участке цепи.

#### О п ы т 50. Соединение элементов в батарее

Оборудование: три банки щелочного аккумулятора (НКН-10 или НКН-22), демонстрационный вольтметр и соединительные провода.

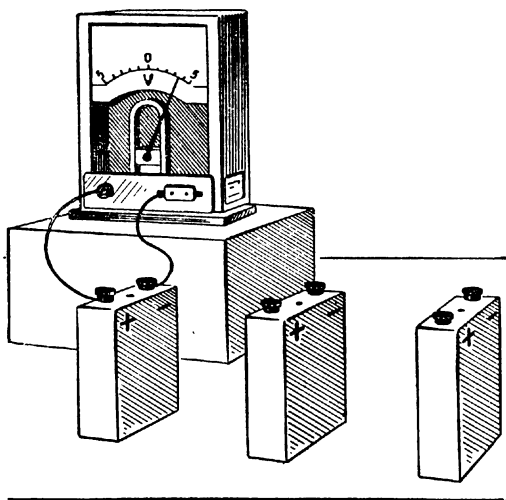


Рис. 92. Соединение элементов в батарее

Для измерения э. д. с. батареи на демонстрационном столе располагают на некотором расстоянии друг от друга три банки щелочного аккумулятора (рис 92). Чтобы обеспечить лучшую видимость, демонстрационный вольтметр (с дополнительным сопротивле-

нием на 5 в) располагают сзади банок на подставке. Подключая вольтметр поочередно к клеммам всех элементов, измеряют их э. д. с.  $E_1$ ,  $E_2$  и  $E_3$ . Если элементы одинаковы, то  $E_1 = E_2 = E_3$ . Затем соединяют элементы последовательно и измеряют э. д. с. всей батареи. Опыт показывает, что  $E_{\text{бат}} = E_1 + E_2 + E_3$  или  $E = nE_{\text{эл}}$ . Соединяют элементы параллельно и вновь измеряют э. д. с. батареи. Оказывается,

$$E_{\text{бат}} = E_{\text{эл}}.$$

Внутренние сопротивления батареи непосредственно не измеряют, а вычисляют с помощью закона Ома для полной цепи. Внутреннее сопротивление элементов вычисляют по формулам последовательного и параллельного соединений сопротивлений (измерению внутреннего сопротивления посвящена специальная лабораторная работа).

Выполненная работа позволяет обобщить закон Ома для полной цепи на случай, когда в качестве источника тока применяется батарея элементов или аккумуляторов. Записывают обобщенный закон Ома для последовательно соединенных элементов в виде

$$I = \frac{nE_{\text{эл}}}{R + r_{\text{эл}} n}$$

и для параллельно соединенных элементов

$$I = \frac{E_{\text{эл}}}{R + \frac{r_{\text{эл}}}{n}}.$$

Случай смешанного соединения элементов в батарее подробно не рассматривают. Можно вызвать одного учащегося и дать ему задание собрать батарею из трех элементов, соединив их смешанным способом. Затем учащиеся класса подсчитывают э. д. с. данной батареи, а вычисленный результат проверяют на опыте  $E_{\text{бат}} = 2 E_{\text{эл}}$ . Определяют также  $r_{\text{бат}}$  ( $r_{\text{бат}} = r_{\text{эл}} + \frac{r_{\text{эл}}}{2} = \frac{3}{2} r_{\text{эл}}$ ).

## § 7. РАБОТА И МОЩНОСТЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА. ЗАКОН ДЖОУЛЯ-ЛЕНЦА

Если в 8-летней школе понятие работы и мощности вводится лишь на основе эксперимента, то на II этапе обучения есть возможность углубления этого материала. Учащиеся знакомы с понятием электрического поля и умеют вычислять работу, совершенную при перемещении заряда в электрическом поле. Искомая работа и есть работа по перемещению зарядов электрическим полем. Поэтому работу тока определяют из известного соотношения  $A = q (\varphi_2 -$

—  $\varphi_1$ ). Если заменить заряд  $q$  произведением тока на время прохождения ( $It$ ), а разность потенциалов  $\varphi_2 - \varphi_1$  напряжением  $U$ , то  $A = IUt$ . Или  $A = I^2 R t$ ,  $A = \frac{U^2}{R} t$ , если заменить один из сомножителей, пользуясь законом Ома для участка цепи.

Естественно, теперь получить и формулы мощности, так как мощность определяется работой, совершаемой в единицу времени

$$P = I \cdot U = I^2 R = \frac{U^2}{R}.$$

Также при изучении внутренней энергии давалось понятие об эквивалентности работы и теплоты и разъяснялся физический смысл механического эквивалента теплоты и термического эквивалента работы. Это дает возможность теоретически подойти к закону Джоуля-Ленца, основному закону, характеризующему тепловое действие тока. Если работа эквивалентна теплоте, то, зная работу

$$A = I^2 R t,$$

определяем  $Q = 0,24A = 0,24I^2 R t$ . Конечно, применимы и другие формулы

$$Q = 0,24 \cdot I \cdot U \cdot t = 0,24 \frac{U^2}{R} \cdot t.$$

Однако закон Джоуля-Ленца записывается в виде

$$Q = 0,24 \cdot I^2 R t,$$

так как в этом виде формула справедлива для любой цепи; другие же формулы применимы лишь в определенных условиях. Вообще же закон Джоуля-Ленца может быть записан и в виде

$$Q = I^2 R t,$$

если количество теплоты измерять не в калориях, а в джоулях. Теоретическое рассмотрение закона Джоуля-Ленца должно быть дополнено разъяснением механизма самого явления нагревания проводника при прохождении тока. Дело в том, что электроны, взаимодействуя с атомами кристаллической решетки, передают им свою кинетическую энергию, приобретенную в электрическом поле. Это взаимодействие напоминает упругий удар. Когда электрон приближается к атому, то силы отталкивания тормозят его и одновременно смещают атом, увеличивая отклонения последнего от положения равновесия. Кинетическая же энергия колебания атомов пропорциональна абсолютной температуре тела. Естественно, происходит нагрев проводника.

Казалось бы, все содержание данного раздела достаточно глубоко вскрывается при таком теоретическом рассмотрении, особенно, если учесть, что простейшие демонстрации уже были осуществ-



влены в VIII классе. Однако и теперь все эти рассуждения и правильные, строгие логические выводы должны быть подкреплены экспериментом. Даже, если данный эксперимент и не будет играть первостепенную роль при формировании рассматриваемых понятий, все же значение его трудно переоценить. Этим и вызвано приведенное ниже описание нескольких демонстраций по работе и мощности электрического тока, измерению мощности и закону Джоуля-Ленца.

Несколько предварительных замечаний по этим демонстрациям. Обычно о работе электрического тока судят по свечению электрических лампочек, включенных в электрическую цепь. Такой эксперимент, несмотря на его кажущуюся простоту, не убедителен для учащихся. Основной недостаток данного эксперимента заключается в том, что учащиеся не видят совершения работы, о которой и идет речь.

Поэтому лучше провести демонстрацию работы электрического тока на установке с электродвигателем, поднимающим груз. В этом случае легко подсчитать совершенную работу ( $A = Ph$ ), а также удастся качественно показать зависимость работы от тока, напряжения и времени прохождения тока.

Для этой демонстрации могут быть использованы различные электродвигатели, например двигатель от стеклоочистителя автомашин, двигатель от швейной машины, который сейчас применяется в качестве универсального школьного двигателя. Питается двигатель от сети, но возможно и питание постоянным током, так как он коллекторный. Чтобы время подъема груза было достаточно большим, ось, на которую навивается нить, должна быть малого диаметра. Возможно применить здесь редуктор, используя для этой цели центробежную машину. Нить перекидывается через

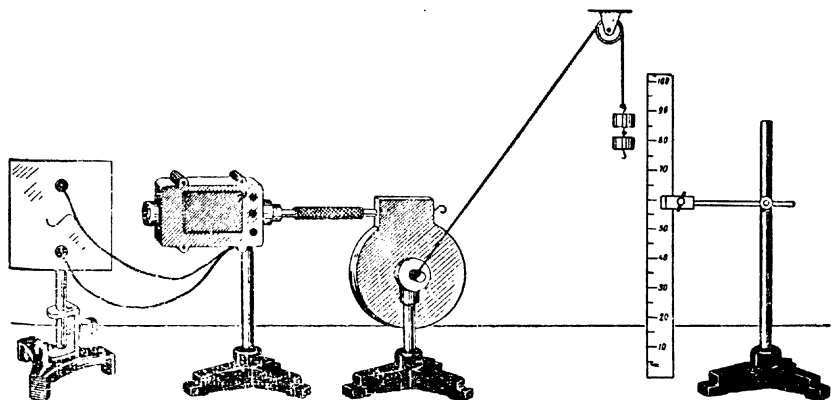


Рис. 93. Установка для демонстрации работы электрического тока

блок, который укрепляется на максимально возможной высоте (у потолка) (рис. 93).

О потребляемой мощности можно качественно судить по произведенной работе и количеству выделенной теплоты.

Демонстрация по измерению мощности постоянного тока имеет главную цель познакомить учащихся с принципом действия и устройством простейшего ваттметра электродинамической системы.

### О п ы т 51\*. Работа электрического тока

**Оборудование:** универсальный электродвигатель, электродвигатель от стеклоочистителя, реостат (50—60 *ом*, 2 *а*), демонстрационный амперметр, демонстрационный вольтметр, груз 0,5—1 *кг*, блок, суровая нить (или леска), демонстрационный метр, ключ, соединительные провода.

Собирают цепь питания для универсального электродвигателя, включают последовательно реостат и демонстрационный амперметр с шунтом на 3 *а* и подключаются к клеммам выпрямителя демонстрационного щита (рис. 93). При включении двигателя груз за 60—80 *сек* поднимается на некоторую высоту.

Увеличив ток в цепи ( $I_2 > I_1$ ), заметим, что за то же время груз будет поднят на высоту  $h_2 > h_1$ . Уменьшив ток до величины  $I_3 < I_1$ , замечаем, что за то же время груз поднимется на высоту  $h_3 < h_1$ .

Опыт дает возможность сделать вывод, что совершаемая работа пропорциональна току ( $A \sim I$ ).

Если есть два двигателя разной мощности, но работающие примерно при одном и том же токе, то возможно опытно показать и зависимость  $P \sim U$ . Для этого двигатели соединяют последовательно. Естественно, токи равны  $I_1 = I_2$ , но падения напряжений на двигателях разные  $U_1 \neq U_2$ . Работа, производимая этими двигателями, пропорциональна напряжению  $U$ , о чем свидетельствует разная высота подъёмов грузов. На основании такого опыта получают

$$A \sim U.$$

Без демонстрации очевидно, что при большем времени действия будет больше и совершенная работа, т. е.  $A \sim t$ .

Объединяя результаты наблюдений, записывают

$$A \sim IUt \text{ или } A = kIUt.$$

При пользовании одной системой единиц «СИ» коэффициент пропорциональности  $k = 1$  и формула приобретает вид

$$A = IUt.$$

## Опыт 52. Мощность электрического тока

**Оборудование:** две лампы накаливания на 127 в мощностью 96 и 10 *вт*, два патрона для ламп на панельках, демонстрационный амперметр, демонстрационный вольтметр, соединительные провода, ключ однополюсный.

Потребители энергии — лампы накаливания преднамеренно взяты с разными мощностями и чем больше разница мощностей, тем более эффектен опыт. Питание ламп осуществляется от городской сети переменного тока 127 или 220 в.

Вначале оценивают сопротивление ламп. Лампа большей мощности имеет меньшее сопротивление, и наоборот. Это видно при непосредственном рассматривании нитей накала ламп.

Соединяют лампы параллельно и обсуждают с учащимися, какой результат следует ожидать при включении ламп в сеть. Напряжение на лампах одинаковое, а ток различен. Большой ток проходит через лампу 96 *вт*, так как ее сопротивление меньше.

Включают лампы в сеть и наблюдают, что свечение их различно: большая работа, действительно, совершается в лампе 96 *вт*. Убеждаются, измерив токи, что через эту лампу проходит и больший ток. Естествен вывод, что мощность зависит от тока. Несмотря на то, что точно характер этой зависимости не установлен, сообщают учащимся, что данная зависимость — прямая пропорциональность и записывают  $P \sim I$  при  $U = \text{Const}$ .

Соединив лампы последовательно, спрашивают: «Какая лампа будет ярче светиться?» Следует ожидать разные ответы, так как не все учащиеся смогут сразу представить происходящее при этом перераспределении напряжения. Включают лампы в сеть и обнаруживают, что ярко светится лампа 10 *вт*, имеющая большее сопротивление. Измеряют демонстрационным вольтметром напряжение на лампах. Вольтметр переключают на боковой панели на переменное напряжение и подключают к нему дополнительное сопротивление на 250 в.

Опыт наглядно показывает, что там, где больше напряжение, и больше мощность. Так как ток в цепи (при последовательном соединении) одинаков, делают естественный вывод о зависимости мощности от напряжения. Снова без строгого доказательства сообщают, что данная зависимость — прямая пропорциональность, и записывают  $P \sim U$  при  $I = \text{Const}$ .

Обобщают результаты опыта:  $P \sim I \cdot U$  или  $P = kIU$ .

При использовании единиц системы «СИ»  $k = 1$  и  $P = IU$ .

Перераспределение напряжения в цепи объясняется тем, что при последовательном соединении проводников падение напряжения пропорционально сопротивлениям. На этом основании записывают

$$U_{\text{сети}} = U_{\text{лампы1}} + U_{\text{лампы2}} \text{ и } \frac{U_{\text{лампы1}}}{U_{\text{лампы2}}} = \frac{R_1}{R_2}.$$

Вычисляют  $R_1$  и  $R_2$  ( $R = \frac{U^2}{P}$ ), а также значения  $U_{\text{лампы 1}}$  и  $U_{\text{лампы 2}}$ .

Их сравнивают с показаниями вольтметра, измерив вновь напряжение на лампах. Опыт дает достаточно хорошее совпадение с расчетом.

Следует обратить внимание учащихся, что указанная мощность потребителей электрической энергии будет выделяться лишь в том случае, если напряжение соответствует установленному для данного потребителя. Поэтому, строго говоря, неправильны выражения «мощность лампы», «мощность прибора», так как мощностью обладает электрический ток. Следует говорить о мощности электрического тока в лампе, в приборе либо о произведенной работе током при прохождении через данный прибор.

### Опыт 53. Измерение мощности тока. Ваттметр

**Оборудование:** демонстрационные ваттметр, амперметр и вольтметр, ламповый реостат, ключ однополюсный, соединительные провода.

В цепи постоянного тока, где происходит полное и необратимое превращение электрической энергии в другие виды энергии, мощность можно определить с помощью амперметра и вольтметра. В цепях переменного тока, если нагрузка не чисто активная, необходимо еще учитывать косинус угла сдвига фаз между током и напряжением. Практически в этом случае мощность измеряют специальным прибором — ваттметром.

Конструкция ваттметра подробно изучается в курсе электротехники, в физике рассматривают лишь принцип действия данного прибора. Ваттметры в основном бывают электродинамической системы. Принцип действия приборов этой системы может быть объяснен в этом месте курса, опираясь на знания учащихся из VIII класса. Учащимся сообщают и показывают, что в ваттметре имеются две катушки, причем одна из них включается в цепь последовательно с нагрузкой, а другая — параллельно нагрузке. Последовательно включенная обмотка имеет малое сопротивление и через нее проходит почти весь ток, а параллельно включенная обмотка имеет большое сопротивление. Первая намотана толстым проводом, а вторая — тонким. Обычно токовая обмотка неподвижна, а обмотка напряжения делается подвижной и помещается внутри токовой обмотки. Без доказательства сообщают учащимся, что в результате взаимодействия этих обмоток и получаются отклонения стрелки, пропорциональные как току  $I$ , так и напряжению  $U$ . В опыте использован демонстрационный ваттметр, описание которого дано в главе I. Возможно применение технических щитовых ваттметров. Измерения проводят в цепи переменного тока. Провести опыт в цепи постоянного тока значительно сложнее, так как

нужен источник тока большой мощности. В цепи же переменного тока при включении в качестве нагрузки ламп накаливания практически сдвига фаз между током и напряжением не будет и  $\cos \varphi = 1$ . Обращать здесь на это внимание учащихся не следует.

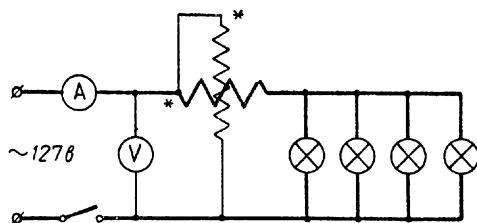


Рис. 94. Принципиальная схема включения ваттметра

Схема включения приборов приведена на рисунке 94, а общий вид установки на рисунке 95. Собирают установку<sup>1</sup>, объясняют включение ваттметра и замыкают цепь при всех включенных лампах в ламповом реостате. Сняв показания амперметра и вольтмет-

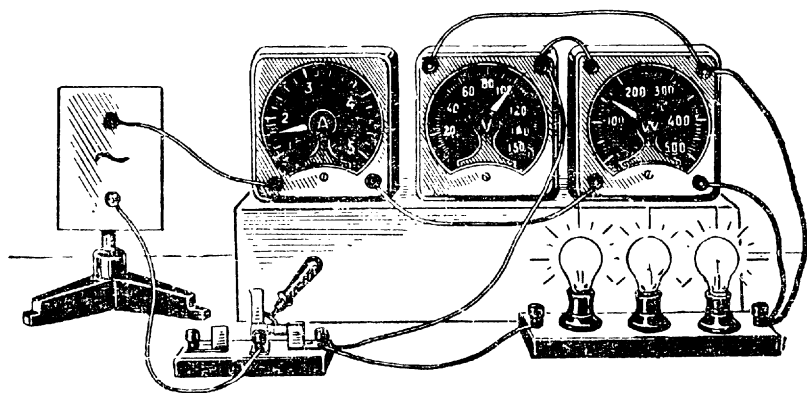


Рис. 95. Установка для демонстрации ваттметра и измерения мощности

ра, определяют мощность тока по формуле  $P = UI$ . Полученный результат сравнивают с показаниями ваттметра. Для обеспечения хорошего совпадения показаний ваттметра с вычисленным значением мощности следует в качестве нагрузки брать лампы большой мощности (150—200 *вт*).

<sup>1</sup> Амперметр и вольтметр переключают на переменный ток с шунтом на 10 а и дополнительным сопротивлением на 250 в.

Выключая часть ламп в ламповом реостате, наблюдают изменения показаний приборов. При этом изменение напряжения будет незначительным, но хорошо видно изменение тока и пропорциональные ему изменения мощности. Такие измерения проводят для двух-трех нагрузок. Проведение повторных измерений и расчетов целесообразно поручать учащимся.

### О п ы т 54 \*. Закон Джоуля-Ленца

**Оборудование:** три химических стакана, три спиральки проволоочные (2 ом) на колодке, батарея аккумуляторов 5-НКН-22, реостат со скользящим контактом 25—30 ом на ток 2—3 а, соединительные провода, ключ, керосин для наполнения калориметров, термометр демонстрационный<sup>1</sup>, весы или мензурка.

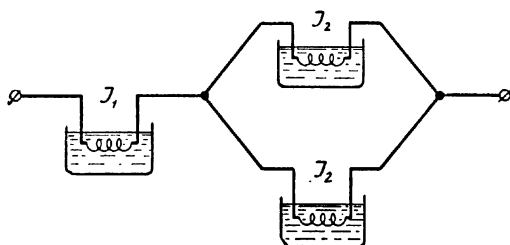


Рис. 96. Схема соединения спиралей при демонстрации зависимости количества выделенной теплоты от тока

В опыте показывается лишь качественно, что количество выделенной при прохождении тока теплоты пропорционально квадрату величины тока, сопротивлению проводника и времени прохождения тока.

В химические стаканы наливают отмеренные мензуркой равные количества керосина, достаточные для погружения проволоочных спиралек (200—250 г). Важно лишь то, чтобы количества керосина во всех случаях были одинаковы, так как будут проводиться сравнения без количественных расчетов. С помощью демонстрационного термометра определяют начальную температуру  $t_1$  керосина.

О количестве выделенной теплоты будем судить по изменениям температур ( $\Delta t = t_2^\circ - t_1^\circ$ ) керосина. Действительно, количество теплоты определяется формулой  $Q = cm(t_2^\circ - t_1^\circ) = cm\Delta t^\circ$ . Но в опыте  $m = \text{Const}$  и  $c = \text{Const}$ , поэтому  $Q = \Delta t^\circ$ .

Для демонстрации собирают электрическую цепь, в которую включены три спиральки (рис. 96), опущенные в стаканы с керо-

<sup>1</sup> Целесообразно применение демонстрационного термометра конструкции В. А. Бу р о в а, см. журнал «Физика в школе», 1961, № 2, стр. 84.

сином, батарея аккумуляторов и реостат для ограничения тока. При соединении спиралек согласно рисунка 96 через первую из них будет проходить ток  $I_1$ , который в два раза больше токов  $I_2$ , проходящих через вторую и третью параллельно соединенные спиральки ( $I_1 = 2I_2$ ).

Чтобы опыт был непродолжительным, следует брать ток порядка 2а. Во время демонстрации его не измеряют, а подбирают соответствующее сопротивление реостата заранее.

Заметив время, включают цепь. Через несколько минут выключают ее и определяют, как изменилась температура керосина в стаканах. В опыте получается, что изменение температуры в первом стакане в четыре раза больше, чем соответствующие изменения температуры во втором и третьем стаканах. Естественно сделать

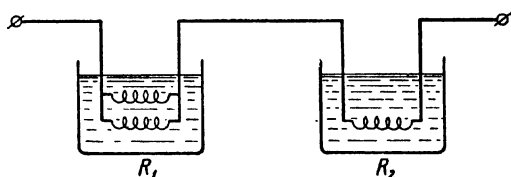


Рис. 97. Схема соединения спиралей при демонстрации зависимости количества выделенной теплоты от сопротивления

вывод, что количество теплоты, выделяемое в проводнике при прохождении тока, пропорционально квадрату тока ( $Q \sim I^2$ ).

После этого устанавливают зависимость количества теплоты от сопротивления. Для этого в первую очередь монтируют спиральку сопротивлением 1 ом (на одной колодке соединяют параллельно две спирали по 2 ом). Опыт производят с двумя стаканами. В один из них опускают спираль сопротивлением 1 ом, а в другой — спираль 2 ом и соединяют их последовательно (рис. 97). В остальном опыт проводят так же, как первый.

Температура во втором стакане изменяется в два раза больше, чем в первом. Следовательно, в нем выделилось в два раза большее количество теплоты ( $Q_2 = 2Q_1$ ). Но  $R_2 = 2R_1$  и при постоянстве тока можно сделать вывод, что количество выделенной теплоты пропорционально сопротивлению проводника ( $Q \sim R$ ).

Легко показать и пропорциональность количества теплоты времени прохождения тока ( $Q \sim t$ ).

Таким образом, обобщая полученные зависимости, записывают  $Q \sim I^2 R t$  или  $Q = k I^2 R t$ . Принято количество теплоты измерять в калориях, тогда  $k = 0,24 \frac{\text{кал}}{\text{дж}}$  и  $Q = 0,24 I^2 R t$ .

Демонстрационный опыт преследует лишь цель качественного установления зависимостей.

## § 8. ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСТВО

При изучении термоэлектричества показывают возникновение термо э. д. с. при разной температуре двух контактов различных металлов. Термоэлектрическую цепь можно рассматривать как своеобразную тепловую машину, но в средней школе более целесообразно рассматривать термоэлектрические явления, как случай превращения внутренней энергии в электрическую энергию.

Демонстрации по данному разделу не должны быть многочисленными, хотя есть большие возможности показа различных применений термоэлектричества. Главная цель демонстраций показать принцип действия термопары и возможность получения значительно больших термо э. д. с. в термобатареях или термостолбиках.

Заметим, что основной методической ошибкой при демонстрациях по термоэлектричеству является маскирование второго спая термопары. Это маскирование не умышленное, особенно в случае применения готовых термопар. При этом учащиеся видят контакт между двумя металлами, а другой контакт от них скрыт. Поэтому в демонстрационных опытах нецелесообразно на первых порах применять готовые термопары, а следует изготавливать термопару, на которой явно видны два контакта.

### О п ы т 55. Термопара

**Оборудование:** демонстрационные термопара и гальванометр, спиртовка, соединительные провода.

Демонстрационная термопара — самодельная. Изготавливается она из стальной или никелиновой проволоки диаметром порядка 1 мм и длиной около 30—40 см. На зачищенные концы проволоки навивают медные проводники. Термопару укрепляют на какой-либо изолирующей подставке. Концы медных проводников присоединяют к клеммам гальванометра. Рекомендуемое расположение приборов показано на рисунке 98.

Когда оба контакта имеют одинаковую температуру, термо э. д. с. равна нулю и гальванометр не показывает тока. Нагревают один из контактов спиртовкой. При этом возникает э. д. с., величина которой зависит от разности температур контактов  $t_2^\circ - t_1^\circ$ . Гальванометр показывает вначале очень небольшой ток, но по мере увеличения температуры нагреваемого контакта ток растет. Заменяют направление, в котором отклоняется стрелка.

Охлаждают мокрой тряпкой первый контакт. Показания гальванометра уменьшаются и становятся равными нулю, когда температуры контактов равны.

При нагревании второго контакта стрелка гальванометра станет отклоняться в другую сторону, что свидетельствует об изменении направления термотока.



Наблюдаемое явление можно объяснить изменением условий в контакте двух металлов при изменении температуры. Электронный газ в каждом из металлов имеет различную плотность. В контакте этих металлов возникает некоторая разность потенциалов между металлами, благодаря которой устанавливается равновесное состояние в электронном газе. Если же один из контактов нагреть, то указанное равновесие установится уже при другой разности потенциалов между металлами. Таким образом, между контактами (холодным и горячим) возникает электрическое поле, а в цепи — термоток (рис. 99).

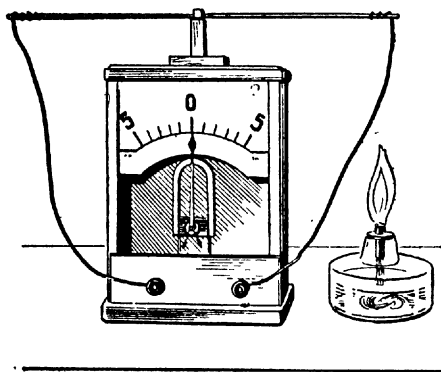


Рис. 98. Опыт с термопарой

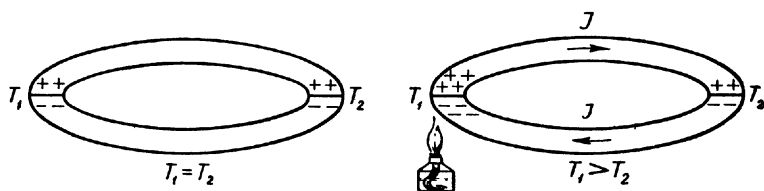


Рис. 99. К объяснению возникновения термотока

## Опыт 56. Термостолбик

**Оборудование:** термостолбик, зеркальный гальванометр, демонстрационный гальванометр, соединительные провода, осветительная лампа.

Термостолбики применяют в основном для демонстрации теплового излучения, так как совместно с зеркальным гальванометром они являются очень чувствительным индикатором. Вообще же можно ограничиться лишь объяснением устройства термостолбика и демонстрацией его действия и без зеркального гальванометра.

Термостолбик представляет собой батарею из 50 последовательно соединенных термоэлементов, где используется контакт константана и нихрома.

Одни спаи термопар не облучают, а на другие падает излучение от нагретых тел.

При демонстрации с термостолбика вначале снимают конусообразную насадку, раздвигают щель и показывают саму термобатарею.

рею, покрытую тонким слоем копоти. Затем, надев насадку, термостолбик присоединяют с помощью проводников к клеммам демонстрационного гальванометра. Чтобы наблюдать отклонения гальванометра, помещают близко от термостолбика источник тепла — осветительную лампу.

Значительно больший эффект дают демонстрации с зеркальным гальванометром, так как в этом случае удается демонстрировать слабые тепловые излучения: излучение тепла рукой человека, учащимися, находящимися в аудитории, и т. д.

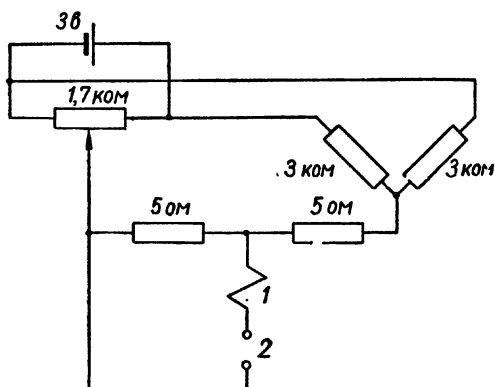


Рис. 100. Компенсационная схема к зеркальному гальванометру:

1 — термостолбик; 2 — гальванометр

Демонстрация осуществляется так. Присоединяют термостолбик к зеркальному гальванометру и поворачивают его вначале конусом к белому экрану. Зайчик гальванометра будет отклоняться, но через некоторое время он остановится. Замечают это положение зайчика и поворачивают термостолбик к аудитории. Зайчик вновь отклоняется. Также происходит отклонение зайчика от поднесенной к термостолбику руки.

Чтобы демонстрация была более убедительна, к зеркальному гальванометру собирают специальную компенсационную схему, которая дает возможность скомпенсировать все термо э. д. с., возникающие в термостолбике от присутствующих в кабинете людей и предметов. Зайчик гальванометра при этом удается установить на нуль шкалы. Если после этого на большом расстоянии поместить нагретый предмет, то гальванометр дает показания.

Компенсационные схемы могут быть различными. Приводим весьма удачную схему компенсатора для зеркального самонивелирующего гальванометра (рис. 100). Эта же схема с успехом может быть применена и для других гальванометров.

## ГЛАВА IV

### ЭЛЕКТРОННЫЕ ЯВЛЕНИЯ В ВАКУУМЕ

#### § 1. НЕКОТОРЫЕ МЕТОДИЧЕСКИЕ ЗАМЕЧАНИЯ ПО ТЕМЕ «ЭЛЕКТРОННЫЕ ЯВЛЕНИЯ В ВАКУУМЕ»

Сейчас трудно переоценить значение электроники для современной науки и техники. Особенно оно возрастает в условиях все расширяющейся автоматизации производства. Естественно, элементы автоматических устройств (электронные лампы, усилители, реле и т. п.) должны быть в центре внимания при изучении физики в школе. Для выяснения работы электронных ламп в первую очередь необходимо понимание явления термоэлектронной эмиссии. Этому вопросу и будут посвящены первые опыты.

Физическая сущность электронных явлений в вакууме по сути дела не сложна. Движение свободных электрических зарядов в вакууме под действием электрического поля является более простым случаем, чем движение электронов в металлическом проводнике. Здесь также должны быть условия, необходимые для существования тока: наличие свободных носителей заряда и действие электрического поля.

При объяснении работы электронных ламп следует везде оперировать с электрическим полем, а не говорить о заряде анода и действии этого заряда на электроны в лампе. Только последовательное применение везде понятия электрического поля даст возможность четко и ясно показать сущность работы диода и триода.

После выяснения физической сущности процессов, происходящих в диоде, необходимо рассмотреть выпрямители на электронных лампах.

Лампу триод в данной теме следует изучать только в качестве усилителя. Лампа как генератор незатухающих колебаний изучается в теме «Электромагнитные колебания и волны».

Не менее важно изучение свойств электронных пучков и выяснение принципа работы и основных элементов конструкции электронно-лучевой трубки. Электронно-лучевая трубка имеет чрезвычайно широкое применение. Достаточно указать только на применение ее в осциллографе и в телевизорах. Необходимо познакомить уча-

щихся с осциллографом — прибором, который находит в школе все большее применение. Все это делает тему «Электронные явления в вакууме» чрезвычайно важной, насыщенной материалом, имеющей большое политехническое значение.

В заключение укажем, что тема «Электронные явления в вакууме» имеет также большое значение для формирования диалектико-материалистического мировоззрения. Так, очень важно обсуждение с учащимися понятия вакуум. Заметим, что применение термина «пустота», казалось бы, имеющего тот же смысл, нежелательно.

Изучение свойств электронных пучков расширяет представления об элементарном электрическом заряде — заряде электрона.

## § 2. ОПИСАНИЕ ОПЫТОВ

### О п ы т 57. Явление термоэлектронной эмиссии

**Оборудование:** электронная лампа прямого накала, желательно больших размеров со стеклянным баллоном, например 1-Ц7С, ГУ-4, батарея аккумуляторов 5-НКН-22, демонстрационный стрелочный электрометр, эбонитовая и из органического стекла палочки, шелк и мех.

Для демонстрации берут лампу со стеклянным баллоном. Если лампа трехэлектродная, то сетку и анод соединяют. Часто баллон внутри покрыт непрозрачным слоем, затрудняющим наблюдение за накалом лампы. Его удаляют, прогрев баллон на слабом пламени газовой горелки. При отсутствии ламп рекомендуемой конструкции демонстрация возможна и с газотроном ВГ-176. При этом необходимо учесть, что нить накала газотрона требует для питания очень большого тока — 11 а при напряжении 2,5 в.

Лампу вставляют в панель или непосредственно к ее выводам припаивают проводники. Укрепляют лампу в штативе и для лучшей видимости сзади ее ставят белый экран. Собирают цепь накала, включая необходимое число банок аккумулятора. Замкнув ключ в цепи накала, наблюдают разогрев нити, затем выключают цепь. Изображают на доске схему лампы, введя в нее дополнительный электрод, не называя его пока анодом. Соединяют с анодом электрометр и изображают его на схеме (рис. 101).

Электризуют палочку из органического стекла положительно (при трении о мех) и с ее помощью заряжают положительным зарядом электрометр. Некоторое время учащиеся наблюдают, что электрометр сохраняет заряд<sup>1</sup>. Далее включают цепь накала и при разогревании нити электрометр быстро разряжается. Объясняется данный эффект тем, что накалившая нить испускает электроны, которые под действием электрического поля внутри лампы (впя-

---

<sup>1</sup> Необходимо соблюсти все необходимые меры, чтобы из-за наличия острия или просто из-за недостаточной изоляции не стекали заряды.

ная пластинка заряжена положительно) движутся к этой пластинке и нейтрализуют ее заряд.

Повторяют опыт, зарядив электрометр отрицательно, что осуществляется с помощью эбонитовой палочки, потертой шелком. Теперь при включении накала лампы электрометр не разряжается. Данная демонстрация подтверждает, что испускаемые нитью частицы имеют отрицательный заряд. Сообщают учащимся, что это электроны.

Учащимся известно, что в металле имеются положительные ионы и электроны. Остается объяснить, почему при повышении температуры происходит испускание электронов (термоэлектронная эмиссия). Здесь очень полезна аналогия с явлением испарения.

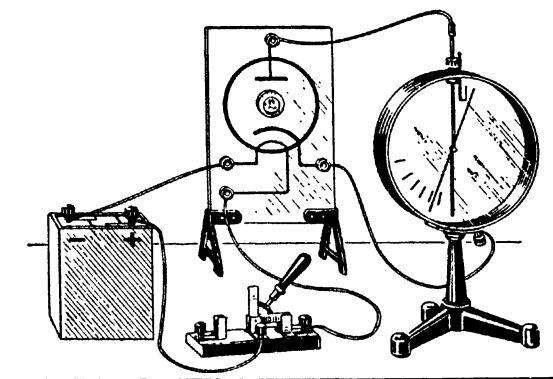


Рис. 101. Схема соединения электрометра с лампой

Обращают внимание учащихся, что нагревать металл можно любым способом. Нагрев с помощью тока весьма удобен, но не является единственно возможным способом. Возможно показать зависимость эмиссии от температуры, беря разное напряжение накала. При этом будет меняться и ток насыщения.

В ряде пособий<sup>1</sup> описан опыт не с электронной лампой, а с обычной лампой накаливания, баллон, которой обернут полоской станиоля, на которую навито несколько витков тонкого неизолированного провода. Другой конец провода присоединен к электрометру. Данный вариант опыта возможен, но следует и давать ему соответствующее объяснение. Недопустимо представление лишь о прохождении электронов через стеклянный баллон лампы. Дело здесь, вероятно, и в электризации через влияние.

В случае демонстрации с лампой малых размеров, когда ее конструкция не видна, очень полезно «прозвонивание» лампы.

<sup>1</sup> П. А. Знаменский, Методика преподавания физики в средней школе, Учпедгиз, 1947, стр. 408.

С помощью омметра показывают цепь накала и отсутствие непосредственного соединения другого электрода с выводами от нити накала.

### Опыт 58. «Механизм» термоэлектронной эмиссии

**Оборудование:** кинопроектор, экран, кинофрагмент. «Термоэлектронная эмиссия».

Механизм термоэлектронной эмиссии недоступен непосредственному восприятию. Но средствами мультипликации возможно условно его показать. В кинофрагменте показано, что металл представляет собой совокупность положительных ионов, которые совершают колебательное движение относительно узлов кристаллической решетки. Свободные электроны находятся в хаотическом движении. Некоторые электроны выходят за пределы металла, но силами электрического взаимодействия с ионами они возвращаются в металл.

При повышении температуры скорость движения электронов возрастает и часть их преодолевает эти возвращающие силы и выходит за пределы металла. В образовавшемся облачке электронов также движение электронов хаотическое и между облачком и металлом существует динамическое равновесие.

При отсутствии кинофрагмента механизм термоэлектронной эмиссии может быть проиллюстрирован серией рисунков.

### Опыт 59. Односторонняя проводимость диода

**Оборудование:** различные лампы-диоды, проекционный аппарат, лампа-диод на демонстрационной панели, демонстрационный гальванометр, батарея аккумуляторов 3-НКН-10 или 5-НКН-22, сухая анодная батарея (БАС) или селеновый выпрямитель, два ключа, соединительные провода.

Вначале объясняют учащимся устройство лампы-диод, вводят термины: катод, анод. Объясняют необходимость высокого вакуума в баллоне лампы. В противном случае нить накала (катод) сгорит, так как металл в накаливаемом состоянии вступит во взаимодействие с остатками кислорода в баллоне. Говорить здесь о столкновении электронов с молекулами газа и о происходящей при этом ударной ионизации вряд ли уместно.

Хорошее понимание устройства диода может быть осуществлено, если в физическом кабинете подобран большой комплект электронных ламп и их выдают на столы для изучения. При этом вначале устройство лампы объясняет учитель. Лампу показывают в теневой проекции с помощью проекционного фонаря. Затем учащиеся сами рассматривают устройство лампы.

Далее демонстрируют одностороннюю проводимость диода. Для этого используют любой диод или триод, соединив сетку с анодом.

Целесообразно применить ту же лампу, что и в опыте 57. Лампу устанавливают на специальной демонстрационной панели (рис. 102). Панель изготавливают из эбонита, органического стекла, гетинакса или в крайнем случае из фанеры. На ней крупно рисуют схему диода и в центре этой схемы устанавливают ламповую панельку. По краям панели помещают три клеммы. Две из них — для подключения источника тока к нити накала и одна для соединения с анодом. Сзади панели соединяют эти клеммы с соответствующими выводами лампы, но эти соединения учащимся не видны. Демонстрационную панель устанавливают на какой-нибудь подставке.

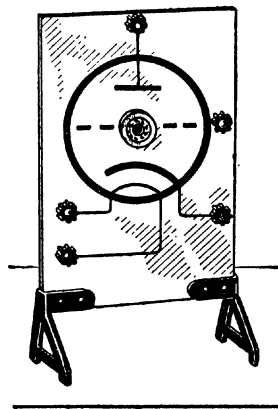


Рис. 102. Демонстрационная ламповая панель

Источником тока для анодной цепи в опыте может служить сухая анодная батарея или электрораспределительный щит. Для некоторых типов ламп можно выбирать источник тока и более низкого напряжения (батарея аккумуляторов, селеновый выпрямитель). Так, для газотрона ВГ-176 требуется  $U_a = 25-30$  в. Демонстрационный гальванометр и при этих условиях покажет ток в цепи.

Собирают установку (рис. 103). Подключают питание к нити накала лампы, а в анодную цепь включают демонстрационный гальванометр и соответствующий источник тока. В цепи накала и анода ставят ключи. К гальванометру, кроме того, подбирают шунт. С этой целью можно использовать сопротивления (1 или 2 ом) из

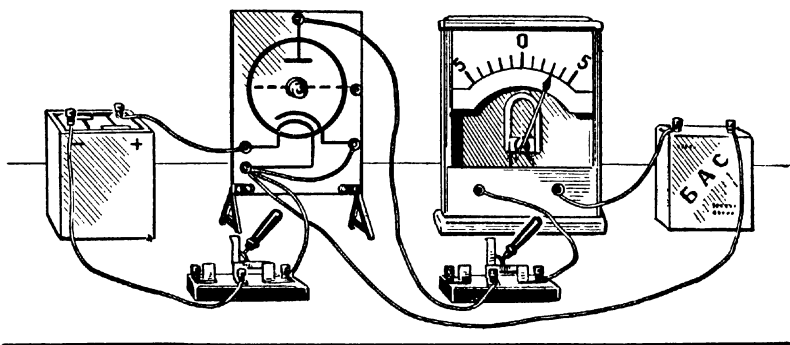


Рис. 103. Установка для демонстрации односторонней проводимости диода

набора для лабораторных работ. Шкалу отставляют от гальванометра, так как прибор нужен только для обнаружения тока.

Включают цепь накала и в случае стеклянного баллона лампы наблюдают накаливание нити. Другой источник тока подключают положительным полюсом к аноду, а отрицательным — к катоду. Включив анодную цепь, наблюдают отклонение стрелки демонстрационного гальванометра. В анодной цепи есть ток. Выключив

цепь, переключают полюса источника тока в анодной цепи. Теперь при включении цепи стрелка гальванометра не отклоняется — тока в цепи нет. Ставить специальный переключатель для изменения полярности в анодной цепи не следует.

Опыт объясняют. Для этого чертят на доске схемы включения лампы — диод, соответствующие как первой, так и второй частям опыта.

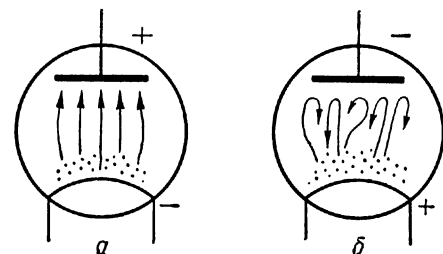


Рис. 104. К объяснению односторонней проводимости диода

В случае соединения анода с положительным полюсом источника тока (рис. 104, а), между анодом и катодом создается электрическое поле, которое так действует на электроны, что они перемещаются к аноду. В анодной цепи при этом проходит ток. Показывают как направление движения электронов, так и направление тока. На рисунке 104, б показан другой случай, когда напряженность поля имеет противоположное направление. Электроны теперь не достигают анода и тока в анодной цепи нет. Демонстрируемое свойство лампы-диод, назвали односторонней проводимостью.

На установке можно демонстрировать также и зависимость анодного тока от напряжения на участке анод—катод, а также ток насыщения. Для этого напряжение на лампу подают от потенциометра. Однако, если в дальнейшем будет показываться кинофильм «Диод», нет прямой необходимости в данной демонстрации. На опыте показывают только сам факт односторонней проводимости.

## О п ы т 60. Ламповый выпрямитель

О б о р у д о в а н и е: кинопроектор, экран, кинофильм «Диод».

В кинофильме сначала повторяется материал, изученный на предшествующих уроках: схема включения диода, накал нити и образование электронного облачка, анодный ток, односторонняя проводимость диода. Далее рассматривается применение диода



для выпрямления переменных токов. На это и следует обратить главное внимание.

Кинофильм требует для демонстрации 5—6 мин. Показ его органически включают в урок, т. е. демонстрации кинофильма предшествует объяснение учителя и после кинофильма это объяснение продолжается. Обращаем внимание, что в кинофильме применена имитационная модель диода, а не реальная лампа. Но, к сожалению, в самом фильме об этом ничего не сказано и поэтому следует об этом предупредить учащихся. В противном случае возможно создание неправильного представления доступности наблюдения электронного облачка в лампе. В фильме демонстрируется зависимость тока в анодной цепи от напряжения на участке анод—катод, объясняется образование тока насыщения. Этот вопрос может потребовать дополнительного объяснения.

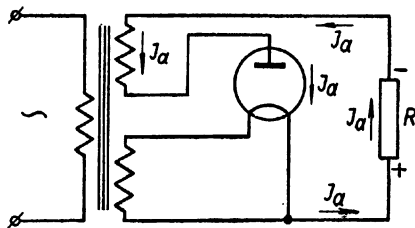


Рис. 105. Схема однополупериодного выпрямителя

После демонстрации кинофильма чертят и объясняют схему однополупериодного выпрямителя (рис. 105). Учащиеся должны зарисовать ее в тетрадь.

Затем следует рассмотреть принцип работы двухполупериодного выпрямителя.

### О п ы т 61. Кенотронный выпрямитель

О б о р у д о в а н и е: блоки для сборки кенотронного выпрямителя (трансформатор, лампа — кенотрон, фильтр), электронный осциллограф, реостат 1000 ом, школьный кенотронный выпрямитель, соединительные провода.

Блоки для сборки кенотронного выпрямителя представляют собой вертикальные панели, на которых установлены трансформатор, лампа, конденсаторы фильтра. На боковых сторонах панелей имеются клеммы, соединенные с соответствующими выводами деталей. Если блоки расположить рядом и соединить клеммы переключателями, то получим действующий кенотронный выпрямитель с фильтром (рис. 106).

Вначале показывают первый блок с трансформатором. Обращают внимание на среднюю точку вторичной обмотки трансформатора и объясняют, пользуясь графиком переменного тока, как меняются потенциалы крайних точек вторичной обмотки.

Затем показывают блок с кенотроном, чертят схему двойного диода, или кенотрона. Соединяют оба блока и получают выпрями-

тель без фильтра. К выходу выпрямителя подключают нагрузку — реостат 1000 ом. Работу выпрямителя целесообразно исследовать с помощью осциллографа. Описываем только последовательность операции:

1. Подают на клеммы вертикального отклонения осциллографа напряжение от сети (с первичной обмотки трансформатора). На

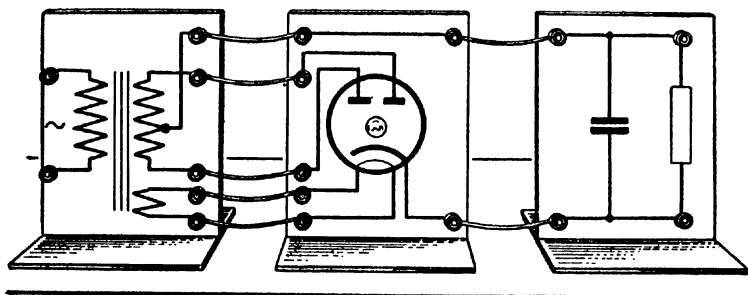


Рис. 106. Кенотронный выпрямитель, собранный из отдельных блоков

экране осциллографа получают кривую переменного тока (рис. 107, а). Такую же форму будет иметь напряжение и на вторичной обмотке трансформатора, но сдвинутое по фазе.

2. Отсоединяют одну из перемычек так, чтобы в кенотроне работал только один анод. Получают схему однополупериодного вы-

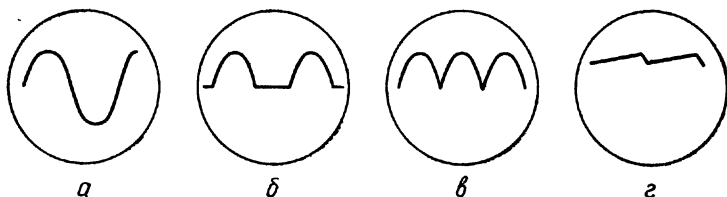


Рис. 107. Осциллограммы при исследовании работы кенотронного выпрямителя

прямытеля. С выхода его подводят напряжение на клеммы вертикального отклонения осциллографа. На экране получают осциллограмму пульсирующего тока (рис. 107, б).

3. Замыкают все перемычки и получают схему двухполупериодного выпрямления. Подают напряжение на вход осциллографа и получают соответствующую осциллограмму пульсирующего тока (рис. 107, в).

Фильтр обычно состоит из дросселя низкой частоты и конденсаторов большой емкости. Объяснить работу такого фильтра здесь не представляется возможным. Следует ограничиться рассмотрением фильтра из емкости, включенной параллельно нагрузке.

Показывают блок фильтра и присоединяют его к другим блокам с помощью перемычек. Нагрузку (реостат) включают теперь на выход фильтра

Подавая напряжение с выхода фильтра на вход осциллографа, получают осциллограмму (рис. 107, з) в которой пульсации напряжения трудно заметить.

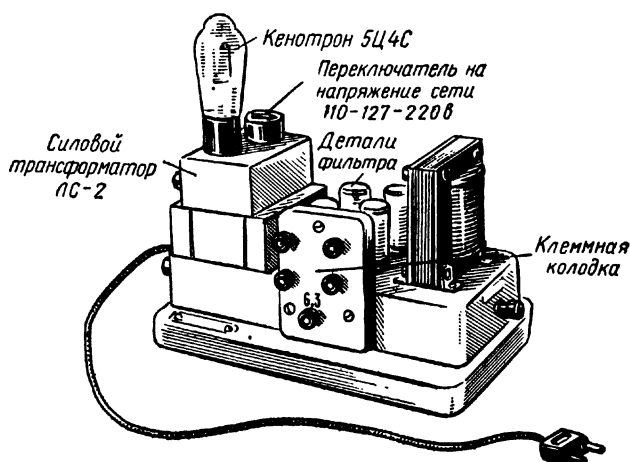


Рис. 108. Школьный кенотронный выпрямитель

Пульсации будут тем меньше, чем больше емкость конденсаторов фильтра. Это можно показать, если включить параллельно нагрузке батарею конденсаторов и постепенно менять ее емкость.

Демонстрационный выпрямитель имеет большие габариты и работать с ним трудно. Показывают учащимся школьный кенотронный выпрямитель, смонтированный на одной панели (рис. 108), и его основные элементы: силовой трансформатор, кенотрон, фильтр. Включают выпрямитель в сеть и наблюдают накал лампы. Получать вторично осциллограммы напряжения не следует. Целесообразно только показать клеммы, с которых снимается выпрямленное напряжение, и обратить внимание на клеммы 6,3 в, с которых снимается напряжение на накал лампы. Целесообразно сообщить и данные из паспорта выпрямителя: напряжение на входе и выходе, мощность, тип лампы.

## Опыт 62. Роль сетки в трехэлектродной лампе<sup>1</sup>

**Оборудование:** триод на демонстрационной панели, батарея аккумуляторов 3-НКН-10 или 5-НКН-22, кенотронный выпрямитель, реостат — 1000 ом, демонстрационный гальванометр, металлический шаровой кондуктор на изолирующем штативе, эбонитовая палочка и палочка из органического стекла, шелк и мех, соединительные провода.

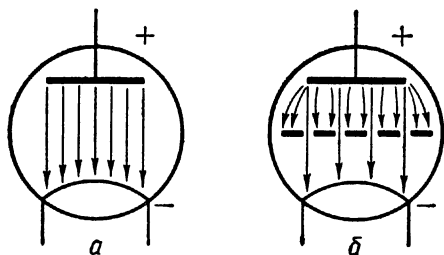


Рис. 109. Электрическое поле в диоде (а) и в триоде (б)

Триод отличается от диода наличием третьего электрода, получившего название управляющей сетки. Сетка расположена между анодом и катодом и обычно имеет вид спирали. В диоде электрическое поле образуется между анодом и катодом (рис. 109, а). В триоде сетка ослабляет действие анода на электроны пространственного заряда, являясь как бы экраном (рис. 109, б). Благодаря тому что сетка расположена к катоду значительно ближе, чем анод, незначительное изменение потенциала на сетке производит такое же действие на электроны, как и очень большие изменения потенциала на аноде. Так при положительном потенциале на сетке ток в лампе возрастает, а при отрицательном — уменьшается.

Действие сетки в лампе-триод вначале демонстрируют на простом опыте. Устанавливают лампу-триод (6Ф5, 6Н7, 6П3 или др.) на демонстрационной панели, подают на нее питание от кенотронного выпрямителя (на накал — 6,3 в, на анод — 300 в). Если используют лампу с другим напряжением накала, то собирают отдельно цепь накала, взяв в качестве источника тока соответствующую батарею аккумуляторов. В анодную цепь включают реостат на 1000 ом и демонстрационный гальванометр, к которому специально подбирают шунт сопротивлением порядка 1 ом. С клеммой сетки соединяют металлический шаровой кондуктор. Вся установка изображена на рис. 110.

Подбирая напряжение анода, добиваются такого анодного тока, чтобы стрелка прибора отклонялась до середины шкалы. Электризуют эбонитовую палочку (отрицательно) и подносят ее к шаровому кондуктору. На шаре возникает через влияние положительный заряд, а сетка получает отрицательный заряд. При этом наблюдается уменьшение анодного тока или полное его прекращение.

<sup>1</sup> Опыт описан в книге Т. Ф. Герасименко, Электрический ток в газах и вакууме, Учпедгиз, 1957, стр. 78—79.

Если же подносить к кондуктору палочку из органического стекла, заряженную положительно, то кондуктор зарядится отрицательно, а сетка положительно. Ток в лампе при этом возрастает. Заметим, что среднее значение тока необходимо выбирать меньше

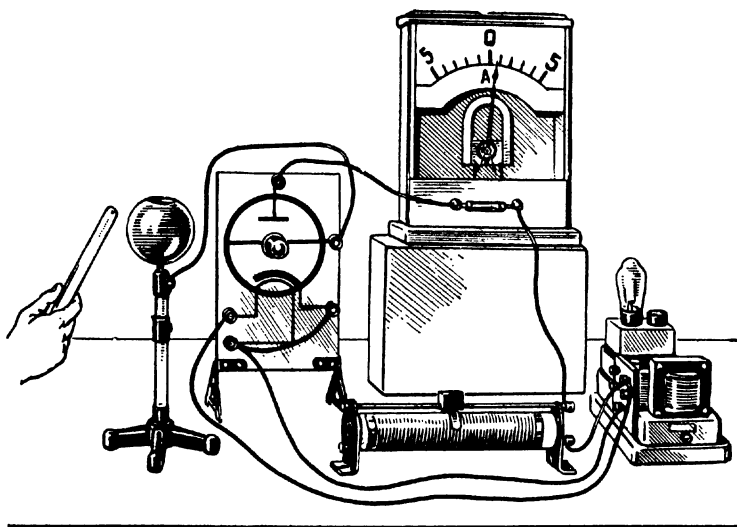


Рис. 110. Установка для демонстрации роли сетки в триоде

тока насыщения. Если поднесение палочки эффекта не дает, возможно подсоединение сетки к соответствующим кондукторам электрофорной машины.

### О п ы т 63. Характеристика триода

**Оборудование:** лампа 6ПЗ на демонстрационной панели, сухая анодная батарея (БАС) или кенотронный выпрямитель, демонстрационный гальванометр, две батареи аккумуляторов 3-НКН-10, батарея аккумуляторов 5-НКН-22, два реостата по 1000 *ом*, сопротивление 1 *ом*, вольтметр магнитоэлектрической системы на 300 *в*, соединительные провода, три ключа.

В демонстрации используется много приборов и схема соединений сложная. Поэтому вначале чертят схему установки для снятия характеристики триода (рис. 111). Объясняют и показывают три цепи: цепь накала лампы, анодную цепь и цепь сетки. Но говорить о сеточном токе здесь не следует.

После этого собирают установку (рис. 112), используя лучевой тетрод 6ПЗ. Но учащиеся не называют марку лампы и не объясняют, что это не триод. Сухая анодная батарея выбрана в качестве

источника анодного напряжения не случайно. Дело в том, что при изменении напряжения на сетке будет меняться анодный ток. При этом, естественно, меняется и анодное напряжение. При включении БАС это изменение будет небольшим и можно считать на-

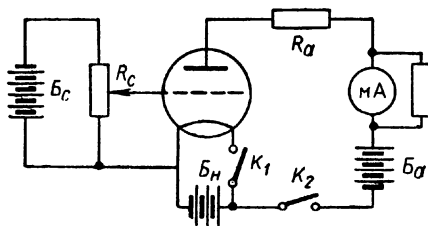


Рис. 111. Схема установки для снятия характеристики триода

пряжение практически постоянным. При использовании кенотронного выпрямителя необходимо включать потенциометр и с его помощью поддерживать напряжение постоянным. Контролируют напряжение вольтметром. Анодный ток измеряют демонстрационным гальванометром, к которому подключен шунт — порядка 1 ом

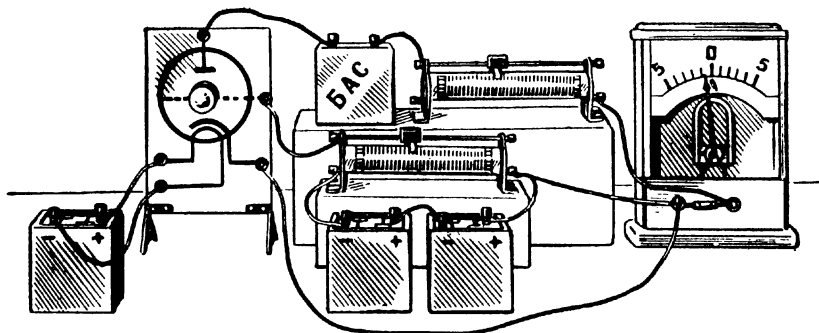


Рис. 112. Установка для снятия характеристики триода

(из набора для лабораторных работ). Напряжение на участок сетка—катод подают с потенциометра, который питается током от двух последовательно соединенных батарей аккумуляторов.

Демонстрацию проводят в следующей последовательности.

1. Включают цепь накала и наблюдают накал лампы.

2. Включают анодную цепь и отмечают анодный ток по прибору. Шунт должен быть таким, чтобы стрелка отклонялась примерно до середины шкалы.

3. Подают напряжение на участок сетка—катод так, чтобы на сетке был отрицательный потенциал. Передвигают ползунок потенциометра, увеличивая отрицательный потенциал на сетке относительно катода. Анодный ток при этом также уменьшается. При некотором напряжении на участке сетка—катод анодный ток становится равным нулю. Лампа запирается.

4. Переключают проводники от потенциометра в цепи сетки так, чтобы сетка имела положительный потенциал относительно катода. Изменяя подаваемое напряжение, демонстрируют увеличение анодного тока. При некотором напряжении возрастание тока прекратится. Это так называемый ток насыщения.

Показания приборов записывают. Однако прибор не градуируют, а берут лишь значения тока в каких-то условных единицах. Напряжение на участке сетка—катод измеряют вольтметром, но это усложняет схему. Проще судить о напряжении по положению ползунка реостата потенциометра.

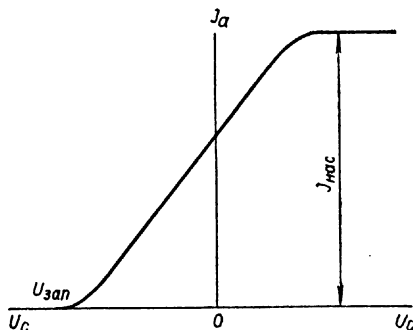


Рис. 113. Сеточная характеристика триода

Опыт носит качественный характер. В дальнейшем в практической работе учащиеся будут сами снимать сеточную характеристику триода, пользуясь более точными приборами. Вычерчивают примерную характеристику триода (рис. 113) и показывают на ней все характерные точки: напряжение задержки лампы  $U_{\text{зап}}$ , напряжение, при котором возникает ток насыщения. Показывают линейный участок характеристики и ток насыщения  $I_{\text{нас}}$ .

Очень полезно повторить объяснение, как поле, создаваемое на участке сетка—катод, влияет на анодный ток. Также важно обратить внимание, что при нулевом потенциале на сетке анодный ток не равен нулю, так как часть электронов, несмотря на экранирование сеткой анода, проникает к аноду.

В школе демонстрировать сеточный ток, объяснять отрицательное напряжение смещения на сетке и сопротивление утечки не следует. Все это может быть предметом внеклассных занятий.

#### О п ы т 64. Усилительные свойства электронной лампы

О б о р у д о в а н и е: лампа 6Н7С на демонстрационной панели, кенотронный выпрямитель, звуковой генератор, универсальный трансформатор с катушками на 6 и 220 в, школьный угольный

микрофон, динамический громкоговоритель, два демонстрационных вольтметра, два реостата по 3000 — 5000 ом, батарея аккумуляторов 5-НКН-22, соединительные провода.

Обычно усилительные свойства электронных ламп демонстрируют, применяя усилители на двух лампах. Простейший усилитель на одной лампе не дает возможность получить достаточно сильный сигнал на динамик. Но в первую очередь следует вскрыть физическую сущность самого факта усиления колебаний электронной лампы, а потом уже демонстрировать применение этого свойства в радиотехнике. Сущность же усиления состоит в том, что малым изменениям напряжения на участке сетка—катод соответствуют большие изменения анодного тока и напряжения на нагрузке, включенной в анодной цепи.

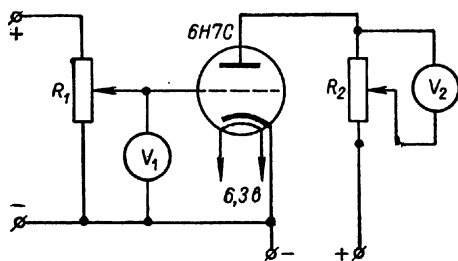


Рис. 114. Схема усилителя на триоде

Ниже опишем ряд опытов, дающих возможность достаточно наглядно показать усилительные свойства лампы.

1. Собирают установку по схеме рисунка 114. В анодную цепь включают реостат  $R_2 = 3000 \div 5000$  ом, а падение напряжения на нем измеряют демонстрационным вольтметром  $V_2$ , переключенным на переменное напряжение и с дополнительным сопротивлением на 250 в. На участок сетка—катод напряжение подают с делителя напряжения ( $R_1 = 3000—5000$  ом). Измеряют напряжение демонстрационным вольтметром  $V_1$  с дополнительным сопротивлением на 5 в, переключенным на постоянное напряжение.

Накал лампы и анодную цепь питают от кенотронного выпрямителя.

При демонстрации измеряют напряжение на участке сетка—катод и на нагрузке в анодной цепи. С помощью потенциометра в цепи сетки изменяют потенциал на сетке лампы относительно катода и регистрируют изменение напряжения на нагрузке. Следует так подобрать сопротивление в анодной цепи  $R_2$ , чтобы малым изменениям напряжения в цепи сетки (1—2 в) соответствовали большие изменения напряжения на нагрузке в анодной цепи (десятки вольт). В этом и состоит усилительное свойство лампы-триод.



2. Показывают усилительные свойства электронной лампы в радиотехнической схеме с микрофоном и динамическим громкоговорителем

Собирают установку по схеме рисунка 115. В цепь сетки включают угольный микрофон  $M$  и батарею аккумуляторов. В анодную цепь включают катушку  $L_1$  на 220 в от универсального трансформатора, а к клеммам катушки  $L_2$  на 6 в присоединяют динамический громкоговоритель. Сердечник трансформатора замыкают. Накал лампы и питание анодной цепи осуществляют, как и в предшествующей схеме, от кенотронного выпрямителя.

Усиление колебаний показывают следующим образом. Легко постукивают по мембране микрофона — в динамике слышны сильные щелчки. Объясняют учащимся, что, если подавать какие-либо сигналы перед микрофоном, в его цепи будет проходить пульсирующий ток и напряжение на участке сетка — катод будет меняться. По тому же закону будет меняться анодный ток и напряжение на вторичной обмотке трансформатора, к клеммам которой подключен динамический громкоговоритель.

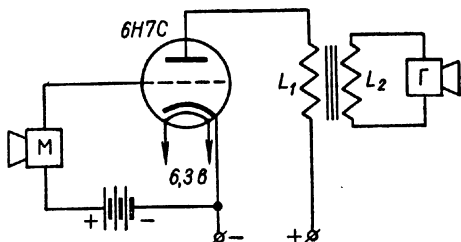


Рис. 115. Схема усилителя с микрофоном и динамическим громкоговорителем

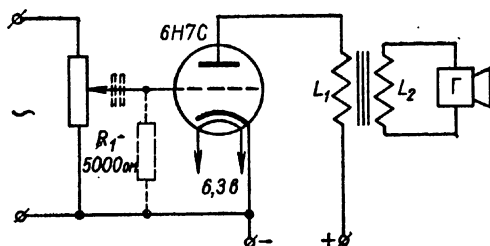


Рис. 116. Схема усилителя низкой (звуковой) частоты

3. Видоизменяют схему опыта (рис. 116.) На участок сетка—катод подают переменное напряжение (5—10 в) с потенциометра, питаемого от сети или от звукового генератора. Теперь слышно довольно сильное гудение динамического громкоговорителя. Звуковым генератором меняют частоту сигналов. Соответственно изменяется и тон звука.

Для устойчивой работы схемы в цепи сетки включают разделительный конденсатор и сопротивление утечки (гридлик). Но назначение и сущность его действия учащимся не объясняется. Это может быть сделано на внеклассных занятиях. Вообще возможна демонстрация опытов и без этих элементов в схеме, хотя результаты ее будут значительно хуже.

#### Опыт 65. Применение трехэлектродных ламп в схемах усилителей<sup>1</sup>

**Оборудование:** электропроигрыватель со звуконосителем, усилитель низкой частоты двухламповый, динамический громкоговоритель, кенотронный выпрямитель, соединительные провода, патефонная пластинка.

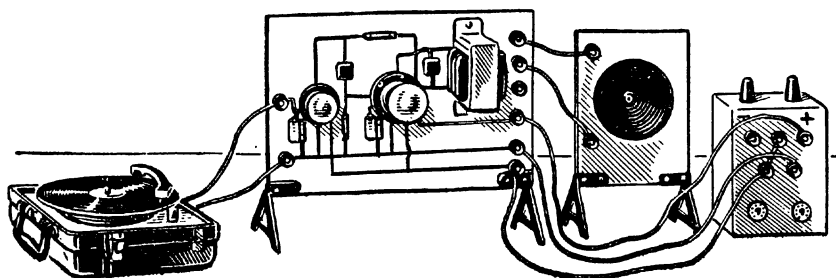


Рис. 117. Установка для демонстрации усиления звуковых колебаний

В данном опыте показывают уже применение электронных ламп в схемах усилителей для усиления звуковых колебаний. Используют для этой цели выпускаемый Главучтехпромом двухламповый усилитель, выходная мощность которого достаточна для работы динамического громкоговорителя. Никаких объяснений усилительных свойств ламп здесь не дается, а объясняется сам принцип действия установки для преобразования механических колебаний в электрические, их усиления и воспроизведения.

Демонстрацию проводят в два этапа.

Вначале присоединяют выход звуконосителя к динамическому громкоговорителю и приводят в действие электропроигрыватель. При вращении диска с пластинкой и при движении звуконосителя

<sup>1</sup> Б. С. З о р ы к и н, Электромагнитные колебания и волны в курсе физики средней школы, изд. АПН РСФСР, 1955, стр. 72.

по звуковой дорожке пластинки звука не слышно. Дело в том, что возбуждаемые в звукоснимателе при его механических колебаниях электрические колебания имеют малую мощность.

Далее собирают установку с усилителем (рис. 117). Питание на усилитель подают с кенотронного выпрямителя. На вход усилителя подают слабые электрические колебания со звукоснимателя. Напряжение же с выхода усилителя подают на динамический громкоговоритель.

При вращении диска с пластинкой слышна музыка или речь, записанная на пластинке. Меняют громкость, демонстрируя разное усиление сигнала со звукоснимателя.

#### О п ы т 66. Электронный прожектор в электронно-лучевой трубке.

О б о р у д о в а н и е: электронно-лучевая трубка ЛО709А, универсальный выпрямитель, соединительные провода.

Пользуясь схемой (рис. 118), объясняют устройство электронно-

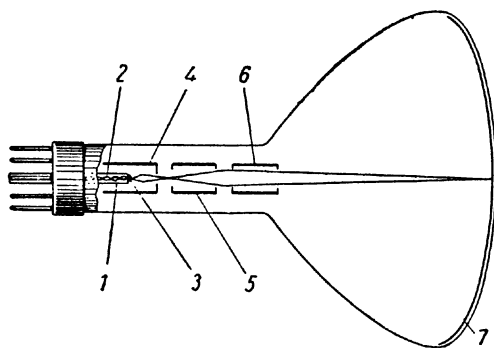


Рис. 118. Схематический чертеж электронно-лучевой трубки без системы отклонения луча

лучевой трубки. Электронно-лучевая трубка состоит из четырех основных частей: колбы, в которой создан высокий вакуум, электронного прожектора-устройства, создающего сфокусированный и управляемый по интенсивности электронный пучок, системы отклонения луча и люминесцирующего экрана. Показывают эти основные части. Далее подробно объясняют устройство и действие электронного прожектора.

В горловине трубки расположен подогревный катод 1. При накаливании током вольфрамовой нити 2 с доньшка никелевой трубочки слой окиси бария или стронция 3 излучает электроны. Вокруг никелевой трубочки — катода установлен другой никеле-

вый цилиндр и отверстием в торце — управляющий электрод 4. На него обычно подается небольшой отрицательный потенциал относительно катода, изменяя который, удается регулировать количество электронов, проходящих через отверстие в управляющем электроде. Этим регулируется яркость пятна на экране трубки.

За управляющим электродом находится первый анод 5, получивший название фокусирующего. Второй анод 6 называется ускоряющим. На него подается очень высокий положительный потенциал (800—3000 в). На фокусирующий анод подается 0,2—0,5 этого потенциала. Аноды имеют вид полых цилиндров и внутри них создается электрическое поле, имеющее осевую симметрию. Это поле фокусирует электронный лучок, причем действие этой системы аналогично действию фокусирующей оптической системы. Подбирая напряжения на анодах, удается сфокусировать электронный пучок на люминесцирующем экране 7.

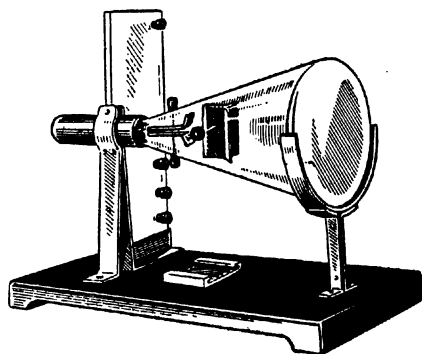


Рис. 119. Электронно-лучевая трубка ЛО709А

Экраны современных трубок покрывают виллемитом, кремнекислым цинком и другими веществами (зеленое свечение) или смесью сернокислого цинка с сернокислым кадмием (светло-голубое или белое свечение). Есть множество и более сложных составов для покрытия экранов.

Под действием электронов, имеющих большую скорость, а следовательно, и энергию, экран в месте их ударов начинает светиться — люминесцировать.

Устройство системы для электростатического отклонения луча здесь не рассматривают.

После этого демонстрируют электронно-лучевую трубку ЛО709А, укрепленную на специальной подставке с вертикальной панелью и клеммами (рис. 119). Все эти клеммы имеют соединение с выводами на цоколе трубки.

Для включения трубки собирают схему, в которой сопротивления  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$  образуют делитель напряжения (рис. 120). Питание трубки осуществляется от универсального выпрямителя.

Вначале подают питание на накал, затем на аноды и управляющий электрод. Меняют напряжение на управляющем электроде,

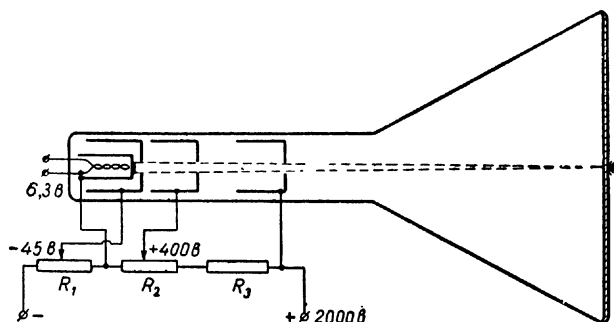


Рис. 120. Схема включения трубки

демонстрируя этим изменение яркости пятна на экране трубки. Меняют напряжение на фокусирующем аноде, демонстрируя фокусировку электронного луча. Создавать большую яркость и резкую фокусировку не следует из-за опасности прожога экрана.

#### Опыт 67. Управление электронным пучком

**Оборудование:** электронно-лучевая трубка ЛО709А, универсальный выпрямитель, кенотронный выпрямитель, соединительные провода.

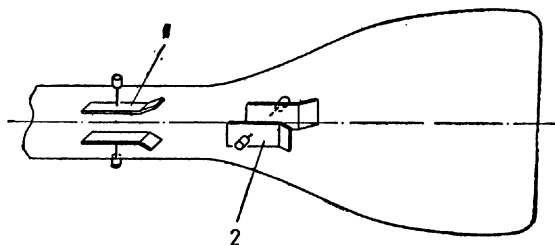


Рис. 121. Отклоняющие пластины в электронно-лучевой трубке:

1 — вертикального и 2 — горизонтального отклонения

Объясняют учащимся по схеме рисунка 121, что в электронно-лучевой трубке с электростатическим управлением имеется две пары отклоняющих пластин, расположенных под прямым углом

друг к другу. Горизонтально расположенные пластины отклоняют луч по вертикали, вертикально расположенные пластины — по горизонтали. Между пластинами создают электрическое поле, которое и действует на пролетающие электроны. Электроны в поле движутся по параболам, а выйдя за пределы поля, продолжают прямолинейное движение по инерции.

Показывают отклоняющие пластины трубки ЛО709А. Как и в предшествующем опыте, подводят питание на трубку и наблюдают светящуюся точку на ее экране.

Подают вслед за этим на первую пару пластин (горизонтального отклонения) 200—250 в от кенотронного выпрямителя. Пятно на экране сместится по горизонтали на 5—6 см. Изменяют полярность и убеждаются, что луч отклонится в другую сторону. Затем подводят напряжение от кенотронного выпрямителя на другую пару пластин (вертикального отклонения) и наблюдают смещение луча. Опять меняют полярность.

После данной демонстрации учащиеся подготовлены для изучения принципа действия генератора развертки и демонстрации различных применений электронно-лучевой трубки.

Обратим внимание, что при переключении проводов от выхода выпрямителя с одной пары пластин на другую и при изменении полярности пластин, необходимо разряжать конденсаторы фильтра кенотронного выпрямителя. Для этого, выключив выпрямитель, замыкают выходные клеммы выпрямителя проводником. В противном случае имеется опасность попасть под напряжение.

## **О п ы т 68. Применение электронно-лучевой трубки. Осциллограф**

**О б о р у д о в а н и е:** кинопроектор, экран, кинофильм «Электронно-лучевая трубка».

Кинофильм звуковой состоит из 2-х частей и требует для демонстрации 20 мин. Целесообразно демонстрацию проводить не сразу, а разбить ее на две части.

### **1. Устройство электронно-лучевой трубки**

В первой части фильма рассматривается устройство трубки, получение и формирование электронного луча, управление им. Показывают эту часть фильма. Здесь средствами мультипликации удалось показать все в динамике, чего нельзя достигнуть при объяснении по схеме.

Для расширения кругозора учащихся имеет значение хотя и беглая демонстрация процесса изготовления электронно-лучевых трубок.

## *2. Применение электронно-лучевой трубки. Осциллограф*

Большая часть фильма посвящена образованию осциллограммы в осциллографе, объясняется действие генератора развертки (на неоновой лампе). Вполне возможно, что при просмотре этой части фильма у учащихся возникнут затруднения. Поэтому после демонстрации кинофильма учитель должен дать более полное объяснение. Далее в фильме очень наглядно объясняется движение электронного луча в телевизорах и получение телевизионного изображения.

Заметим, что кинофильм целесообразно показать в заключении всей темы «Электронные явления в вакууме». Демонстрация кинофильма ни в коей мере не исключает демонстрацию учителем электронного осциллографа. Этот прибор уже применялся в демонстрациях. Теперь показывают его основные части и ручки управления. Для понимания всех манипуляций при работе с осциллографом теперь имеются все условия.

## ГЛАВА V.

### ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК В ЭЛЕКТРОЛИТАХ

#### § 1. ИОННАЯ ПРОВОДИМОСТЬ ЭЛЕКТРОЛИТОВ

Растворы кислот, оснований и солей, а также их расплавы, обладающие электрической проводимостью, получили название электролитов. Электрический ток в них — это упорядоченное движение ионов в электрическом поле между опущенными в раствор электродами. Положительно заряженный электрод получил название анода, а отрицательно заряженный — катода.

Ионы, подходя к электродам, отдают или получают электроны, т. е. нейтрализуются. Это изменение зарядов ионов у электродов и получило название электролиза. Вследствие электролиза на электродах выделяются нейтральные частицы. Водород и металлы всегда выделяются на катоде, а остальные продукты электролиза — на аноде.

Значительно осложняют понимание всех процессов происходящие при этом в ряде случаев вторичные реакции. Дело в том, что в растворе, кроме ионов растворенного вещества, имеются еще ионы диссоциированной воды. Результат электролиза будет зависеть от того, как расположен в ряду активности интересующий нас металл. Одни металлы можно выделить при электролизе соответствующих водных растворов, другие — только при электролизе из расплавов.

Вторичные реакции имеют самое важное, существенное и принципиальное значение для электрохимии, но в школьном курсе нет смысла их рассматривать.

В центре внимания учителя физики должно быть в основном выяснение природы электрического тока в жидкостях, сущности процесса диссоциации, зависимости диссоциации от температуры и других факторов. Кроме того, чрезвычайно важно изучение законов электролиза и применения электролиза в технике. Заметим, кстати, что демонстрировать следует лишь I закон Фарадея. II закон Фарадея целесообразно получить теоретически, исходя из представлений электронной теории.



Сущность процессов при прохождении электрического тока в электролитах может быть уяснена, если применять условия существования тока к этому особому виду проводников, где носителями электрического заряда являются ионы. Аналогичный подход применялся нами уже при изучении тока в металлах и в вакууме. Здесь следует только показать принципиальное отличие проводников с ионной проводимостью от проводников с электронной проводимостью.

**О п ы т 69. Отсутствие тока в цепи, когда электроды опущены в сосуд с дистиллированной водой**

**Оборудование:** вольтметр с угольными электродами, патрон для лампы на панельке, лампа накаливания (10 *вт* на 127 или 220 *в* в зависимости от напряжения сети), дистиллированная вода, ключ, соединительные провода.

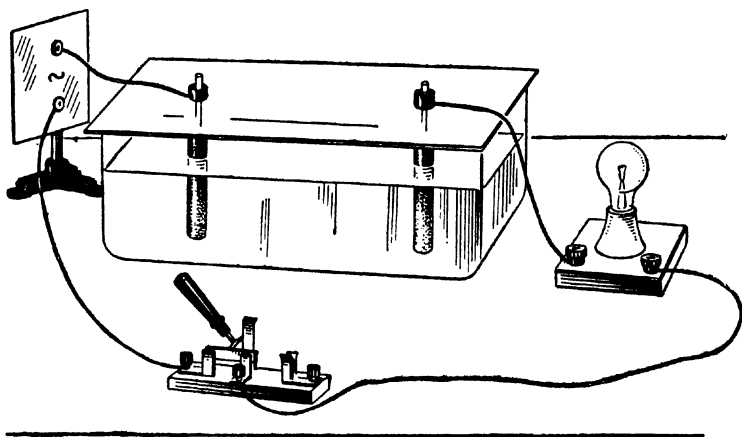


Рис. 122. Установка для демонстрации отсутствия проводимости дистиллированной воды

Вольтметр состоит из плоскопараллельного стеклянного сосуда, куда опускают два электрода. Наливают в вольтметр дистиллированную воду<sup>1</sup>. Собирают цепь, в которой последовательно с вольтметром включена лампа накаливания, ключ (рис. 122) и замыкают его.

Несмотря на то, что по накалу лампы можно судить о проводимости воды крайне приближенно, все же делаем вывод, что дистиллированная вода является диэлектриком, изолятором.

<sup>1</sup> Угольные электроды перед опытом тщательно очищают наждачной бумагой и промывают в дистиллированной воде.

Этот вывод не вызывает сомнений учащихся, так как сразу же после этого ставится опыт, где тот же индикатор — лампа накаливания показывает наличие тока в цепи с раствором серной кислоты (см. опыт 70).

### О п ы т 70. Электропроводность раствора серной кислоты

Оборудование: то же, что и в предыдущем опыте, и, кроме того, раствор серной кислоты, пипетка малая, сахарный песок (5—10 г), ключ, соединительные провода.

Вначале повторяют предшествующий опыт с дистиллированной водой в вольтметре.

С помощью пипетки вносят в дистиллированную воду несколько капель раствора серной кислоты. Лампа начинает светиться, причем, чем больше вносится серной кислоты, тем ярче она светится, т. е. проводимость раствора серной кислоты зависит от ее концентрации.

Объясняют причины электропроводности раствора серной кислоты. В водном растворе серная кислота диссоциирует, т. е. молекула  $\text{H}_2\text{SO}_4$  распадается на ионы  $\text{H}^+$  и  $\text{SO}_4^{2-}$ . Первый ион положительный, а второй — отрицательный. Молекула  $\text{H}_2\text{SO}_4$  электрически нейтральна. Наряду с процессом диссоциации идет и обратный процесс молизации, т. е. соединения ионов в нейтральные молекулы. В растворе устанавливается динамическое равновесие между этими процессами, т. е. число диссоциирующих молекул будет равно числу восстановившихся молекул. В растворе все время будет постоянно среднее число ионов. Часть ионов будет соединяться, создавая нейтральные молекулы, но на их месте будут возникать новые ионы за счет диссоциации других молекул.

Естественен вопрос о причинах диссоциации. В школе этот вопрос может быть рассмотрен достаточно глубоко, если использовать знания учащихся по химии и физике (закон Кулона).

В молекуле между ионами действуют силы электрического взаимодействия. Тепловое движение молекул не может нарушить эту связь ионов. Как известно, сила взаимодействия ионов вычисляется по закону Кулона

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

где  $q_1$  и  $q_2$  — электрические заряды ионов, а  $\epsilon_0$  — диэлектрическая проницаемость вакуума.

В случае водного раствора кислоты, основания или соли сила взаимодействия между ионами уменьшится, так как сила электрического взаимодействия в воде в  $\epsilon$ , раз меньше, чем в вакууме. Действительно, в этом случае

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

Известно, что  $\epsilon$ , для воды равно 81, т. е. сила электрического взаимодействия ионов уменьшится в 81 раз. При этом тепловое движение уже в состоянии отделить ионы друг от друга.

Диссоциируют не все вещества. Чтобы показать это, снова берут вольтметр с дистиллированной водой. Убедившись, что тока нет, бросают в воду сахарный песок (5—10 г), но лампа при этом не светится: сахар в водном растворе не диссоциирует.

У учащихся не должно создаваться неправильных представлений, что вода не проводит электрический ток. Этим свойством обладает только дистиллированная вода. Вода, взятая из водопровода или из колодца (будем ее называть питьевой водой), содержит в растворенном виде различные соли и является проводником электрического тока. Убеждаются в этом на опыте.

В вольтметр наливают питьевую воду и опускают угольные электроды. При замыкании цепи лампа светится неполным накалом. Это свидетельствует о том, что питьевая вода проводит ток, но значительно хуже, чем раствор серной кислоты и многие другие растворы. Это объясняется малой концентрацией солей, растворенных в воде.

### Опыт 71. Движение ионов в электрическом поле

**Оборудование:** раствор глауберовой или поваренной соли, фенолфталеин или метилоранж, соответственно этому раствор едкого кали или раствор соляной кислоты, фильтровальная бумага, кусок стекла, две медные пластины, белые нитки, источник постоянного тока ( $100 \div 120$  в), соединительные провода, ключ, зеркало больших размеров, штатив универсальный.

Предложено большое число опытов, показывающих движение ионов. Рекомендуем опыт Ю. В. Ходакова<sup>1</sup>, так как он наиболее простой по выполнению. Чтобы сделать его демонстрационным опытом, можно воспользоваться методом наклонного зеркала.

Не исключена возможность и демонстрации опыта в эпипроекции, для чего необходимо брать кусок стекла соответствующих размеров.

О движении ионов в электрическом поле судят при помощи индикатора, который изменяет свою окраску. Для ионов гидроксила применяют фенолфталеин, для ионов водорода — метилоранж.

Полоску фильтровальной бумаги размером примерно  $4 \times 9$  см погружают в раствор глауберовой или поваренной соли с добавлением какого-нибудь индикатора. Вынимают полоску из раствора и кладут на кусок наклонно расположенного стекла. Поперек полоски накладывают белую нитку, которую смачивают при ис-

---

<sup>1</sup> Опыт описан в книге Д. Д. Г а л а н и н а и др., Физический эксперимент в школе, т. III, Учпедгиз, 1954, стр. 292.

пользовании фенолфталеина в растворе едкого кали, а при применении метилоранжа — в растворе соляной кислоты.

Параллельно нитке по обе ее стороны на расстояниях примерно 4 см кладут две медные пластинки и плотно их прижимают.

Через ключ присоединяют эти пластинки к источнику постоянного тока (100—120 в). При горизонтальном расположении стекла, чтобы опыт был хорошо виден учащимся, укрепляют наклонно с помощью универсального штатива большое зеркало.

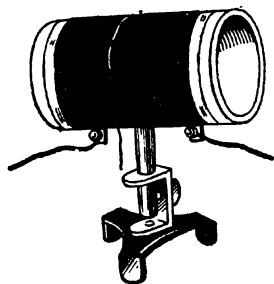


Рис. 123. Прибор для доказательства движения ионов

Замыкают ключ и наблюдают распространение окраски от нити к одному из электродов. Ионы гидроксила (когда используется фенолфталеин и едкий кали) движутся к аноду и дают малиновую окраску. Ионы водорода (когда применяется метилоранж и соляная кислота) движутся к катоду и дают розовую окраску.

Наряду с этим окраска перемещается и в сторону, противоположную движению ионов. Но это перемещение происходит значительно медленнее и вызвано явлением диффузии. Возможен вариант опыта, когда фильтровальную бумагу кладут на цилиндр из изолирующего материала (рис. 123). Для этого может быть использован цилиндр от реостата. На концах цилиндра ставят два обжима из медных полос. Плотное прилегание обжимов обеспечивает хороший контакт. В остальном опыт проводится также.

## Опыт 72. Электролиз медного купороса

**Оборудование:** плоскопараллельный стеклянный сосуд, два угольных электрода, раствор медного купороса, демонстрационный амперметр, батарея аккумуляторов 5-НКН-22, реостат ползунковый 25—30 ом, соединительные провода, ключ, весы демонстрационные, разновесы.

Для опыта приготавливают раствор медного купороса. Концентрация его может быть различной. Лучше всего растворить при комнатной температуре медный купорос, взяв последний в избытке и слив остаток.

Наливают раствор медного купороса в стеклянный сосуд. Один угольный электрод укрепляют в специальном держателе и опускают его в раствор. Другой электрод вместе с соединительными проводниками подвешивают к коромыслу весов и уравнивают их. Электрод при этом тоже погружен в раствор (рис. 124).

Собирают электрическую цепь. В качестве источника тока применяют батарею аккумуляторов, демонстрационный амперметр берут с шунтом на 3 а, переключив его на постоянный ток. Под-

вешенный к коромыслу весов электрод соединяют с отрицательным полюсом батареи аккумуляторов.

В опыте, во-первых, показывается сам факт отложения металла на катоде, во-вторых, качественно демонстрируется зависимость массы выделившегося на катоде вещества от величины тока и времени его прохождения (I закон Фарадея).

Замечают время и включают собранную цепь, реостатом устанавливают ток порядка 4-6а. Столь большой ток необходим, чтобы

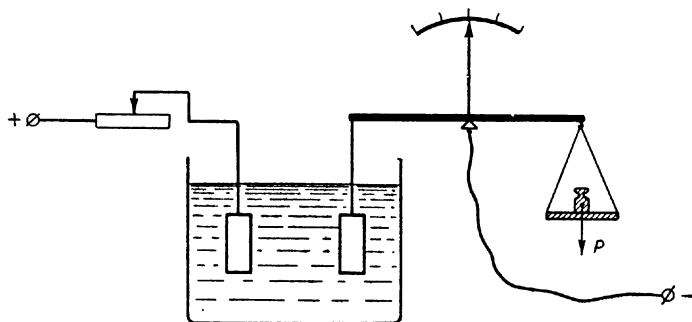


Рис. 124. Схема опыта по электролизу медного купороса

время демонстрации сократить. По мере выделения меди на катоде равновесие весов нарушается. Через некоторое время  $t$  (несколько минут) выключают цепь и уравнивают весы. Масса выделившегося вещества равна массе дополнительных гирь. Вынимают на время электрод и показывают отложение меди. Опять замыкают цепь на то же время  $t$  и после выключения цепи вновь уравнивают весы. Устанавливают, что масса выделившегося вещества  $m$  пропорциональна времени протекания тока  $t$  ( $m \sim t$ ).

Уменьшают ток в два раза ( $I = 2 - 3$  а). Повторяют опыт, пропуская ток то же время  $t$ , что и в первом опыте. Масса выделившегося вещества получается в два раза меньшей, чем в первом опыте. Делают вывод, что масса вещества пропорциональна току ( $m \sim I$ ).

Возможно не уравнивать весы при выходе их из положения равновесия, а о массе отложившейся меди судить по углу поворота коромысла весов. Действительно, при малых углах  $\text{tg } \alpha \sim \alpha$ , а следовательно, масса выделившейся на катоде меди пропорциональна углу  $\alpha$ . Сам угол не измеряют, а подсчитывают число делений на шкале весов. Для установления пропорциональности этого вполне достаточно.

Обобщая полученные результаты, записывают  $m \sim It$  или  $m = kIt$ . Коэффициент пропорциональности  $K$  получил название электрохимического эквивалента вещества.

Опыт требует довольно много времени и поэтому возможно показать только сам факт отложения меди. В этом случае закон электролиза выводят, исходя из теоретических представлений. Ток в электролите — это перемещение в электрическом поле ионов. Чем больше прошел через электролит заряд  $q$ , тем больше переместилось ионов и больше отложилось на катоде металла. Делают вывод, что  $m \sim q$ . Но  $q = It$ , следовательно,  $m \sim It$  или  $m = KIt$ .

### Опыт 73. Изменение сопротивления электролитов при нагревании

**Оборудование:** вольтметр с угольными электродами, химический стакан, раствор серной кислоты, спиртовка, штатив, соединительные провода, лампа накаливания, патрон на панельке, пипетка.

Собирают установку, в которой последовательно с вольтметром включена лампа накаливания (см. рис. 122). Наливают воду, включают цепь и добавляют пипеткой каплями серную кислоту, пока не будет виден слабый накал лампы. Если растворить много серной кислоты, лампа будет ярко светиться, но при этом не удастся при нагревании заметить изменение проводимости раствора.

Выключают цепь и сливают электролит из вольтметра в чисто вымытый химический стакан. Зажигают спиртовку и нагревают стакан с электролитом. Нагретый электролит опять выливают в вольтметр, включают цепь и наблюдают значительно более яркое свечение лампы. Это говорит об увеличении проводимости электролитов при нагревании. Напоминают учащимся, что у металлов при нагревании проводимость, наоборот, уменьшается. При наличии газовой горелки возможно нагревать электролит в химическом стакане, куда опущены электроды. При этом отпадает необходимость в применении специального вольтметра и во время опыта электролит не нужно переливать.

Объясняют изменение проводимости электролитов при нагревании тем, что при повышении температуры усиливается процесс диссоциации.

### Опыт 74. Проводимость стекла при размягчении<sup>1</sup>

**Оборудование:** стеклянная палочка длиной 10—12 см, диаметром 5—8 мм, патрон и лампа накаливания 25—40 вт, газовая горелка, соединительные провода.

На концы стеклянной палочки плотно наматывают оголенные толстые медные провода так, чтобы между последними витками проводов остался промежуток 5—10 мм. Собирают цепь, в которую

<sup>1</sup> Опыт описан в книге Д. Д. Галанина и др., Физический эксперимент в школе, т. III, Учпедгиз, 1954, стр. 169.

последовательно включен промежуток между проводами — стеклянная палочка (рис. 125). Цепь питают от сети переменного тока напряжением 127 или 220 в.

Включают цепь под напряжение и отмечают, что при этом тока нет. Стекло является в твердом состоянии диэлектриком и разрывает цепь.

Затем нагревают стеклянную палочку в промежутке между витками в пламени газовой горелки. Когда стекло будет доведено до красного каления, лампа накаливания начинает светиться.

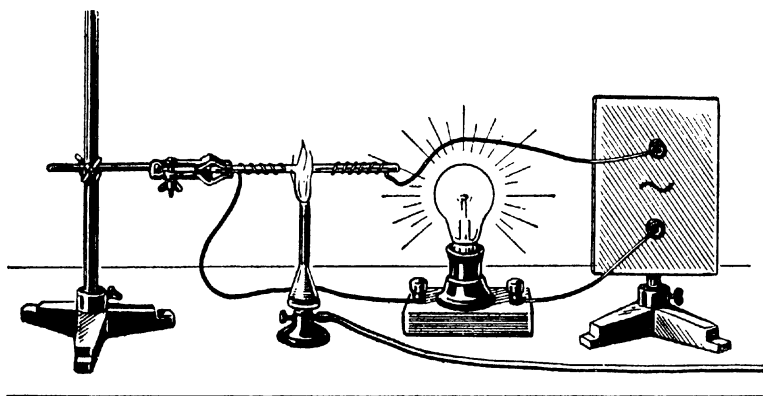


Рис. 125. Проводимость стекла при размягчении

Объясняется данное явление ионной проводимостью стекла при размягчении. Подробное рассмотрение этого вопроса в школе вряд ли целесообразно. Также не следует показывать, что далее проводимость стекла может сохраняться и без внешнего нагрева. В этом случае стекло нагревается проходящим по нему током. Но для этого ток должен быть достаточно большим, что возможно при мощной лампе. В средней школе вполне достаточно показать лишь сам факт проводимости стекла при размягчении.

## **§ 2. ХИМИЧЕСКИЕ ИСТОЧНИКИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА. ТЕХНИЧЕСКИЕ ПРИМЕНЕНИЯ ЭЛЕКТРОЛИЗА**

В средней школе целесообразно рассматривать лишь сущность процессов, происходящих в химических источниках тока. Поэтому в описанных ниже опытах не будет обращать большое внимание на технические данные различных источников тока и на правила их эксплуатации. Это должно быть предметом специального изучения.

Принцип действия элементов лучше всего понять из рассмотрения элемента Вольта. Естественно, данный элемент необходимо про-

демонстрировать в первую очередь. Наиболее подробно следует разобрать элемент Лекланше, так как он широко применяется. Элемент Грене изучать вряд ли следует, вследствие того, что он почти нигде не применяется.

Принцип действия аккумуляторов обычно демонстрируют на кислотных аккумуляторах, но изучаться должны как кислотные, так и щелочные аккумуляторы.

Технических применений электролиза весьма много. Часть из них можно было бы продемонстрировать в классе. Однако более целесообразно в этом случае показать кинофильм «Электролиз и его применение в технике». Это объясняется тем, что число возможных классов демонстраций за урок ограничено, а в кинофильме за очень короткое время показаны многочисленные применения электролиза. Это важно как в политехнических, так и в общеобразовательных целях.

Из этих соображений и произведен отбор опытов.

### О п ы т 75. Различные элементы

**Об о р у д о в а н и е:** элемент Вольта для проекции, элемент Лекланше, демонстрационный вольтметр, проекционный аппарат ФОС, раствор серной кислоты, необходимые материалы для амальгамирования (5%-ный раствор азотной кислоты, ртуть, щеточка), лампа для карманного фонаря (1 в) на стойке, недействующий элемент Лекланше с соответствующими разрезами.

Цинковый электрод элемента Вольта предварительно амальгамируют<sup>1</sup>. Вначале его промывают в слабом растворе азотной кислоты, потом опускают в чашечку со ртутью и щеточкой протирают до тех пор, пока весь электрод не покроется слоем амальгамы.

Наливают в специальную кюветку раствор серной кислоты и опускают электроды: амальгамированный цинковый и медный. С помощью проекционного аппарата показывают полученный элемент Вольта в проекции. При разомкнутой внешней цепи никаких реакций в источнике тока не происходит.

Объясняют происходящие в элементе процессы следующим образом. Пусть имеются два сосуда, соединенные трубкой с краном (рис. 126, а), который закрыт. В левый сосуд опущена цинковая, а в правый — медная пластины. Медь и цинк растворяются в кислоте, и в раствор уходят ионы  $Zn$  и  $Cu$ , оба заряженные положительно. Поэтому медная и цинковая пластинки зарядятся отрицательно. Процесс растворения металлов идет до определенного момента, пока между раствором и электродом не установится определенная разность потенциалов. Действительно, поле, возникающее при этом, препятствует дальнейшему растворению металлов, так

---

<sup>1</sup> Амальгамирование надо проводить в вытяжном шкафу.



как ионы металла положительны и электролит вокруг электрода заряжен положительно. При некоторой разности потенциалов между электродом и электролитом, называемой упругостью растворения, процесс растворения прекращается.

Упругость растворения разных металлов неодинакова. Поэтому на рисунке 126, а показано, что цинковый электрод получил относительно электролита значительно больший отрицательный потенциал, чем медный электрод.

Затем открывают кран, банки соединяются между собой и получается химический источник тока. В нем электроды относительно электролита имеют разные потенциалы. Нулевую точку потенциала можно выбирать произвольно. Пользуясь этим, выбирают нулевой потенциал так, чтобы цинковый электрод имел относительно его более низкий (отрицательный) потенциал, а медный электрод — более высокий (положительный) потенциал.

Обращают внимание на то, что если бы оба электрода были одинаковые, то у них была бы одинаковая и упругость растворения. В этом случае химического источника бы не получилось, так как между электродами не было бы разности потенциалов. Таким образом, химический источник тока обязательно должен иметь два разных электрода. Нетрудно понять, что в химическое взаимодействие с электролитом может вступать один электрод, а не обязательно два.

Далее замыкают внешнюю цепь и наблюдают происходящие процессы. Цинковый электрод растворяется, а на медном выделяются пузырьки водорода. Присоединяют к зажимам элемента демонстрационный вольтметр и наблюдают, как уменьшаются его показания. Происходит это вследствие поляризации.

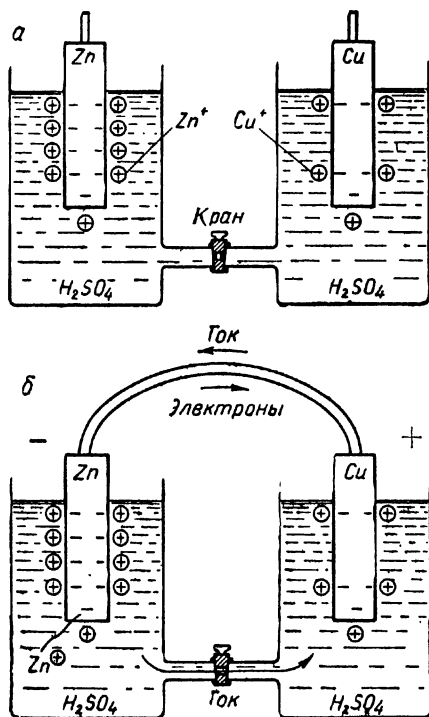


Рис. 126. К объяснению работы элемента:  
а — внешняя цепь разомкнута; б — внешняя цепь замкнута

На схеме элемента чертят внешнюю цепь (рис. 126, б). Так как между зажимами есть разность потенциалов, то во внешней цепи пойдет ток. Но при этом разность потенциалов должна уменьшаться и через некоторое время вообще исчезнуть. Однако это не произойдет вследствие того, что начинается вновь процесс растворения металла и между электродами постоянно поддерживается определенная разность потенциалов.

Если рассматривать все происходящее с энергетической точки зрения, то в химическом источнике тока происходит процесс превращения химической энергии в электрическую. При работе источника тока (замкнутая внешняя цепь) этот процесс идет непрерывно. В случае размыкания цепи процесс прекращается.

Объясняют причину поляризации и указывают на различные способы деполяризации. Примером элемента, в котором устранена поляризация, является элемент Лекланше. В нем в качестве деполяризатора применяется перекись марганца.

Показывают элемент Лекланше, присоединяют к нему лампу от карманного фонаря и демонстрационный вольтметр. Показания вольтметра теперь не изменяются. Устройство элемента Лекланше показывают на другом специально подготовленном элементе, где сделаны соответствующие разрезы.

#### О п ы т 76. Принцип действия аккумулятора

**Оборудование:** плоскопараллельный стеклянный сосуд, два свинцовых электрода со специальными держателями, демонстрационный амперметр<sup>1</sup>, реостат (25—30 ом, 3 а), батарея аккумуляторов 3-НКН-10, лампа для карманного фонаря (1 в) на стойке, раствор серной кислоты, набор аккумуляторных пластин, соединительные провода и ключ.

В стеклянный сосуд наливают раствор серной кислоты и опускают свинцовые электроды. К зажимам собранного аккумулятора присоединяют лампочку для карманного фонаря и демонстрационный амперметр (рис. 127). Лампа не светится, показания прибора равны нулю.

Собирают цепь для заряда аккумулятора. В качестве источника тока используют батарею аккумуляторов 3-НКН-10. Последовательно с заряжаемым аккумулятором соединяют реостат и амперметр (рис. 128). Замыкают цепь и реостатом устанавливают ток порядка 1—2 а. Замечают, в какую сторону отклонилась стрелка амперметра. Через 2—3 мин размыкают цепь.

Отсоединяют батарею аккумуляторов 3-НКН-10 и реостат, а в цепь включают лампочку для карманного фонаря. При замыкании цепи лампа светится, а стрелка амперметра отклоняется в другую

---

<sup>1</sup> Стрелку амперметра корректором устанавливают в среднее положение шкалы, чтобы она могла отклоняться и влево и вправо.

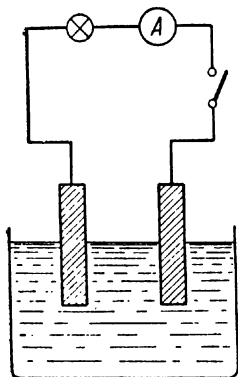


Рис. 127. Схема демонстрации с незаряженным аккумулятором

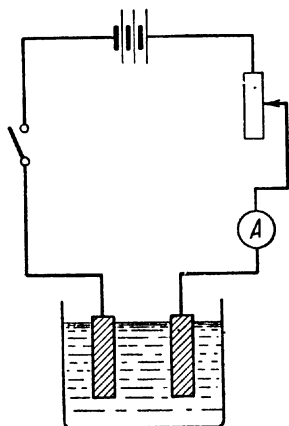


Рис. 128. Схема для заряда аккумулятора

сторону, чем при зарядке аккумулятора. Аккумулятор стал источником тока и разряжается.

В заключение показывают набор пластин от кислотного аккумулятора и объясняют его устройство. Очень полезны в этом случае монтажи, на которых даны все части аккумулятора. Показывают батарею щелочных аккумуляторов 3-НН-10 и объясняют их устройство также с помощью монтажа.

### О п ы т 77. Применение электролиза в технике

**Оборудование:** кинопроектор, экран, кинофильм «Электролиз и его применение в технике».

Кинофильм имеет 2 части и демонстрируется в течение 18 мин.

Вначале в фильме показывают производство электротехнической меди. Как известно, при рафинировании меди используется анодное растворение. С помощью мультипликаций объясняются процессы диссоциации, молизации, движение ионов в электрическом поле. Менее подробно демонстрируется применение электролиза в производстве алюминия, магния, натрия и калия.

В конце первой части кинофильма объясняется гальваностегия, в частности никелирование различных деталей.

Вторая часть кинофильма начинается с демонстрации черного никелирования, цинкования и хромирования. В заключение фильма демонстрируется гальванопластика — открытие русского ученого Якоби. Здесь показывается снятие копий с оригинала: изготовление матриц для грампластинок, получение отпечатков частей скульптуры.

## Г Л А В А VI

### ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК В ГАЗАХ

#### § 1. ПРИРОДА ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА В ГАЗАХ

При изучении в средней школе электрических явлений в газах ставятся лишь демонстрационные опыты качественного характера. Главная задача — разъяснить природу электрического тока в газах, сущность несамостоятельного и самостоятельного разрядов. Когда же физика процессов, происходящих в газе при прохождении электрического тока, вскрыта, рассматриваются виды разрядов при атмосферном давлении.

#### О п ы т 78. Разряд электроскопа под действием внешнего ионизатора

В качестве внешнего ионизатора можно применять пламя, лучи Рентгена, радиоактивное излучение, ультрафиолетовые лучи. Поэтому здесь возможна демонстрация целого ряда опытов.

##### I. Внешний ионизатор-пламя

**Оборудование:** раздвижной конденсатор, демонстрационный стрелочный электрометр, палочки из органического стекла или эбонита, шерсть и шелк, свеча, спички.

Собирают установку с раздвижным конденсатором, обкладки которого соединены с электрометром (одна — со стержнем, а другая — с корпусом) — рисунок 129. Заряжают конденсатор с помощью какой-либо палочки, при этом электрометр дает показания. Если затем внести в промежуток между обкладками конденсатора пламя свечи или даже пламя спички, то конденсатор разрядится и стрелка электрометра установится на нуле.

Объяснение происходящих при этом явлений оказывается дать не так просто. Дело в том, что температура пламени очень низка для осуществления термоионизации, т. е. не может произойти ионизация при столкновении атомов, получивших очень большие энергии в результате теплового движения. Поэтому механизм иони-

зации пламенем можно вообще не объяснять и ограничиться лишь сообщением того, что ионизация при этом осуществляется за счет энергии, выделяющейся при химической реакции горения.

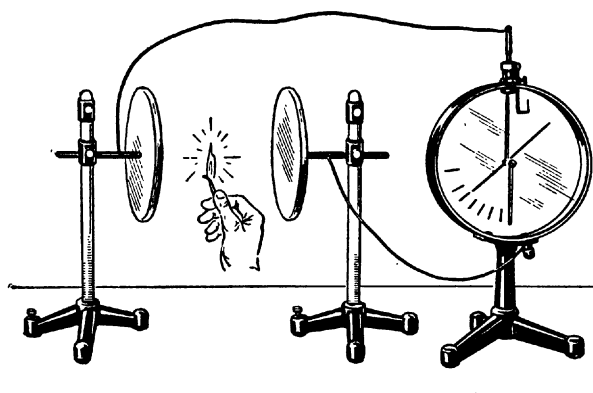


Рис. 129. Разряд электроскопа под действием внешнего ионизатора — пламени

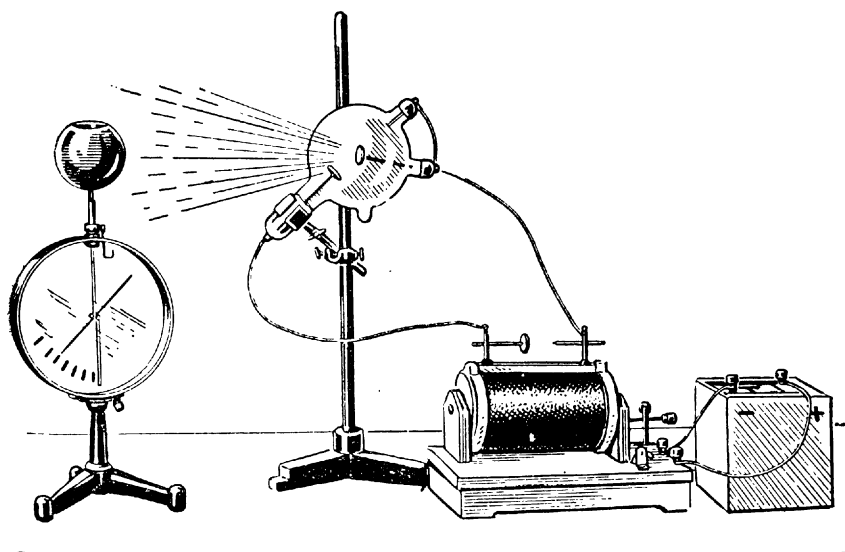


Рис. 130. Разряд электроскопа под действием внешнего ионизатора — рентгеновых лучей

## 2. Внешний ионизатор — лучи Рентгена

**Оборудование:** демонстрационный стрелочный электрометр, шаровой кондуктор, палочки из органического стекла и эбонита, шерсть, трубка Рентгена (ионная), высоковольтный индуктор ИВ-100 или ИВ-50, батарея аккумуляторов 5-НКН-22, соединительные провода.

Собирают установку, в которой имеется трубка Рентгена с соответствующим питанием от высоковольтного индуктора и электрометр с шаровым кондуктором. Трубку устанавливают в штативе так, чтобы поток рентгеновых лучей попадал на кондуктор электрометра (рис. 130). Заряжают электрометр отрицательно. При включении трубки Рентгена электрометр разряжается. Здесь ионизация происходит под действием рентгеновских лучей.

Как уже говорилось, в качестве внешнего ионизатора могут быть применены и ультрафиолетовые лучи. Возможен опыт с ртутной лампой. Постановка его аналогична предшествующему опыту. Опыт с радиоактивным излучением в школе поставить не удастся из-за отсутствия сильного радиоактивного препарата.

### Опыт 79. Несамостоятельный и самостоятельный разряды в газах

**Оборудование:** высоковольтный индуктор ИВ-50 или ИВ-100, раздвижной конденсатор, батарея аккумуляторов, газовая горелка или спиртовка, соединительные провода.

Предварительно заметим, что в данном опыте вскрывается основное отличие несамостоятельного разряда от самостоятельного. Зависимость же тока от напряжения в газовом промежутке, а также вопрос о токе насыщения здесь не рассматривается.

Устанавливают на изолирующих штативах пластины раздвижного конденсатора и соединяют их с электродами высоковольтного индуктора (рис. 131). Диск и острие, обычно устанавливаемые на индукционной катушке, раздвигают. Первичную цепь высоковольтного индуктора можно питать от батареи аккумуляторов.

Пластины конденсатора устанавливают на таком расстоянии, чтобы между ними при работе индуктора не проскакивала искра. Газовый промежуток при этом является изолятором.

Затем между пластин конденсатора вводят газовое пламя или пламя спиртовки при выключенном индукторе. После включения индуктора сразу же начинается разряд, что свидетельствует о появлении ионов. Выносят пламя, и разряд прекращается. Делают вывод, что разряд, происходящий только при наличии внешнего ионизатора, следует назвать несамостоятельным разрядом.

Затем выключают индуктор и сближают обкладки конденсатора<sup>1</sup>. При включении индуктора возникает разряд, хотя внешнего ионизатора при этом нет. Делают вывод, что данный разряд естественно назвать самостоятельным разрядом.

Выясняют с учащимися, что произошло при сближении обкладок конденсатора. Так как индуктор практически дает постоянное напряжение, то при уменьшении расстояния между пластинами увеличивается напряженность электрического поля  $E = \frac{U}{l}$ . Но

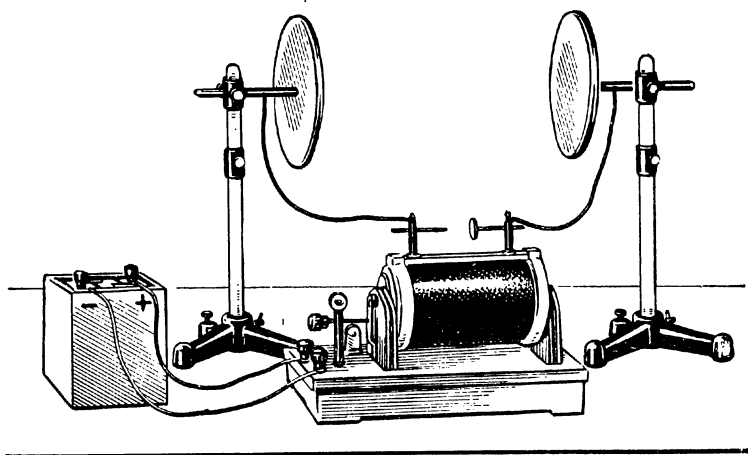


Рис. 131. Установка для демонстрации несамостоятельного и самостоятельного разрядов в газах

в воздухе всегда имеются, хоть и в малом количестве, ионы. Они возникают в основном в результате действия космических лучей и других излучений. В поле большой напряженности эти ионы приобретают уже такую энергию, что производят ионизацию, сталкиваясь с нейтральными молекулами. Процесс образования ионов при этом развивается лавинообразно, в результате чего и возникает самостоятельный разряд.

Как уже говорилось, главная задача данного опыта в основном состоит в показе возможности самостоятельного разряда. Детализировать, что при этом возникает искровой разряд, и называть его так здесь не следует.

<sup>1</sup> Расстояние, на котором нужно сближать обкладки, следует установить до урока опытным путем.

## Опыт 80. Зависимость тока в газовом промежутке от напряжения

**Оборудование:** раздвижной конденсатор, кенотронный выпрямитель, реостат (1000—5000 ом, 0,3 а), зеркальный гальванометр, вольтметр постоянного тока (0—300 в), спиртовка или газовая горелка, соединительные провода.

В опыте показывают зависимость величины тока в газовом промежутке от напряжения. Как известно, при малых напряжениях в газовом промежутке существует пропорциональность между током и напряжением, но при дальнейшем увеличении напряжения ток перестает зависеть от последнего (ток насыщения), но при некоторых определенных условиях ток очень резко возрастает — возникает самостоятельный разряд в газах. В этом случае уже нет необходимости во внешнем ионизаторе. Графически данная зависимость тока от напряжения в газах представлена на рисунке 132.

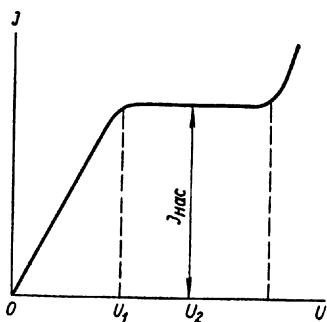


Рис. 132. Зависимость тока от напряжения в газовом промежутке

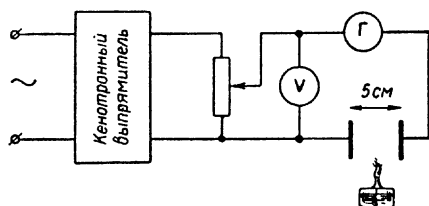


Рис. 133. Принципиальная схема опыта по снятию зависимости тока от напряжения в газовом промежутке

Применяя кенотронный выпрямитель, можно показать зависимость тока от напряжения лишь на первом участке кривой, когда между ними существует пропорциональная зависимость.

Собирают электрическую цепь с конденсатором, между обкладками которого имеется воздушный промежуток примерно 5 см (рис. 133). Вначале в качестве источника тока используют кенотронный выпрямитель, на выход которого включен реостат по потенциометрической схеме. Напряжение с потенциометра подают на пластины раздвижного конденсатора. Величину напряжения измеряют вольтметром. В качестве внешнего ионизатора применяют пламя газовой горелки или спиртовки. Ток в цепи измеряют зеркальным гальванометром. Обычные демонстрационные гальванометры использовать здесь нельзя вследствие их малой чувствительности. Демонстрация заключается в следующем.



Вначале показывают, что при отсутствии внешнего ионизатора тока в цепи нет. Зайчик зеркального гальванометра незначительно отклоняется, хотя подается на пластины раздвижного конденсатора максимально возможное напряжение (около 300 в).

Затем уменьшают напряжение, снимаемое с потенциометра до 50 в. Вносят в воздушный промежуток пламя газовой горелки или спиртовки. Зайчик зеркального гальванометра отклоняется; замечают значение тока.

Последовательно устанавливают напряжение 100, 150, 200 в и т. д., замечая при этом соответствующие значения тока. Ток в цепи растет пропорционально напряжению. Обращают внимание учащихся, что ионизатор один и тот же.

Объясняют наблюдаемую зависимость. В газе процесс ионизации всегда сопровождается обратным ему процессом рекомбинации ионов. Внешний ионизатор при своем действии создает ионы, а рекомбинация ионов приводит к их нейтрализации. Если в газовой промежутке действует электрическое поле, то ионы приходят в движение и нейтрализуются также на электродах.

При малой разности потенциалов на электродах напряженность поля между ними также мала и ионы движутся с незначительными скоростями и достигают электродов лишь ионы, находящиеся вблизи их. Далеко расположенные от электродов ионы, еще не достигнув электродов, нейтрализуются. Естественно, что ток при этом мал.

При увеличении напряжения и напряженности электрического поля увеличивается и скорость ионов. Теперь уже большая часть ионов достигает электродов, а число нейтрализующихся в единицу времени ионов уменьшается. Естественно, что ток в цепи увеличивается. Однако такая пропорциональная зависимость тока от напряжения имеет место лишь в незначительном интервале напряжений (рис. 132, интервал  $0 - U_1$ ). В этом интервале к газам применим закон Ома.

При дальнейшем увеличении напряжения ( $U > U_1$ ) возникает ток насыщения. При этом ток уже не изменяется при увеличении напряжения, а зависит лишь от ионизирующей способности внешнего ионизатора. Данное явление можно объяснить тем, что ионы двигаются уже с такими скоростями, что все ионы, создаваемые ионизатором в единицу времени, успевают достичь электродов. Практически при этом процесса рекомбинации нет. Изменение же напряжения приводит теперь только к изменению скорости движения ионов, а число переносимых в единицу времени ионов остается неизменным, т. е. ток постоянен по величине.

При некотором напряжении  $U_2$  между обкладками раздвижного конденсатора в газе возникает ионизация ударом и ток резко увеличивается.

## § 2. РАЗЛИЧНЫЕ ВИДЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЗАРЯДОВ В ГАЗЕ ПРИ АТМОСФЕРНОМ ДАВЛЕНИИ

В газах при атмосферном давлении могут быть коронный, кистевой, искровой и дуговой разряды. В школе демонстрируются все эти виды, за исключением кистевого, так как он для учащихся средней школы не представляет большого интереса. Однако и он может быть показан, если для этого будет время и соответствующие условия.

Объяснение всех видов разряда дается на основе классических представлений и лишь качественное.

Следует отметить, что возможно очень много вариантов описанных ниже опытов. Ниже будет дан лишь один из этих вариантов, который, на наш взгляд, является наиболее простым и методически целесообразным.

В разделе большое число различных технических применений. Так, необходимо продемонстрировать принцип действия электрофилтра, электроискровую обработку металлов, разъяснить сущность электросварки, выяснить действие газосветных трубок, ртутных ламп и т. п.

### Опыт 81. Коронный разряд

**Оборудование:** универсальный выпрямитель<sup>1</sup>, два изолирующих штатива, тонкая медная проволока диаметром 0,2—0,3 мм, соединительные провода.

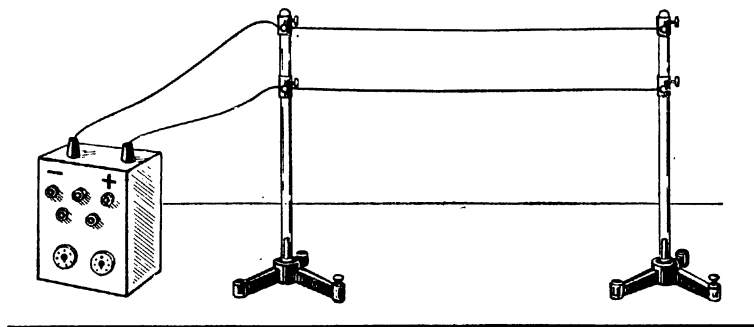


Рис. 134. Демонстрация коронного разряда

Между двумя изолирующими штативами натягивают параллельно две тонкие проволоки и концы их присоединяют к полюсам универсального выпрямителя (рис. 134). Затемняют класс и вклю-

<sup>1</sup> Здесь, а также в опытах 82, 83 вместо универсального выпрямителя возможно применение индукционной катушки или электрофорной машины. При этом кабинет должен быть очень хорошо затемнен.

чают выпрямитель. Возле проволок видно слабое свечение и слышен шипящий звук и потрескивание. Корона у верхнего и нижнего провода разная.

Разряд возникает вследствие ударной ионизации воздуха. Но эта ионизация происходит в основном вблизи проволоки, так как там напряженность электрического поля велика. Поле же, образующееся между проволоками, неоднородно и по мере удаления от проволоки напряженность его уменьшается.

Если электрод имеет острые выступы, то возможно возникновение кистевого разряда (свечения в виде кисти). Наличие острия приводит к большой неоднородности электрического поля и к значительно большей ионизации воздуха у острия. Данный вид разряда, как уже говорилось, можно не демонстрировать<sup>1</sup>.

В заключение объясняют учащимся, что коронный разряд приводит к значительным потерям энергии при передаче электроэнергии.

## О п ы т 82. Электрофилтр

О б о р у д о в а н и е: универсальный выпрямитель, широкогорлая банка, пробка к банке, стеклянная трубка длиной 30—40 см и диаметром 6—10 см, медная проволока, дымарь, соединительные провода, штатив универсальный.

Коронный разряд находит техническое применение при газоочистке в электрофилтрах.

Демонстрироваться может лишь принцип действия электрофилтра, либо одновременно с этим и его устройство. В последнем случае установка для демонстрации должна представлять собой модель применяемого в технике электрофилтра. Вначале опишем наиболее простую демонстрацию, вскрывающую лишь принцип действия электрофилтра<sup>2</sup>.

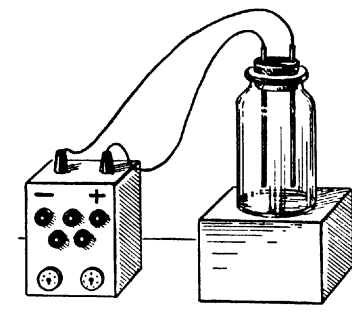


Рис. 135. Демонстрация принципа действия электрофилтра

Для этого берут стеклянную банку с широким горлом (рис. 135). В пробке банки делают на большом расстоянии друг от друга два тонких отверстия и пропускают через них тонкую медную проволоку. Банку с помощью дымаря заполняют дымом и закрывают пробкой так, чтобы концы проволок не замкнулись меж-

<sup>1</sup> Очень просто осуществляется кистевой и коронный разряды в трансформаторе Тесла. Здесь применять данный прибор вряд ли целесообразно, так как нельзя объяснить его действие.

<sup>2</sup> Т. Ф. Герасименко, Электрический ток в газах и вакууме, Учпедгиз, 1957, стр. 24.

ду собой. Соединяют проводники с электродами универсального выпрямителя, или высоковольтного индуктора, или с кондукторами электрофорной машины и подают высокое напряжение. Дым в банке исчезает.

Объясняют происходящее явление. При включении высокого напряжения у проводников возникает корона — происходит сильная ионизация воздуха. В электрическом поле между проволочками движутся газовые ионы, но они соударяются с частицами, образующими дым, и заряжают их. Заряженные частицы дыма под дей-

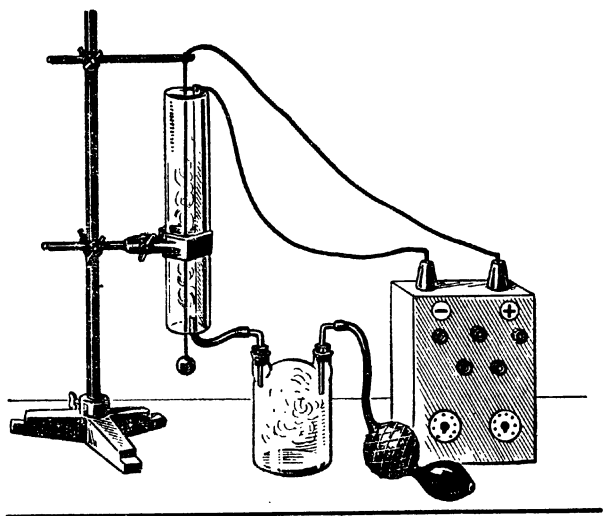


Рис. 136. Демонстрация принципа действия и устройства электрофилтра

ствием электрического поля движутся к проволочкам (электродам) и оседают на них.

Для очистки отходящих газов на производстве электрофилтры строятся в виде вертикальных труб большой высоты. Модель устройства и действия такого электрофилтра можно очень просто собрать из подручных материалов. Для этого берут стеклянную трубку длиной 30—40 см и возможно большего сечения (диаметром 6—10 см). Внутри трубки вдоль ее стенки протягивают длинную узкую станиолевую ленту и концы ее приклеивают. Укрепляют трубку вертикально на универсальном штативе так, чтобы снизу можно было заполнять ее дымом. На изолированном стержне, расположенном над трубкой, подвешивают тонкую проволоку с тяжелым шариком на конце. Проволока должна расположиться вдоль оси трубки и не касаться ее стенок. Концы проволоки и ста-

ниоловой ленты соединяют проводниками с универсальным выпрямителем (рис. 136).

При включении выпрямителя газ в трубке очищается от частичек дыма, подаваемого снизу от дымара.

Возможно демонстрировать не оба, а какой-нибудь один из описанных опытов.

### Опыт 83. Искровой разряд

**Оборудование:** универсальный выпрямитель, соединительные провода.

Устанавливают электроды и включают высоковольтный выпрямитель. При этом между электродами возникает искра. Можно показать воспламенение бумаги. Для этого тонкий листок бумаги помещают между электродами, вблизи острия и держат до тех пор, пока листок не воспламенится.

Искровой разряд возникает при очень больших напряжениях электрического поля. Особенностью этого разряда является то, что он очень кратковременный и за это время протекает очень малый заряд.

Например, в молнии разряд длится миллионные доли секунды и, хотя величина тока при разряде очень большая (тысячи ампер), заряд весьма мал (доли кулона).

Учащимся рассказывают, как образуется электронная лавина, проводят аналогию со снежной лавиной.

Грозозащита здесь не объясняется и не демонстрируется, так как этот вопрос изучается достаточно подробно в восьмилетней школе.

### Опыт 84. Электроискровая обработка металлов<sup>1</sup>

**Оборудование:** прибор для электроискровой обработки металлов, батарея конденсаторов, соединительные провода, осветитель для теневого проекционирования.

Собирают установку, схема которой дается на рисунке 137. Питается цепь от источника постоянного тока напряжением 100—200 в. Демонстрация возможна и при питании установки от сети переменного тока.

Прибор для электроискровой обработки представляет собой проекционную кюветку, в которой установлены два электрода: один из латуни, а другой — стальной (лезвие от безопасной бритвы). Латунный электрод можно перемещать вручную, устанавливая искровой промежуток нужной величины. Внутри кюветы налит керосин. Батарея конденсаторов должна иметь емкость 20—30 мкф

<sup>1</sup> Описан опыт Г. И. Жереховым, см. журнал «Физика в школе», 1953, № 4, стр. 66. Демонстрационный прибор разработан Б. С. Зворыкиным

и в случае питания цепи переменным током конденсаторы должны быть с бумажным диэлектриком. Применение в этом случае электролитических конденсаторов недопустимо. Для ограничения тока в случае замыкания электродов в цепь включается сопротивление порядка 100—200 *ом*.

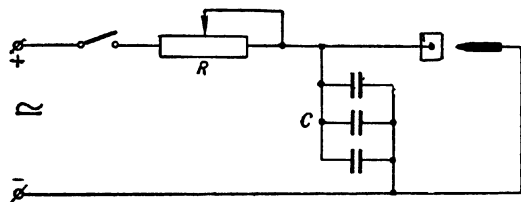


Рис. 137. Схема установки для электронской обработки металлов ( $R = 100 - 200 \text{ ом}$ ,  $C = 20 - 30 \text{ мкф}$ )

Лучше всего применить специальную батарею конденсаторов 58 *мкф*, выпускаемую Главучтехпромом.

Действие прибора хорошо видно, так как осуществляется проекция опыта на экран в затемненном классе. Здесь осуществляется теневое проецирование с помощью специального проектора. Общий вид всей установки приведен на рисунке 138.

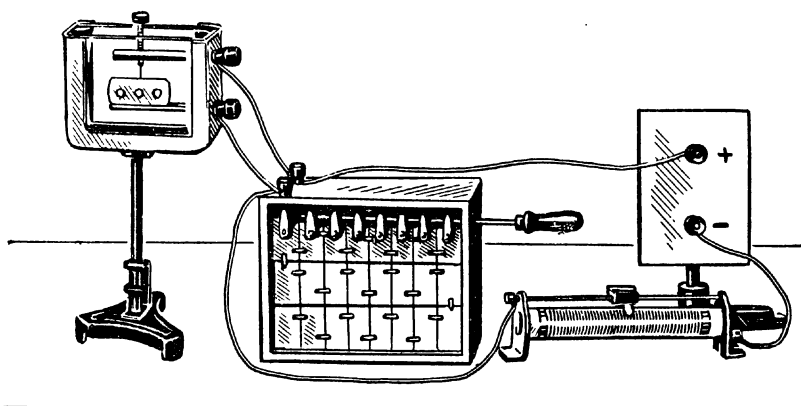


Рис. 138. Установка для демонстрации электронной обработки металлов

Вначале, проецируя прибор на экран, показывают электроды и объясняют устройство установки. Затем, включая установку, подводят латунный электрод так близко к лезвию безопасной бритвы,

чтобы возник искровой разряд. При этом видна электроискровая эрозия металла и образование выемки у края лезвия. Чтобы искровой разряд не прекращался, подводят постепенно латунный электрод ближе к лезвию.

Демонстрация длится 2—3 сек. Чтобы учащиеся смогли лучше увидеть происходящее явление, опыт повторяют. При этом перемещают лезвие относительно латунного электрода, чтобы обработку вести уже в другом месте. Предварительно разряжают батарею конденсатора, замкнув ее электроды. В противном случае есть опасность попасть под напряжение.

Объяснение электроискровой обработки не вызывает затруднения и достаточно подробно дается в стабильном учебнике. Для иллюстрации технического использования электроискровой обработки металлов целесообразно показать учебный фильм «Электроискровая обработка металлов».

### Опыт 85. Дуговой разряд

**Оборудование:** электрическая дуга с механическим регулятором (возможно, приспособленная к проекционному аппарату), рычажный демонстрационный реостат, непрозрачный экран, объектив от проекционного фонаря, соединительные провода.

Собирают электрическую цепь, в которой последовательно включены электрическая дуга, и реостат. Реостат вначале включают на максимальное сопротивление (10 ом). Устанавливают приборы на демонстрационном столе, но между дугой и учащимися ставят маленький непрозрачный экран, так как лучи от дуги не должны попадать им в глаза. На штативе устанавливают объектив от проекционного фонаря, чтобы проецировать дугу на экран.

Питают цепь либо прямо от сети, либо от электрораспределительного щита. В последнем случае показывают дугу на переменном и на постоянном токах.

Включают цепь и соединяют угли. Когда в месте контакта угли накалятся, постепенно разводят их и одновременно уменьшают сопротивление реостата до 7—8 ом. При соответствующей настройке объектива на экране получается изображение дуги.

Возможна демонстрация дугового разряда и с самодельной дугой<sup>1</sup>. В этом случае на двух изолирующих штативах с помощью проволочных держателей укрепляют угли диаметром не более 5 мм. Штативы с углями устанавливают рядом, чтобы между концами углей возникла дуга (рис. 139). В остальном демонстрация осуществляется также.

Дуговой разряд возникает при малых напряжениях между электродами (40—50 в), но при большом токе. Принципиально важно,

<sup>1</sup> А. А. Покровский и др., Демонстрационные опыты по физике в VI и VII классах средней школы, изд. АПН РСФСР, 1954, стр. 298.

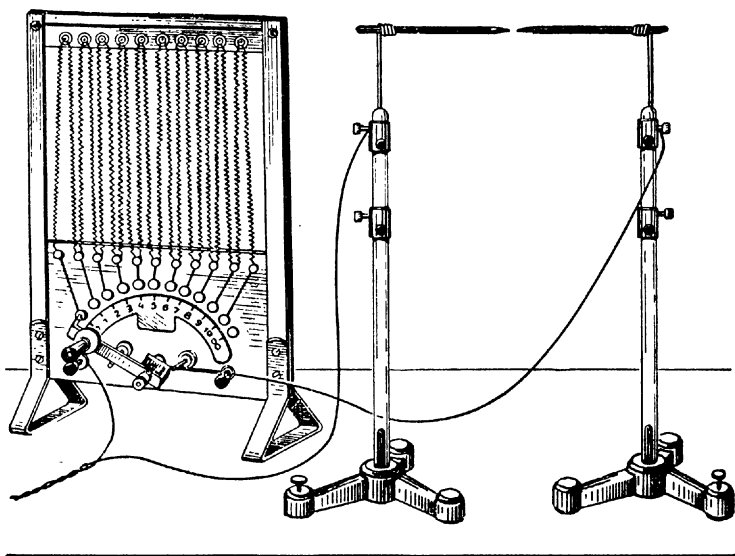


Рис. 139. Демонстрация дугового разряда с самодельной дугой

что дуга имеет падающую вольтамперную характеристику, т. е. при увеличении тока падение напряжения на дуге уменьшается. Для устойчивого горения дуги необходимо включение последовательно с ней реостата. Это сообщают учащимся.

При горении дуги на постоянном токе положительный уголь (анод) сгорает быстрее и в нем образуется кратер — происходит распыление вещества. В демонстрации дуга горит на переменном токе, так что кратеры образуются одновременно у обоих углей. Однако данную особенность дуги, горящей на постоянном токе, следует объяснить.

Дугу демонстрируют непродолжительное время, ибо в противном случае ее надо регулировать. Кроме того, нельзя допускать очень сильного нагревания демонстрационного реостата.

### О п ы т 86. Электросварка

**Оборудование:** кинопроектор, экран, кинофильм «Электрическая сварка металлов».

Показывают кинофильм «Электрическая сварка металлов». Для его демонстрации требуется 10 мин.

За это время на экране показывается способ электросварки, изобретенный Н. Н. Бенардосом, способ, предложенный Н. Г. Сла-



вяновым, контактная сварка, электросварка под водой и различные сварочные машины.

Давать дополнительные объяснения к кинофильму нет необходимости.

### § 3. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ РАЗРЯД В ГАЗАХ ПРИ ПОНИЖЕННОМ ДАВЛЕНИИ.

При постановке описанных ниже демонстраций следует иметь в виду, что все газоразрядные трубки (особенно ионная рентгеновская трубка, трубка со звездой, трубка с мельницей, трубка с минералами) являются мощными источниками рентгеновского излучения. Поэтому при постановке опытов необходимо принимать соответствующие меры предосторожности: не использовать очень высоких напряжений, помещать перед трубками экраны (например стекло, содержащее соли свинца) и т. п.

#### Опыт 87. Прохождение электрического тока через воздух при постепенном его разрежении. Тлеющий разряд

Оборудование: трубка стеклянная с электродами и патрубком, высоковольтный индуктор, батарея аккумуляторов 5-НКН-22, насос Комовского с двигателем, универсальный штатив, соединительные провода.

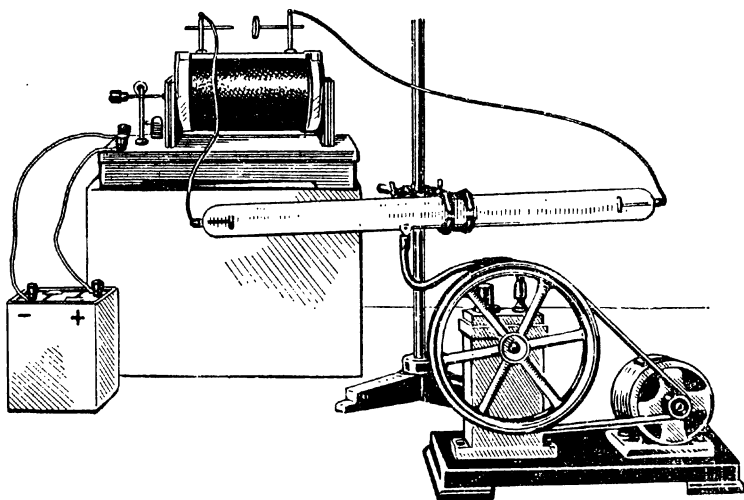


Рис. 140. Установка для демонстрации прохождения тока через воздух при постепенном его разрежении

Собирают установку (рис. 140), в которой к электродам высоковольтного индуктора подключены выводы стеклянной трубки с патрубком. Индуктор питается от батареи аккумуляторов. Контакты индуктора поставлены на таком расстоянии, чтобы в воздухе между ними не мог возникнуть разряд. На патрубок стеклянной трубки одевают резиновый шланг от насоса Комовского.

Вначале включают индуктор и наблюдают, что в трубке разряда нет.

С помощью насоса Комовского создают постепенно в трубке разрежение. При некотором давлении вспыхивает разряд в трубке. Вначале светящийся разряд имеет форму тонких светящихся нитей, а затем шнура. При дальнейшем понижении давления светящийся шнур размывается и расширяется, пока не займет почти всю трубку. Удастся заметить при этом и определенное строение столба светящегося разреженного газа в трубке.

Около катода наблюдается темное пространство, а у анода положительный светящийся столб. Меняя полярность, показывают, что темное пространство и светящийся столб возникают у разных электродов.

С помощью насоса Комовского удастся достичь лишь такого разрежения воздуха, что появляется свечение, занимающее почти всю трубку — это тлеющий разряд. Разряд в более разреженном газе показывают с помощью набора, получившего название шкалы пустотных трубок (см. опыт 88).

Опыт следует демонстрировать в полностью затемненном классе, так как при естественном освещении возникновение разряда в трубке заметить невозможно, ибо его яркость мала.

Объясняют учащимся, что разряд возникает вследствие того, что в разреженном газе увеличивается длина свободного пробега и электроны на данном пути приобретают энергию, достаточную уже для ионизации нейтральных молекул. Источником электронов является катод, который бомбардируется положительными ионами. Эти ионы и выбивают из катода электроны.

Кроме того, объясняют причину свечения газа — излучение возбужденных атомов газа. При возвращении в невозбужденное состояние атом излучает свет. Процесс поглощения и излучения энергии атомом имеет квантовый характер и здесь еще не может быть полностью объяснен.

Поле в трубке неоднородно, причем в основном падение напряжения происходит вблизи катода. Здесь наибольшая напряженность электрического поля. Газ же не светится, так как электроны еще не производят ионизации и возбуждения: они разгоняются на этом участке и приобретают необходимый для ионизации молекул запас кинетической энергии. В результате бомбардировки положительными ионами катода происходит эмиссия электронов с его поверхности (холодная эмиссия).

## Опыт 88. Шкала пустот

Оборудование: шкала пустотных трубок, высоковольтный индуктор, батарея аккумуляторов 5-НКН-22, соединительные провода.

Шкала пустот состоит из шести трубок (рис. 141), в каждой из которых имеется два электрода и их газ разрежен до разной степени. Давление в этих трубках, начиная с первой до шестой, соответственно равно 30; 10; 4; 0,5; 0,2—0,1 и 0,03—0,02 мм рт. ст. Укреплены все трубки на раме-стойке и могут включаться поочередно с помощью специального переключателя. Напряжение к трубкам подводят от высоковольтного индуктора<sup>1</sup>.

Соединяют клеммы на приборе с электродами высоковольтного индуктора и, поставив переключатель в первое положение, подключают первую трубку. Включив индуктор, наблюдают разряд в первой трубке. Последовательно переключателем включают поочередно все трубки. Свечение газа в них разное.

В трубке 1 разряд имеет вид тонкого светящегося шнура.

В трубке 2 разряд занимает почти всю трубку и уже намечается темное катодное пространство.

В трубке 3 явно видно темное катодное пространство и положительный анодный столб.

В трубке 4 наблюдаются страты, т. е. положительный анодный столб разбивается на отдельные слои.

В трубке 5 темное катодное пространство занимает большую часть трубки, страты становятся более широкими и расплывчатыми. Цвет свечения газа изменяется, становится более бледным и наблюдается зеленоватое свечение стекла.

И наконец в трубке 6 полностью исчезает положительное анодное свечение, все стенки трубки, лежащие против катода, светятся зеленым светом, а возле катода появляется слабое голубоватое свечение.

Демонстрация шкалы пустот дает возможность далее перейти к катодным лучам, которые возникают в трубках с давлением

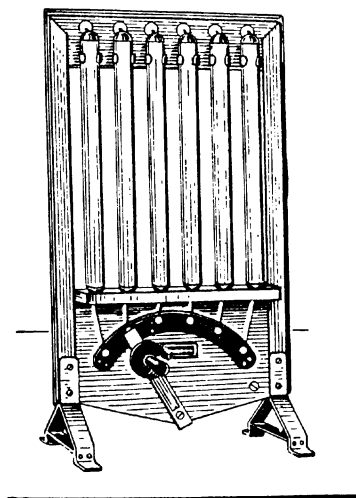


Рис. 141. Шкала пустот

<sup>1</sup> Можно применить и универсальный выпрямитель.

0,01 — 0,001 мм *рт. ст.* В трубке 6 давление порядка 0,02 — 0,01 и имеют место электронные пучки. Здесь они могут быть обнаружены лишь по вызываемому ими свечению стекла.

### О п ы т 89. Неоновая лампа и газосветные трубки

О б о р у д о в а н и е: набор неоновых ламп, газосветные трубки (Гейслеровы трубки), выпрямитель, реостат (1000 *ом*, 0,3 *а*), демонстрационный вольтметр, автотрансформатор (Латр-1 или Латр-2), соединительные провода.

Тлеющий разряд применяется в неоновых лампах и газосветных трубках.

Действие неоновой лампы можно показать вначале в случае постоянного напряжения, потом в цепи переменного тока. При возникновении тлеющего разряда такая лампа светится. На постоянном токе свечение будет лишь у одного электрода (анода), а на переменном токе — свечение у обоих электродов.

Собирают цепь из автотрансформатора, неоновой лампы и вольтметра (рис. 142). Меняют напряжение, подаваемое на неоновую лампу. Величину напряжения показывает вольтметр, включен-

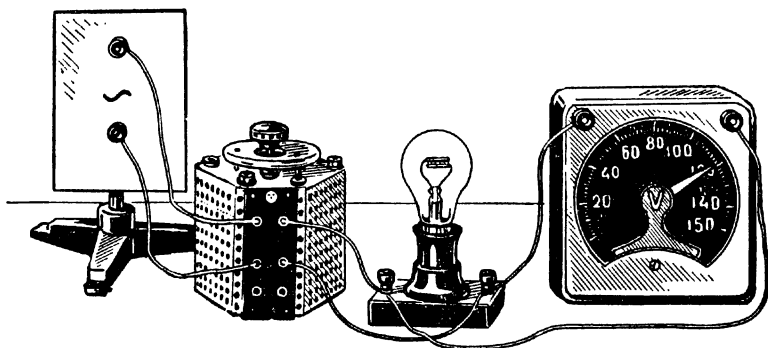


Рис. 142. Демонстрация загорания и погасания неоновой лампы

ный параллельно лампе. Здесь применяют демонстрационный вольтметр, переключая его на переменный ток и подключая дополнительное сопротивление на 250 *в*.

Вначале, при напряжении близком к нулю, неоновая лампа не горит. Постепенно увеличивают напряжение и замечают, когда лампа загорится. Напряжение, при котором происходит зажигание лампы, получило название напряжения зажигания. При дальнейшем увеличении напряжения неоновая лампа все время горит.

Теперь постепенно уменьшают напряжение. При некотором напряжении, получившем название напряжения погасания, лампа гаснет. Опыт показывает, что напряжение погасания, ниже напряжения зажигания.

Объяснять процессы, происходящие в неоновой лампе, не следует, так как тлеющий разряд в газах был уже разобран. Следует только указать, что неоновые лампы имеют самое различное назначение и по конструкции отличаются друг от друга.

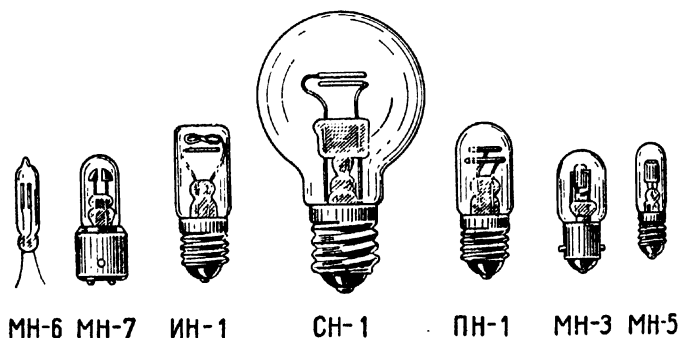


Рис. 143. Комплект неоновых ламп

Названия неоновых ламп характеризуют их назначение. Все неоновые лампы можно разбить на пять групп (рис. 143):

1. Сигнальные (СН);
2. Миниатюрные (МН);
3. Лампы специального назначения (панельные (ПН), фазовые (ФН), волномерные миниатюрные (ВМН);
4. Неоновые лампы для вольтоскопов (ВН), указатели высокого напряжения (УВН);
5. Многоэлектродные индикаторные лампы (ИН).

Электроды многоэлектродных индикаторных ламп выполнены в виде арабских цифр от 0 до 9. В зависимости от того, на какой электрод будет подано напряжение, зажигается та или иная цифра.

Наряду с неоновыми лампами показываются газосветные или Гейслеровы трубки. Это помогает разъяснить принцип действия световых реклам с газосветными трубками.

#### О п ы т 90. Прямолинейное распространение электронных пучков

О б о р у д о в а н и е: высоковольтный индуктор ИВ-100 или ИВ-50 (или универсальный выпрямитель), трубка вакуумная со звездой, батарея аккумуляторов 5-НКН-22 и соединительные провода.

Собирают установку (рис. 144), в которой высокое напряжение на вакуумную трубку подается от высоковольтного индуктора. Вначале звезду в вакуумной трубке ставят в горизонтальное положение. Включают индуктор и видят яркое свечение стекла против катода и менее интенсивное свечение всех стенок трубки. Это под действием ударяющихся о стекло электронов последнее люминес-

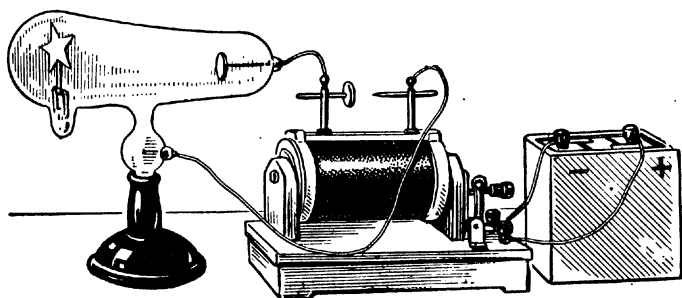


Рис. 144. Установка для демонстрации прямолинейного распространения электронных пучков

цирует. Выключают индуктор и наклоняют трубку так, чтобы звезда повернулась и заняла вертикальное положение.

Опять включают индуктор и наблюдают на стекле тень от звезды. Образование четко ограниченной тени говорит о прямолинейном распространении электронного пучка, идущего от катода.

Необходимо учитывать, что при очень мощном источнике высокого напряжения и длительной демонстрации опыта трубка может выйти из строя. В основном это связано с повышением вакуума в ней из-за поглощения газа стеклом.

Учащимся объясняют природу холодной эмиссии электронов. Механизм холодной эмиссии разбирают подробно, объясняя, что электроны выбиваются из катода ионами газа. Последние приобретают большую энергию под действием электрического поля, особенно вблизи катода, где имеется катодное падение напряжения.

Электроны, выбитые из катода, при своем движении в трубке не встречают молекул газа и поэтому не создается в трубке свечения. Стекло же под действием быстрых электронов люминесцирует.

Однако в трубке есть некоторое количество газа. Если бы молекул газа не было, то не могло бы быть и холодной эмиссии. Явление наблюдается при давлении порядка  $0,001 \text{ мм рт. ст.}$  и будет наблюдаться и при дальнейшем разрежении газа примерно до  $0,0001 \text{ мм рт. ст.}$  При большем разрежении явление не наблюдается.

Здесь же обращают внимание и на тот факт, что электронные пучки распространяются в направлении, перпендикулярном катоду, причем независимо от того, где расположен анод. Показывают анод в трубке. Он действительно расположен в стороне, вернее в нижней части трубки.

Прямолинейное распространение электронных пучков объясняется очень большой скоростью, приобретаемой электронами в области катодного падения напряжения. В остальной части трубки изменение напряженности электрического поля незначительное и электроны продолжают лететь в том же направлении. Незначительные силы, действующие на электроны, практически не могут изменить траекторию их движения.

### О п ы т 91. Движение электронов в магнитном и электрическом полях

Об о р у д о в а н и е: универсальный выпрямитель (или высоковольтный индуктор ИВ-100, ИВ-50), трубка вакуумная с люминесцирующим экраном, станиолиевые пластинки, магнит подковообразный, электрофорная машина, батарея аккумуляторов и соединительные провода.

К контактам высоковольтного выпрямителя на проволочных держателях присоединяют вакуумную трубку с люминесцирующим экраном (рис. 145). Здесь лучше в качестве источника высокого напряжения применить универсальный выпрямитель, а не индуктор, так как при этом трубка будет работать более устойчиво.

При подаче высокого напряжения на люминесцирующем экране возникает яркая светящаяся полоса. Это люминесцирует экран под действием электронов, прошедших через узкую щель в пластинке, расположенной около катода.

Подносят к трубке сверху магнит и наблюдают отклонение ярко светящегося следа. При изменении полюсов магнита изменятся и направление отклонения светящейся полосы.

Для демонстрации движения электронов в электрическом поле помещают трубку между двумя электродами из станиоля (можно эти электроды просто приклеить к стеклу трубки). Проводники от этих электродов соединяют с кондукторами электрофорной машины. Включают высоковольтный выпрямитель и наблюдают светящуюся полосу на пластинке. Начинают вращать ручку электрофорной

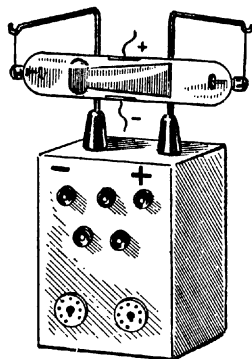


Рис. 145. Установка для демонстрации отклонения электронных пучков в электрическом и магнитном полях

машины: полоса на люминесцирующем экране искривляется, т. е. поток электронов отклоняется в электрическом поле.

Если теперь снять заряд с кондукторов электрофорной машины, соединив их разрядником, и поменять проводники от пластин местами, то изменится полярность пластин и направление напряженности электрического поля. Повторяют опыт вновь и убеждаются, что поток электронов отклоняется в другую сторону.

### О п ы т 92. Энергия движущихся электронов

О б о р у д о в а н и е: высоковольтный индуктор (или универсальный выпрямитель), трубка вакуумная с мельничкой, батарея аккумуляторов и соединительные провода.

К клеммам разрядника индуктора присоединяют вакуумную трубку с мельничкой (рис. 146). При включении индуктора видно

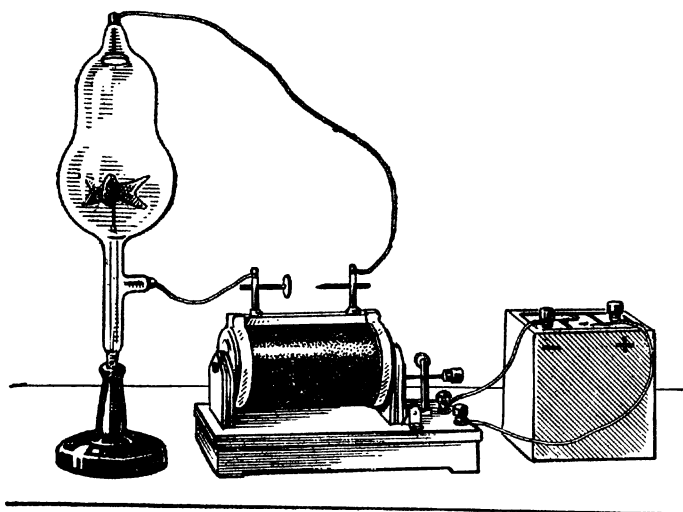


Рис. 146. Установка для демонстрации энергии электронных пучков

вращение мельнички. Демонстрация весьма эффектна, так как крылышки мельнички покрыты различными люминесцирующими веществами и под действием электронов эти люминофоры светятся разными цветами. Демонстрировать опыт лучше в затемненном классе. Если при включении индуктора мельничка не приходит во вращение, то нужно перевести ключ на индукторе в другое положение. Этим изменяют полярность и добиваются вращения мельнички.

Опыт показывает, что движущиеся электроны обладают кинетической энергией. Их следует представлять в виде потока частиц,



имеющих вполне определенную массу. Как величину, так и массу электрона сообщают учащимся, так как никаких количественных выводов и данных опытов сделать нельзя.

### Опыт 93. Люминесцентная лампа

**Оборудование:** люминесцентная лампа дневного света, дроссель, стартер, вертикальная стойка с двумя специальными патронами, ключ, соединительные провода.

Объясняют устройство и схему включения люминесцентной лампы.

Люминесцентная лампа, или лампа дневного света, представляет собой стеклянную трубку, на торцах которой имеются вольфрамовые нити накала (катоды), покрытые оксидами. Внутренняя поверхность трубки покрыта люминофорами. Внутри трубки имеются аргон и пары ртути при давлении порядка  $0,01 \text{ мм рт. ст.}$

Когда нити накала нагреваются, они испускают электроны. Если к трубке приложить напряжение, то возникнет разряд. Разряд в парах ртути и аргоне сопровождается ультрафиолетовым излучением. Эти лучи вызывают свечение люминофора, которое мы видим. Сами же ультрафиолетовые лучи поглощаются стеклом трубки. Спектр испускаемого люминофором света близок к спектру дневного света. Последнее учащимся будет подробно разъяснено при изучении оптики.

Нити накала лампы соединены между собой последовательно, но ток через них должен проходить очень непродолжительное время (максимально 2—3 сек); в противном случае нити сгорят. Для ав-

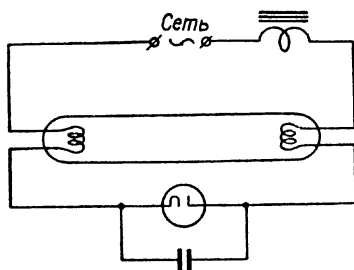


Рис. 147. Схема включения люминесцентной лампы со стартером (параллельно стартеру включен конденсатор емкостью около  $0,05 \text{ мкф}$ )

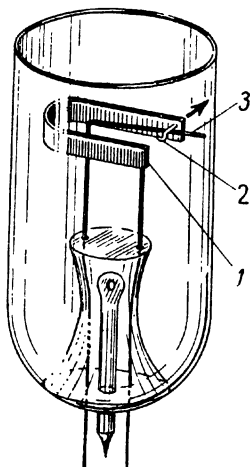


Рис. 148. Устройство стартера (при нагревании в тлеющем разряде биметаллическая пластинка 1 изгибается и крючком 2 касается электрода 3 — цепь замыкается; при остывании — цепь размыкается)

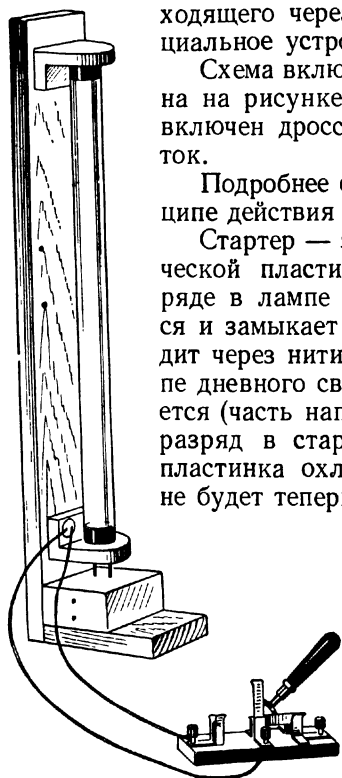


Рис. 149. Монтаж люминесцентной лампы на вертикальной панели (без стартера)

томатического замыкания и размыкания тока, проходящего через нити накала лампы, применяют специальное устройство, получившее название стартера.

Схема включения люминесцентной лампы приведена на рисунке 147. Последовательно в цепь лампы включают дроссель низкой частоты, ограничивающий ток.

Подробнее останавливаются на устройстве и принципе действия стартера.

Стартер — это небольшая лампа с биметаллической пластинкой 1 (рис. 148). При газовом разряде в лампе биметаллическая пластинка нагревается и замыкает контакты (2 и 3). При этом ток проходит через нити накала. Когда возникает разряд в лампе дневного света, напряжение на стартере уменьшается (часть напряжения падает на дросселе) и газовый разряд в стартере прекращается. Биметаллическая пластинка охлаждается и размыкает контакты. Ток не будет теперь проходить через нити накала. Разряд в лампе продолжается, но нити накала теперь играют роль электродов.

Целесообразно показать люминесцентную лампу вначале без стартера, заменив его ключом, а потом — со стартером.

Собирают установку. На вертикальной панели (рис. 149) устанавливают лампу, вместо стартера ставят ключ. Чтобы зажечь лампу, включают ее в сеть, замыкают и размыкают ключ, повторяя это до тех пор, пока лампа не загорится. Затем ключ размыкают.

Далее выключают лампу из сети, ставят вместо ключа стартер и вновь включают лампу.

Первоначально загорается стартер, потом лампа. Стартер и лампа могут включаться и выключаться несколько раз. Когда лампа станет гореть устойчиво, стартер гаснет.

Объясняют учащимся, что при этом происходит, и сообщают, что люминесцентные лампы являются более совершенными источниками света по сравнению с обыкновенными лампами накаливания. Благодаря этому, они и находят все более широкое применение.

## ГЛАВА VII

### ОСНОВНЫЕ СВОЙСТВА ПОЛУПРОВОДНИКОВ

#### § 1. СОПРОТИВЛЕНИЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВ

Бурное развитие полупроводниковой техники привело к тому, что в программу физики средней общеобразовательной школы включена тема «Проводимость полупроводников».

При изучении этой темы особенно велика роль эксперимента, ибо, только опираясь на опыт, учитель может познакомить учащихся с основными свойствами полупроводников.

Научный сотрудник сектора преподавания физики Института общего и политехнического образования АПН РСФСР В. А. Буров разработал комплект демонстрационного оборудования, с помощью которого можно поставить основные демонстрационные опыты по теме (рис. 150).

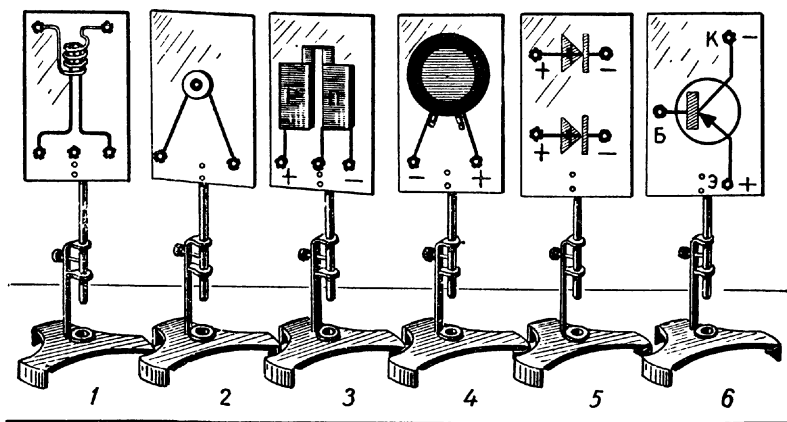


Рис. 150. Панели с термосопротивлением, диодом, триодом и фотосопротивлением

Если в школе нет такого комплекта приборов, его надо попытаться изготовить самостоятельно.

Для того чтобы схемы демонстрационных установок были понятны учащимся, они должны хорошо быть видны. Но полупроводниковые приборы имеют весьма малые размеры и не видны учащимся. Поэтому целесообразно полупроводниковые приборы укрепить на вертикальных панелях с условным обозначением того или иного прибора на схеме.

Характерной особенностью полупроводников является резкая зависимость их электропроводности от температуры, освещенности или облучения. Поэтому, изучая сопротивление полупроводников, необходимо прежде всего показать учащимся зависимость сопротивления полупроводников от температуры. Это даст возможность познакомить учащихся с термосопротивлениями и показать некоторые их применения. Из технических применений прежде всего следует рассмотреть устройство демонстрационного термометра на полупроводниках.

Затем надо показать зависимость сопротивления полупроводников от освещенности, что в свою очередь позволит рассказать учащимся об устройстве фотосопротивлений и их техническом применении, наиболее важным из которых является фотореле.

#### **О п ы т 94. Зависимость сопротивления полупроводников от температуры**

**О б о р у д о в а н и е:** два-три термосопротивления типа КМТ-4 (или ММТ-4) 1—2 ком, соединенные параллельно, демонстрационный гальванометр, батарея аккумуляторов НКН-10, спички, ключ.

Собирают последовательную цепь из термосопротивлений, гальванометра и батареи аккумуляторов. Замкнув цепь, наблюдают небольшое отклонение стрелки гальванометра. Подносят к термосопротивлениям спичку и замечают значительное отклонение стрелки.

Для успешного опыта важно, чтобы величина термосопротивления была небольшой. Поэтому лучше взять два или даже три термосопротивления и включить их параллельно. Если в кабинете нет термосопротивлений, их можно заменить диодом Д2Ж, который следует включить в запорном направлении. При нагревании диода его сопротивление в запорном направлении резко падает.

#### **О п ы т 95. Термосопротивления**

**О б о р у д о в а н и е:** комплект термосопротивлений, проекционный аппарат.

Рассказывают учащимся, что для изготовления термосопротивлений обычно берут смеси нескольких полупроводниковых веществ.

Наша отечественная промышленность изготавливает термисторы различных типов из медномарганцовых, кобальто-марганцовых смесей, из двуокиси титана и магния. На рисунке 151 приведен внешний вид некоторых термисторов, а в таблицах 4—5 приведены их основные параметры.

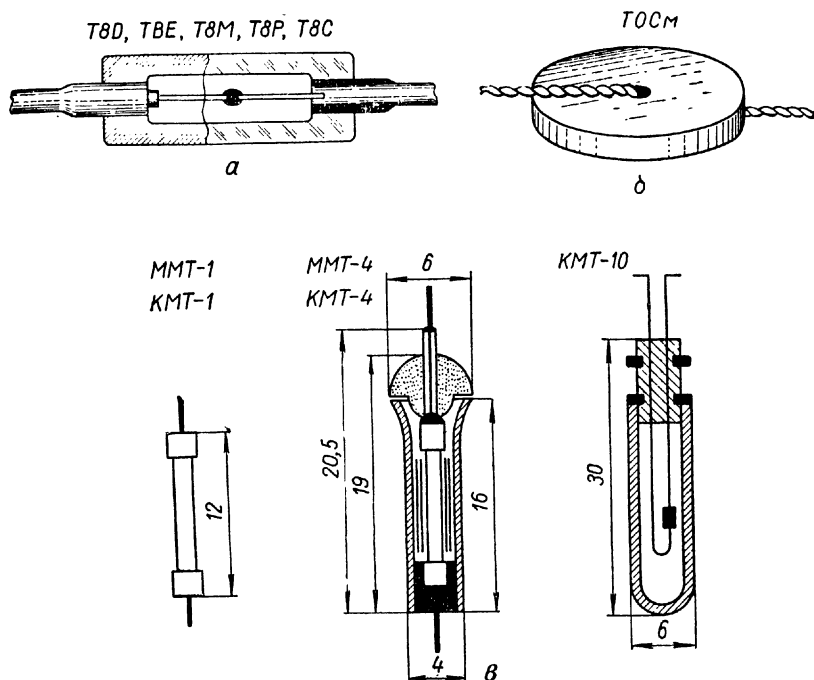


Рис. 151. Наиболее распространенные типы термосопротивлений

Таблица 4  
Термисторы для измерения и регулирования температуры

Типы термисторов	$t_{20}$ ком	$R_{20}$	Рабочая температура, °C	Максимальная мощность рассеяния <i>вт</i>
ММТ-1	1 — 200	—2,4 —3,4	—70 +120	0,4
ММТ-4	1 — 200	—2,4 —3,4	—70 +120	0,4
КМТ-1	20 — 1000	—4,5 —6,0	—20 +180	0,8
КМТ-4	20 — 1000	—4,5 —6,0	—20 +120	0,9
КМТ-10	100 — 3000	не менее		
КМТ-11	100 — 3000	—4,2	от 0 до 120	0,25

**Т а б л и ц а 5**

**Термисторы для измерения или индикации мощности**

Типы термисторов	$R_{\text{раб}}$ , ом	Мощность рассеивания мвт	Чувствительность ом/мвт
T8Д	150	10—15	20—30
T8Е	150	7—10	30—70
T8М	200	9—11	70—90
T8Р	125	7—12	10—20
T8С1	120	9—25	10—40
T8С2	150	8—20	12—25
T8С3	150	7—23	10—50
T9	125	7—19	10—40
T8С1М	120	10—24	10—40
T8С2М	150	8—19	10—25
T9С3М	150	7—23	10—50

Во время рассказа о термисторах с помощью проекционного аппарата демонстрируют их в теневой проекции на экран.

### О п ы т 96. Применение термосопротивлений

**Оборудование:** демонстрационный гальванометр, термометр на термосопротивлении, демонстрационный индикатор уровня.

Все многообразие применений термосопротивлений основано на двух основных режимах работы их в схемах.

Первый режим характеризуется малым током, проходящим через термистор. Величина тока в этом случае настолько мала, что устанавливается тепловое равновесие между выделяемым термистором теплом и отдаваемым им окружающей среде и при этом термистор не нагревается. В таком режиме работают термисторы во всех схемах для измерения температуры, индикации лучистой энергии, температурной компенсации и т. п.

Второй режим характеризуется тем, что термистор нагревается проходящим через него током, значение которого в этом случае может быть большим. В таком режиме термисторы работают в схемах для измерения вакуума, малых скоростей жидких и газообразных потоков, для тепловой защиты, температурной сигнализации и др.

Для ознакомления учащихся с техническими применениями термисторов достаточно хорошо рассказать о двух режимах работы термисторов и проиллюстрировать их двумя примерами.

В качестве таких примеров следует взять электрический термометр и индикатор среды.

Начертив на доске схему демонстрационного термометра (рис. 152), объясняют его конструкцию<sup>1</sup>. Затем измеряют с помощью термометра температуру тающего льда и температуру кипящей воды.

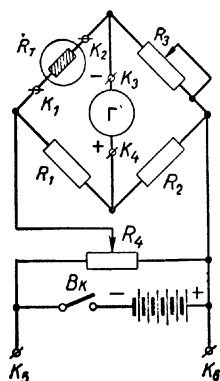


Рис. 152. Схема демонстрационного термометра на термисторах конструкции В. А. Бурова

Учащиеся убеждаются в правильности показаний термометра. Подробные указания об устройстве термометра даны в его заводском описании. На рисунке 153 показан внешний вид термометра.

Демонстрационный индикатор среды состоит из высокого цилиндрического сосуда с отверстием у дна. В сосуд помещается стойка из органического стекла или гетинакса, на которой друг над другом укреплены пять термосопротивлений типа ММТ-4 или КМТ-4 с небольшими величинами сопротивлений. Последовательно с термосопротивлениями включены сигнальные лампочки от карманного фонаря, выне-

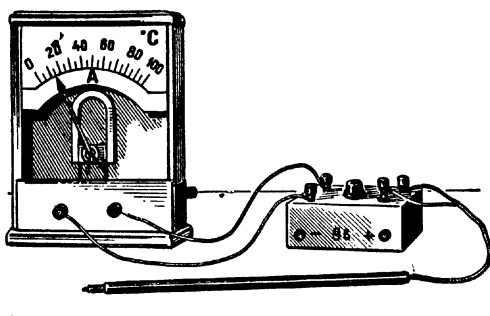


Рис. 153. Внешний вид демонстрационного термометра на термисторах

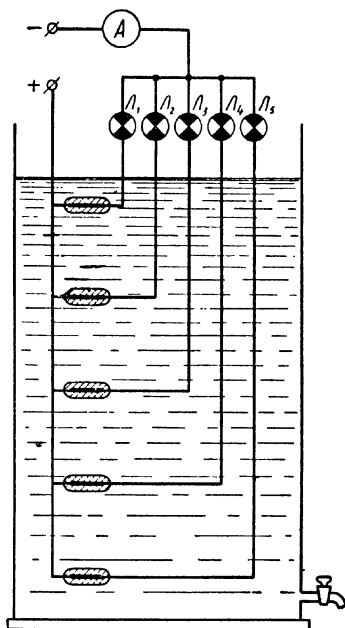


Рис. 154. Схема демонстрационного индикатора среды

<sup>1</sup> Конструкция термометра разработана научным сотрудником АПН В. А. Бузовым. Прибор выпускается заводом № 5 Главучтехпрома.

сенные на приборную доску. В общую цепь включается демонстрационный гальванометр с шунтом на 1 а. В сосуд наливается дистиллированная вода. Электрическая схема индикатора среды показана на рисунке 154.

Напряжение источника подбирают таким, чтобы при погруженных в жидкость термисторах через них проходил ток, недостаточный для их нагревания (и, конечно, недостаточный для свечения волоска сигнальной лампочки). По мере вытекания жидкости из сосуда термисторы поочередно перестают омываться жидкостью, температура их повышается, ток в цепи увеличивается и лампочка начинает светиться. Наблюдая за свечением лампочек на приборной доске, можно судить об уровне жидкости. Это же самое можно сделать и по показаниям гальванометра, шкалу которого в этом случае надо специально проградуировать.

Конструктивно индикатор уровня может быть выполнен весьма разнообразно.

### **О п ы т 97. Изменение сопротивления полупроводника при его освещении**

**О б о р у д о в а н и е:** фотосопротивление типа ФСК, укрепленное на панели, колпачок для фотосопротивления, гальванометр демонстрационный, батарея аккумуляторов, электрическая лампочка, ключ.

Фотосопротивление типа ФСК включается последовательно с демонстрационным гальванометром и батареей аккумуляторов. Закрыв фотосопротивление колпачком, замыкают ключ и наблюдают, что по цепи проходит очень малый ток (стрелка гальванометра находится почти на нуле). Делают вывод, что сопротивление включенного полупроводника очень большое.

Не размыкая цепи, снимают с фотосопротивления колпачок и наблюдают значительное увеличение тока в цепи (стрелка отклонится на несколько делений). Делают вывод, что сопротивление полупроводника зависит от его освещенности.

Включив электрическую лампочку, демонстрируют увеличение тока в цепи, что подтверждает сделанный до этого вывод.

### **О п ы т 98. Устройство фотосопротивлений**

**О б о р у д о в а н и е:** проекционный фонарь, комплект фотосопротивлений.

Рассказав учащимся о том, что зависимость сопротивления полупроводников от освещенности находит широкое и разнообразное применение в современной технике, демонстрируют в проекции на экран различные типы фотосопротивлений. В процессе показа рассказывают, что при изготовлении фотосопротивлений применяют наиболее светочувствительные полупроводники, например сернис-



тый свинец, сернистый висмут, сернистый кадмий, сернистый таллий, которые тонким слоем наносят на изолирующую пластинку. Края полупроводникового слоя соприкасаются с металлическими электродами, которыми фотосопротивление включается в цепь. Пластика с нанесенным на нее слоем полупроводника вставлена в пластмассовую оправу.

Для того чтобы полупроводниковый слой не подвергался вредным воздействиям внешней среды, его покрывают лаком, прозрачным для той части спектра, для которой данное фотосопротивление предназначено.

## О п ы т 99. Использование фотосопротивлений в технике

О б о р у д о в а н и е: фотосопротивление на панели, поляризованное реле типа РП-4 на панели, батарея аккумуляторов, маломощный однофазный двигатель, электрическая лампочка.

Фотосопротивление включают последовательно с обмоткой поляризованного реле *ПР* и батареей аккумуляторов (или батареей от карманного фонаря). Маломощный универсальный двигатель *Д* (мощностью 5—10 *вт*) включают в городскую сеть через нормально открытые контакты поляризованного реле РП-4 (рис. 155).

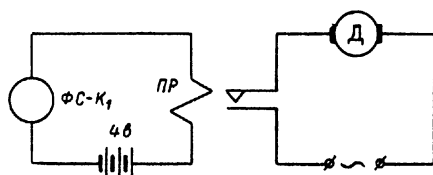


Рис. 155. Схема включения маломощного двигателя с помощью фотосопротивления

Несмотря на то, что на двигатель и на реле подано напряжение, двигатель не работает. Включив лампу осветителя, снимают с фотосопротивления колпачок и наблюдают вращение двигателя. Закрыв фотосопротивление, наблюдают, что двигатель останавливается.

В заключение можно показать отрывок из кинофильма «Фотоэлементы и их применение», в котором показывается использование фотореле в переплетном цехе.

## О п ы т 100. Электронное фотореле

О б о р у д о в а н и е: демонстрационное фотореле с фотосопротивлением, промежуточное реле типа РП-0, однофазный двигатель.

Рассказывают, что примененная в предыдущем опыте схема фотореле не пригодна для включения мощных двигателей, так как

поляризованное реле, использованное в схеме, очень чувствительно и поэтому имеет очень слабые контакты, рассчитанные на малый ток. При прохождении большого тока эти контакты подгорают и выходят из строя. Применение же поляризованного реле было вызвано тем, что ток, проходящий через фотосопротивление, очень мал, и другое реле от такого тока не срабатывает.

В практических схемах обычно усиливают ток, проходящий через фотосопротивление, для чего используют электронную лампу.

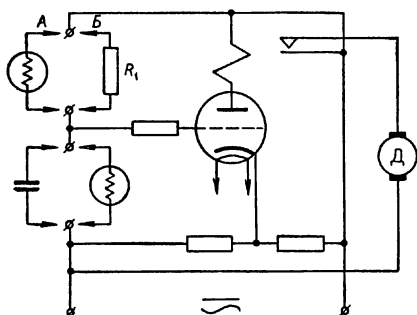


Рис. 156. Схема электронного реле на фотосопротивлении

Фотореле, в котором используется для усиления слабого фототока электронная лампа, называется электронным реле.

Затем собирают цепь (рис. 156), использованное в этой цепи электронное реле весьма просто устроено, надежно работает от сети постоянного тока и от сети переменного тока. Схема реле может быть очень просто объяснена учащимся. Кроме того, путем переключения фото-

сопротивления и замены конденсатора  $C$  сопротивлением  $R$ , можно использовать реле и для работы «на темноту».

Осветив фотоземлет, демонстрируют работу реле «на свет»; двигатель включается при освещении фотосопротивления.

Переключив фотосопротивление (на рис. вариант  $B$ ) и заменив сопротивление конденсатором, демонстрируют работу реле «на темноту»: с наступлением темноты реле срабатывает и включает двигатель.

## § 2. МЕХАНИЗМ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ ПОЛУПРОВОДНИКОВ

Механизм электропроводности полупроводников нельзя достаточно полно объяснить без квантово-механических представлений зонной теории твердого тела. Однако при современном уровне развития методики преподавания физики зонная теория не может быть предметом изучения в средней школе. Между тем в интересах политехнической подготовки учащихся следует объяснить устройство и работу ряда полупроводниковых приборов. Для этого необходимо ввести понятие об электронной и дырочной проводимости (сначала собственной, затем примесной).

Трудности, стоящие перед учителем, усугубляются еще и тем, что понятие об электронной и дырочной проводимости нельзя подкрепить никаким опытом (как известно, вопрос о природе носителей

тока вытекает из наличия как отрицательного, так и положительного эффекта Холла, а последний, по-видимому, не может быть изложен в средней школе). Поэтому (по необходимости) объяснение учителя будет носить догматический характер и правильность основных положений им высказанных может быть подтверждена значительно позже.

Задача учителя в конечном итоге заключается в том, чтобы создать у учащихся образные представления об электропроводности полупроводников, необходимые для объяснения явлений в контактах.

Изложение материала проще начать с объяснения собственной электропроводности полупроводников. Вначале следует рассказать об электронной проводимости полупроводников. Это даст возможность воспользоваться знаниями учащихся об электронной проводимости металлов.

В качестве примера следует рассмотреть вопрос об образовании электронов проводимости в кристалле чистого кремния. Вначале рассматривают изолированный атом кремния (рис. 157), имеющий четыре валентных электрона. Затем рассказывают, что при объединении атомов в твердое тело между ними устанавливается ковалентная связь. Понятие о ковалентной связи известно учащимся из курса химии и здесь им надо воспользоваться. Помогает объяснению упрощенная схема электронных связей (рис. 158).

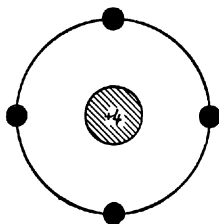


Рис. 157. Схема атома кремния

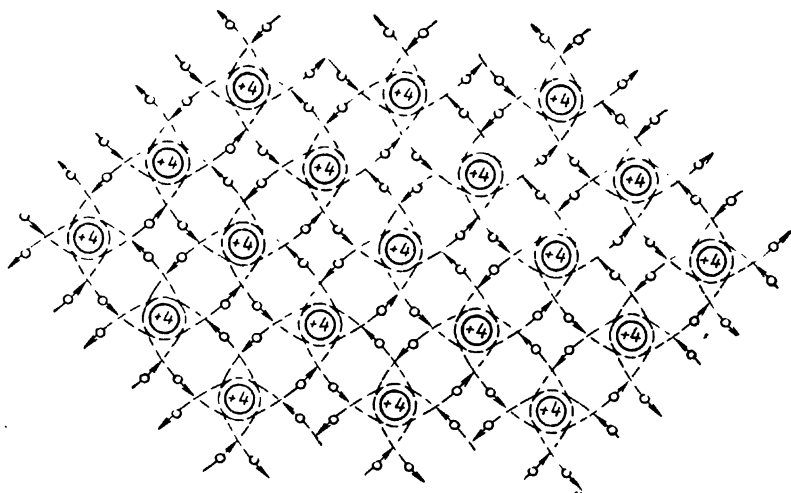


Рис. 158. Схема образования ковалентных связей в кристалле кремния

Не вдаваясь в детали, рассказывают, что при повышении температуры кристалла тепловые колебания решетки приводят к разрыву некоторых связей между атомами. В результате этого часть электронов, ранее участвовавшая в образовании ковалентных связей, отщепляется и становится электронами проводимости. При наличии электрического поля они «дрейфуют» по полупроводнику, образуя электрический ток. Из этого делают вывод, что с повышением температуры проводимость полупроводника должна увеличиться. Вспоминают ранее проделанные опыты и устанавливают, что данное объяснение совпадает с опытом.

Поскольку тема «Проводимость полупроводников» идет после темы «Электрический ток в электролитах», то следует подчеркнуть, что от электролитов электронные полупроводники отличаются иной природой носителей тока, от металлов они отличаются меньшей величиной электропроводности и иной ее зависимостью от температуры: электропроводность металлических проводников с понижением температуры возрастает, а электронных полупроводников — уменьшается.

Электропроводность металлов при приближении их температуры к абсолютному нулю достигает весьма больших значений, а некоторые металлы переходят в сверхпроводящее состояние. Полупроводники при температуре около абсолютного нуля становятся изоляторами.

Большая проводимость металлов при температуре, близкой к абсолютному нулю, указывает на то, что тепловое движение не является причиной, создающей их проводимость. Появление же электронов проводимости у полупроводников непосредственно связано с тепловым движением.

Подчеркивая отличие электронных полупроводников от металлов и электролитов, следует иметь в виду, что «сопоставление электронных полупроводников с электролитами и металлами, — по выражению А. Ф. Иоффе, — содействует пониманию механизма изучаемых явлений»<sup>1</sup>.

После того как достаточно хорошо будет изучен механизм электронной проводимости чистых полупроводников переходят изучению «дырочной» проводимости.

Обращают внимание учащихся, что обрыв связей между атомами приводит не только к появлению электронов проводимости, но и к образованию «вакантного» места — «дырки». Рассказывают, что появление «дырок» в кристалле полупроводника создает дополнительные возможности для переноса зарядов. Действительно, при наличии «дырки» какой-либо электрон связи может перейти на место «дырки», образуя «дырку» на новом месте (рис. 159) и т. д.

---

<sup>1</sup> А. Ф. Иоффе, Полупроводники в современной физике, изд. АН СССР, 1954, стр. 8.

Таким образом, ток в полупроводнике образуется не только электронами проводимости, но и «дырками».

Затем необходимо сообщить учащимся, что рассмотренная картина справедлива только для совершенно чистых полупроводников. Наличие примесей сильно изменяет электропроводность их. После этого рассматривают примесную проводимость кремния с присадкой мышьяка и индия. В первом случае образуется электронная проводимость, а во втором — дырочная.

Ознакомление учащихся с собственной и примесной электропроводностью полупроводников даст возможность позже объяснить явления в контактах и их техническое применение (выпрямители и усилители).

В процессе объяснения механизма электропроводности в средней школе невозможно поставить какой-либо эксперимент, подтверждающий слова учителя, а это в сочетании со сложностью излагаемого материала делает задачу учителя исключительно сложной.

Большую помощь учителю может оказать демонстрация учебного кинофильма «Полупроводники и их техническое применение». Ниже дано краткое содержание двух фрагментов этого кинофильма.

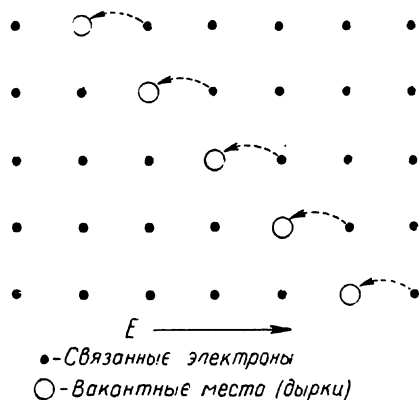


Рис. 159. Схема образования «дырок»

#### Опыт 101. Демонстрация кинофрагмента «Собственная проводимость полупроводников»

С помощью мультипликации на примере кремния дается понятие о строении полупроводниковых кристаллов, об электронах связи и механизме образования электронов проводимости. Показано движение свободных электронов под действием электрического поля (электронный ток).

Затем фиксируется внимание на разрушенную связь и показывается образование «дырки». «Дырка» хаотически движется внутри кристалла. Создается электрическое поле и «дырка» начинает «дрейфовать» под действием поля («дырочный» ток).

Накладываются оба тока и дается общая картина механизма тока в полупроводнике.

Повышается температура кристалла. Растет число электронов проводимости и «дырок». Увеличивается ток в полупроводнике.

## О п ы т 102. Демонстрация кинофрагмента «Примесная проводимость полупроводников»

С помощью мультипликации показывается «присадка» атомов мышьяка к кристаллу кремния и «образование» электронов проводимости. Затем показывается «дрейф» электронов проводимости под действием электрического поля (электронный ток).

На мультисхеме демонстрируется образование «дырок» при «присадке» к кристаллу кремния атомов индия. Следующие кадры рассказывают о движении «дырок» под действием электрического поля («дырочный» ток).

### § 3. ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ВЫПРЯМИТЕЛИ

Знания учащихся о примесной проводимости полупроводников пополняются и закрепляются при изучении принципа устройства и работы полупроводниковых выпрямителей.

Учащиеся уже знают, что по характеру своей проводимости полупроводники могут быть электронными ( $n$  — типа) и дырочными ( $p$  — типа). В полупроводниках с электронной проводимостью основными носителями заряда являются электроны, а в полупроводниках с дырочной проводимостью — «дырки». В случае контакта полупроводников с электронной и «дырочной» проводимостью электроны и «дырки» диффундируют из одного полупроводника в другой.

Важно рассказать учащимся, что при механическом контакте двух полупроводников между точками соприкосновения будет слой воздуха, в результате чего полупроводники покроются окислами и контакт будет обладать таким строением, через которое практически невозможна диффузия электронов и дырок. Поэтому для получения  $p - n$  контакта обычно в пластинку чистого полупроводника вводят две примеси — одну электронную, а другую дырочную. В результате этого на одном конце кристалл имеет электронную, а на другом «дырочную» проводимость.

Изучение полупроводниковых выпрямителей лучше всего провести по следующему плану:

1. Образование механизма запирающего слоя;
2. Устройство полупроводниковых вентиляй;
3. Однополупериодный выпрямитель;
4. Двухполупериодный выпрямитель;
5. Мостовая схема выпрямителя;
6. Сглаживающий фильтр.

Объем перечисленного материала несколько выходит за пределы программы. Но со схемами выпрямления переменного тока учащиеся знакомы, а важность материала для политехнической подготовки учащихся столь очевидна, что полупроводниковым выпрямителям следует посвятить одно из занятий кружка.

### О п ы т 103. Демонстрация кинофрагмента «Механизм образования запиорного слоя»

Механизм образования запиорного слоя на границе полупроводников с «дырочной» и электронной проводимостью лучше всего объяснить с помощью кинофильма «Полупроводники и их применение». В четвертом фрагменте этого кинофильма показано образование в электронном полупроводнике области с «дырочной» проводимостью путем «присадки» к нему индия. Затем очень выразительно показана диффузия электронов и «дырок» и образование электронно-дырочного перехода.

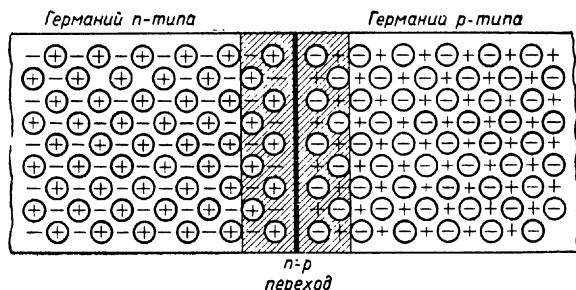


Рис. 160. Схема образования запиорного слоя

К кристаллу полупроводника прикладывают электрическое поле в проходном направлении. Видно движение электронов и «дырок». Мультипликационный кадр переходит в натурный. Меняется полярность источника и ток не проходит. Натурный кадр переходит в мультипликационный. Объясняется, почему в этом случае ток не проходит.

### О п ы т 104. Устройство полупроводниковых вентилей

**О б о р у д о в а н и е:** проекционный аппарат, диапозитив с изображением полупроводникового диода в сечении, комплект диодов, диапозитив с изображением селеновой шайбы в разрезе, реостат, набор селеновых шайб, селеновый столбик, батарея аккумуляторов, демонстрационный гальванометр.

После того как изучен механизм образования запиорного слоя и разъяснены понятия «пропускного» и «непропускного» направлений, необходимо познакомить учащихся с конструкцией наиболее распространенных полупроводниковых вентилей. Порядок рассмотрения лучше всего выбрать следующим: плоскостной диод, точечный диод и, наконец, селеновая шайба. Следует иметь в виду,

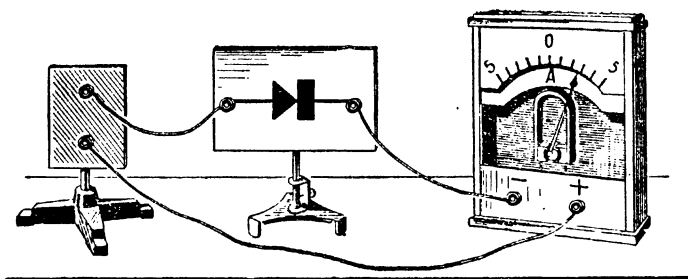


Рис. 161. Установка для демонстрации односторонней проводимости полупроводникового диода

что устройство селеновой шайбы обычно трудно воспринимается учащимися.

Рассматривая устройство того или иного вентиля, необходимо вначале с помощью проекционного аппарата показать диапозитив со схемой его устройства (в разрезе), затем внешний вид и, наконец, одностороннюю проводимость вентиля.

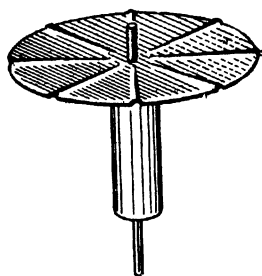


Рис. 162. Полупроводниковый диод с радиатором

Для демонстрации односторонней проводимости вентиля собирают электрическую цепь из вентиля, гальванометра, реостата и источника тока (рис. 161). Включая ток в проходном и запиорном направлении, демонстрируют одностороннюю проводимость вентиля.

Для того чтобы знания учащихся о полупроводниковых вентилях были более предметными, необходимо в кабинете иметь комплект полупроводниковых диодов, селеновых шайб и столбиков, которые в конце демонстрации раздают на столы учащихся.

Следует обратить внимание учащихся на наличие у мощных вентилях теплоотводящих радиаторов (рис. 162).

Следует обратить внимание учащихся на наличие у мощных вентилях теплоотводящих радиаторов (рис. 162).

### Опыт 105. Однополупериодный выпрямитель

**Оборудование:** полупроводниковый диод типа ДГ-Ц на панели, нагрузочное сопротивление, источник переменного тока, электронный осциллограф, ключ.

Собирают установку, изображенную на рисунке 163. Подключив вход осциллографа к клеммам демонстрируют, что напряжение в городской сети изменяется синусоидально. Подключив осциллограф к реостату, демонстрируют, что напряжение на нагрузочном



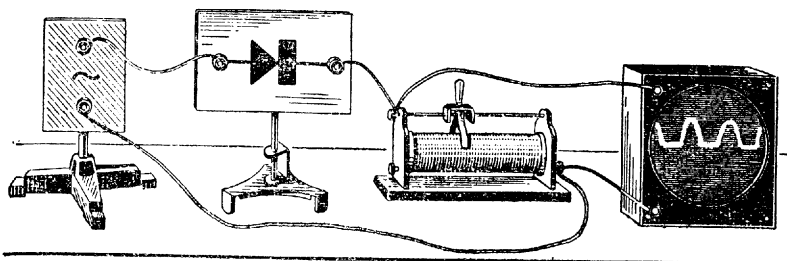


Рис. 163. Схема установки для изучения работы однополупериодного выпрямителя

сопротивлении пульсирующее. Следовательно, по цепи проходит пульсирующий ток.

Для объяснения работы выпрямителя очень хорошо использовать кинокольцовку «Однополупериодный выпрямитель», в которой с помощью мультипликации показано направление тока в цепи в течение одного периода переменного тока.

Следует заметить, что нагрузочное сопротивление в данной цепи обязательно и его величина должна быть порядка нескольких килоом.

### Опыт 106. Двухполупериодный выпрямитель

**Оборудование:** два полупроводниковых вентиля на панели, универсальный трансформатор, нагрузочное сопротивление, электронный осциллограф, источник переменного тока, ключ.

Для демонстрации двухполупериодного выпрямителя переменного тока собирают установку, схема которой изображена на рисунке 164.

Подключив электронный осциллограф на вход выпрямителя, демонстрируют, что в городской сети проходит переменный ток.

Затем подключают электронный осциллограф параллельно нагрузочному сопротивлению  $R$  и убеждаются, что по цепи проходит пульсирующий ток.

Обращают внимание учащихся на то, что частота пульсаций в этом случае в два раза больше, чем при однополупериодном выпрямлении.

Для объяснения работы выпрямителя очень хорошо использовать кинокольцовку «Двухполупериодный выпрямитель», в которой с помощью мультисхем показано направление тока в цепи за

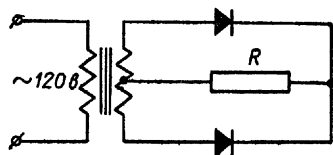


Рис. 164. Схема установки для изучения работы двухполупериодного выпрямителя

время, равное одному периоду переменного тока. В качестве указателя направления тока в кинокольцовке используется мультипликционный амперметр.

### О п ы т 107. Мостовая схема выпрямителя

О б о р у д о в а н и е: четыре полупроводниковых вентиля на панели, источник переменного тока, электронный осциллограф, нагрузочное сопротивление.

Мостовая схема выпрямителей переменного тока наиболее распространена в современной радио- и электротехнике, поэтому оз-

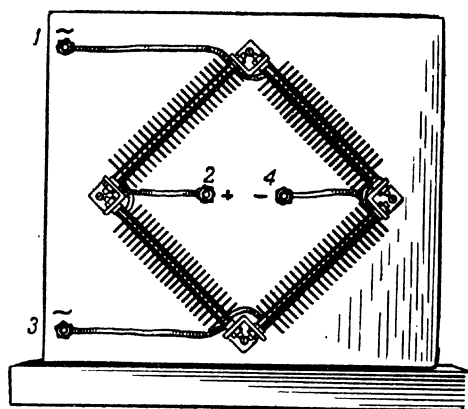


Рис. 165. Выпрямитель, собранный по мостовой схеме

накомление с ней учащихся необходимо. Для демонстрации двухполупериодного выпрямления с помощью мостовой схемы на вертикальной панели укрепляют четыре полупроводниковых вентиля (рис. 165). К точкам 1 и 3 подключают источник переменного тока, а к точкам 2—4 — нагрузочное сопротивление.

Подключив электронный осциллограф к точкам 1—3, демонстрируют, что на вход выпрямителя подается переменный ток.

Затем подключают электронный осциллограф к точкам 2—4 и убеждаются, что на нагрузочном сопротивлении имеется пульсирующее напряжение. Следовательно, через нагрузочное сопротивление проходит пульсирующий ток.

Для объяснения работы выпрямителя лучше всего показать кинокольцовку «Мостовая схема выпрямителя», в которой, как и в предыдущих двух схемах, с помощью мультипликации показано направление тока в течение одного периода.

## Опыт 108. Сглаживающий фильтр

**Оборудование:** двухполупериодный выпрямитель, электронный осциллограф, нагрузочное сопротивление, демонстрационный фильтр, конденсатор большой емкости.

Собирают установку, как и в предыдущем опыте, и демонстрируют, что после выпрямления через нагрузочное сопротивление проходит пульсирующий ток. Рассказывают учащимся, что пульсирующий ток не пригоден для питания потребителей, рассчитанных на работу от постоянного тока. Так радиоприемники, питаемые пульсирующим током, будут «фонить»: в громкоговорителе будет слышен сильный рокот или, как говорят радисты, — «фон переменного тока».

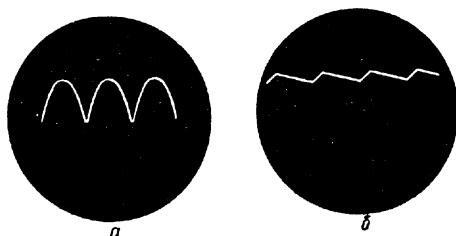


Рис. 166. Осциллограммы выпрямленного тока:

*a* — без сглаживающего фильтра; *б* — с сглаживающим фильтром

Для того чтобы пульсирующий ток превратить в ток постоянный, на выходе выпрямителя подключают сглаживающий фильтр, который в простейшем случае состоит из конденсатора большой емкости и нагрузочного сопротивления.

Собирают цепь, в которой параллельно сопротивлению нагрузки подключают конденсатор 10—20 мкф. Наблюдают на экране осциллографа «сглаживание» пульсаций (рис. 166).

Работу такого простого сглаживающего фильтра объясняют тем, что конденсатор большой емкости, подключенный к источнику, быстро заряжается и медленно разряжается через нагрузочное сопротивление. На доске рисуют график работы фильтра (рис. 167).

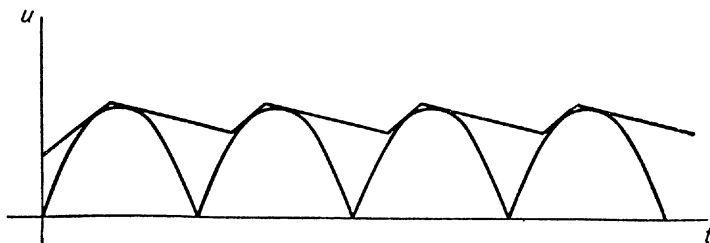


Рис. 167. График, поясняющий работу фильтра

Обращают внимание учащихся на то, что простейший фильтр, состоящий из конденсатора, недостаточно хорошо сглаживает пульсации выпрямленного тока. Рассказывают, что для лучшего сглаживания пульсаций применяют фильтры, состоящие из конденсаторов большой емкости и катушек индуктивности. Демонстрируют учащимся  $LC$  — фильтр, собранный на вертикальной панели.

Подключив фильтр к выпрямителю с помощью электронного осциллографа, наблюдают, что пульсаций тока нет (осциллограф при данном усилении сигнала их не воспринимает).

Роль дросселя и второго конденсатора можно будет объяснить лишь после изучения явления электромагнитной индукции. На данном этапе обучения следует ограничиться демонстрацией опыта.

#### § 4. ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ УСИЛИТЕЛИ

Область применения полупроводниковых триодов-транзисторов расширяется с невиданными темпами, но, к сожалению, в программу средней школы они не включены. Однако учитель может познакомить с ними своих учащихся на занятиях кружка. Материал этого параграфа ставит своей целью помочь учителю в этой области.

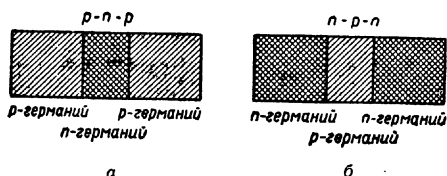


Рис. 168. Схема триода типа:

а —  $p-n-p$ ; б —  $p-p-n$

Для изготовления плоскостных триодов (точечные триоды рассматривать не следует) применяют монокристаллы кремния или германия, вводя в которые соответствующие примеси (индий, сурьма или мышьяк), создают прослойку электронного полупроводника между двумя областями дырочного (рис. 168, а) или прослойку дырочного полупроводника между двумя областями электронного (рис. 168, б). В зависимости от этого различают триоды на основе  $n$ -полупроводника (тип  $p-n-p$ ) и триоды на основе  $p$ -полупроводника (тип  $n-p-n$ ).

Выбор кремния и германия для изготовления полупроводниковых триодов вызван следующим: подвижность носителей тока в этих кристаллах больше, чем в других полупроводниках; эти кристаллы обладают большей механической прочностью; германий и кремний обладают большой химической устойчивостью; рекомбинация электронов и «дырок» в этих полупроводниках происходит сравнительно медленно, поэтому разноименно заряженные носители тока прохо-

дят сквозь тонкие слои этих кристаллов, практически не рекомбинируя друг с другом.

Далее следует рассказать, что в триоде кристалл внизу припаян к плоскому металлическому электроду, получившему название основания.

Учащимся известно, что при соединении двух полупроводников с разной проводимостью вследствие диффузии «дырок» и электронов

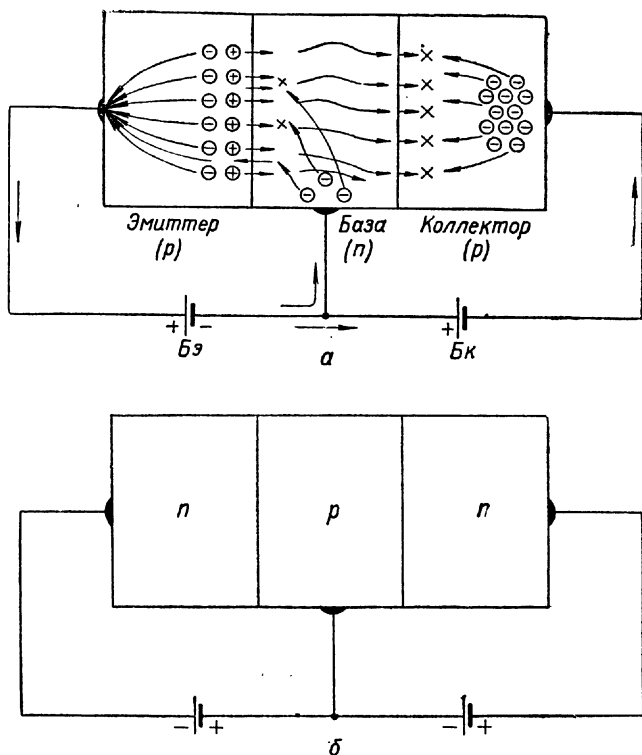


Рис. 169. Схема включения триода типа:

$a - n - p - n$ ;  $б - p - n - p$

и их рекомбинации на границе раздела образуется область, обедненная основными носителями тока, то есть запиорный слой.

Наличие трех полупроводников в плоскостном триоде приводит к появлению двух запиорных слоев, образующихся по обе стороны среднего полупроводника.

Таким образом, плоскостной триод представляет собой два диода, соединенные последовательно, навстречу друг другу.

Следует начертить схему включения триода (рис. 169,  $a$ ). Для того чтобы полупроводниковый триод начал усиливать, его надо сое-

динить с двумя внешними источниками тока (рис. 169, б). В данном случае между левым и средним полупроводниками полярность источника тока такова, что левый диод включен в пропускном направлении. Наоборот, правый диод включен в непропускном направлении. Такое соединение источников тока является обязательным.

Переход, включаемый в пропускном направлении, называется эмиттерным, а переход, включаемый в запиорном направлении, коллекторным. Поэтому электроды, присоединенные к этим переходам, называют соответственно эмиттером и коллектором. Электрод, соединенный со средним проводником, называется основанием.

Для понимания принципа работы полупроводникового триода существенно подчеркнуть, что при изготовлении полупроводникового триода эмиттерный конец триода насыщают «дырками» значительно больше, чем область базы электронами. Это приводит к тому, что при прочих равных условиях область эмиттера имеет больше «дырок», чем область базы — электронов. Поэтому при включении источника ток, проходящий через эмиттерный  $p-n$  переход, в основном состоит из «дырок», поступающих из области эмиттера в область основания, и лишь в незначительной степени состоит из электронов, переходящих из области базы в область эмиттера. Короче говоря, при включении источника тока между базой и эмиттером будет протекать «дырочный» ток. Эмиттер как бы «впрыскивает дырки» в область базы. При этом во внешнюю цепь под действием электрического поля источника уходит равное количество электронов и концентрация «дырок» в эмиттере не изменяется.

Из сказанного можно сделать вывод, что эмиттер играет роль, подобную роли катода в электронной лампе: является источником носителей тока.

Между базой и коллектором также включен источник, который к тому же соединен и с источником, подключенным к эмиттерному переходу. Поэтому между эмиттером и коллектором существует электрическое поле. Следовательно, «впрыснутые» в область базы «дырки» движутся под действием результирующего поля, получающегося от наложения полей между эмиттером и базой, между эмиттером и коллектором и между базой и коллектором.

Благодаря тому, что область основания очень тонка (несколько микрон), «впрыснутые» в нее «дырки» почти не рекомбинируют с электронами базы и проходят на коллектор, где и рекомбинируют.

При изменении тока эмиттера будет изменяться и ток коллектора. Это изменение вызывается тем, что меняется число «впрыскиваемых» в область основания «дырок».

Из всего сказанного выше вытекает, что ток коллектора немного меньше тока эмиттера, так как часть «дырок», «впрыскиваемых» в область основания, рекомбинирует.

Самый важный и вместе с тем самый трудный для объяснения вопрос. За счет чего достигается усиление в полупроводниковом триоде?

Наиболее простое и доступное для учащихся объяснение заключается в следующем. Ток эмиттера вызывается очень небольшим напряжением и, как было указано выше, влияет на величину тока коллектора. Но ток в цепи коллектора вызывается значительно боль-

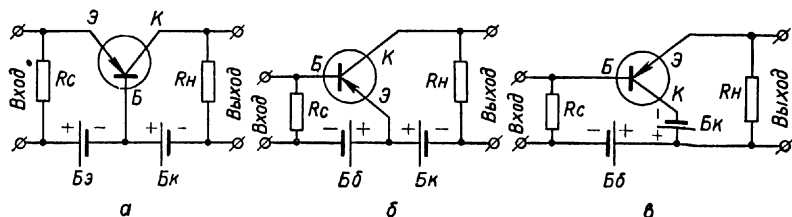


Рис. 170. Схема включения триодов:

*a* — с общей базой; *б* — с общим эмиттером; *в* — с общим коллектором;  $B_э$  — батарея эмиттера;  $B_к$  — батарея коллектора;  $B_б$  — батарея базы;  $R_c$  — сопротивление смещения;  $R_n$  — сопротивление нагрузки

шим напряжением (сопротивление коллекторной цепи в десятки тысяч раз больше эмиттерной). Благодаря этому при почти одинаковом токе в коллекторной цепи создается большее колебание напряжения (а следовательно, и мощности), чем в эмиттерной цепи.

Существует три возможных способа включения полупроводниковых триодов для получения эффекта усиления с общей базой (рис. 170, *a*), с общим эмиттером (рис. 170, *б*), с общим коллектором

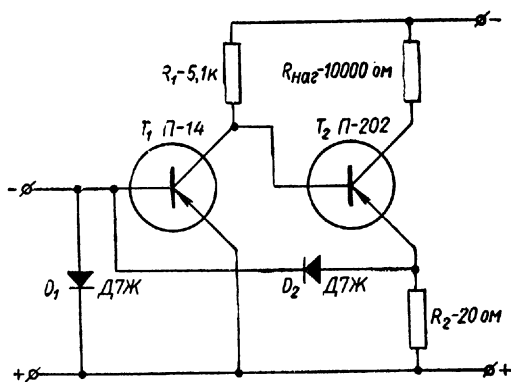


Рис. 171. Демонстрационный полупроводниковый усилитель

(рис. 170, *в*). Наиболее простой для объяснения является схема с общим основанием (базой), которую и следует разобрать на первом уроке. Остальные схемы включения триода можно рассказать учащимся в ознакомительном плане.

Устройство полупроводникового триода и принцип его работы лучше всего объяснить с помощью кино. Однако ограничиваться демонстрацией кинофрагмента нельзя. Надо показать учащимся несколько полупроводниковых триодов, а затем показать эффект усиления. В заключение следует показать работу полупроводниковых усилителей (одно- и двухкаскадного).

Устройство и работу двухкаскадного усилителя удобно объяснить на примере промежуточного усилителя типа УПП-1, выпускаемого промышленностью. Схема демонстрационного варианта такого усилителя показана на рисунке 171. Промежуточный усилитель УПП-1 очень прост, имеет минимальное число деталей и устойчиво работает при колебаниях напряжения.

#### **О п ы т 109. Демонстрация кинофрагмента «Полупроводниковый триод»<sup>1</sup>**

Перед демонстрацией кинофрагмента следует объяснить принцип устройства полупроводникового триода. Затем надо показать кинофрагмент и после этого рассказать (опираясь на увиденное в кинофрагменте) принцип работы триода. Содержание фрагмента следующее.

С помощью мультипликации объясняется устройство полупроводникового триода. Рассматриваются эмиттерная и коллекторная цепи. Показано, что инжектируемые в область базы «дырки» почти все движутся к коллектору. Приведено несколько случаев комбинации «дырок» с электронами. С помощью демонстрационного опыта иллюстрируется, что ток эмиттера несколько больше тока коллектора.

Изменяется ток в цепи эмиттера. Видно, что меняется и ток коллектора. Параллельно входу и выходу собранного усилителя с общей базой подключаются вольтметры. Демонстрируется, что происходит при незначительном изменении напряжения в эмиттерной цепи.

#### **О п ы т 110. Принцип работы транзистора**

**О б о р у д о в а н и е:** транзистор П-14 (или другой плоскостной триод) на вертикальной панели, батарея аккумуляторов 9-НКН-10, два одинаковых демонстрационных гальванометра, высокоомный реостат, радиотехническое сопротивление, два демонстрационных вольтметра.

Собирают цепь, показанную на рисунке 172. Если в кабинете нет двух одинаковых гальванометров, можно включать один поочередно, то в одну, то в другую цепь. (То же самое относится и к вольтметру.)

---

<sup>1</sup> Фильм снят по заказу Министерства высшего и среднего специального образования СССР.



Замкнув (лучше одновременно) цепи эмиттера и коллектора, наблюдают, что ток в цепи коллектора несколько меньше тока в цепи эмиттера.

Меняя сопротивление смещения, наблюдают, что одновременно с изменением тока эмиттера меняется и ток коллектора.

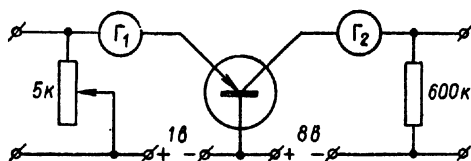


Рис. 172. Принцип работы транзистора

Подав на вход триода переменное напряжение (например, от демонстрационного генератора переменного тока) и подключив вольтметры, устанавливают, что напряжение на выходе значительно больше напряжения, подаваемого на вход. Сопротивления смещения и сопротивления нагрузки зависят от типа триода и напряжения источников и их надо подобрать опытным путем. Данные сопротивлений и напряжения, указанные на схеме, ориентировочные.

### О п ы т 111. Простейший полупроводниковый усилитель

**О б о р у д о в а н и е:** полупроводниковый триод П-14 на панели, батарея аккумуляторов 9-НКН-10, два трансформатора, громкоговоритель, звуковой генератор, ключ.

Для закрепления и развития знаний учащихся о полупроводниковом триоде необходимо собрать простейший усилитель и показать его работу. Наиболее просто можно объяснить работу усилителя с общей базой.

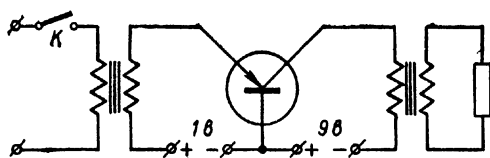


Рис. 173. Схема усилителя на полупроводниковом триоде

Подключив динамик к звуковому генератору, слышат громкий сигнал. Постепенно вращая ручку регулятора напряжения, уменьшают громкость звучания почти до нуля. Делают вывод, что в этом случае звуковой генератор дает очень слабый сигнал.

Собирают цепь, схема которой изображена на рисунке 173. Замкнув ключ  $K$ , слышат громкое звучание динамика. Делают вывод,

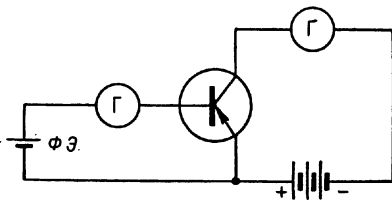
что полупроводниковый триод усиливает слабый сигнал, создаваемый звуковым генератором.

В качестве входного и выходного трансформаторов можно использовать универсальные трансформаторы с обмотками на 220 и 6 в.

### Опыт 112. Усилитель с общим эмиттером

**Оборудование:** полупроводниковый триод П-14 на панели, батарея аккумуляторов 3-НКН-10, два одинаковых гальванометра, два реостата, фотоэлемент типа ФЭСС, лампа-осветитель.

Включив полупроводниковый триод по схеме с общим эмиттером, можно добиться усиления по току. В этом случае входной сигнал подается между эмиттером и базой, а выходной сигнал снимается между эмиттером и коллектором.



Собрав цепь по схеме, показанной на рисунке 170, демонстрируют, что при изменении освещенности фотоэлемента незначительно меняется ток базы и очень сильно меняется ток в цепи коллектор—эмиттер. Величины сопротивлений  $R_C$  и  $R_H$  зависят от данных используемого фотоэлемента. При удачном выборе фотоэлемента их можно совсем убрать (рис. 174).

Рис. 174. Усилитель с общим эмиттером

Убрав из цепи гальванометры, включают между коллектором и эмиттером поляризованное реле РП-4 и демонстрируют работу фотореле с предварительным усилением входного сигнала полупроводниковым триодом.

### Опыт 113. Усилитель к детекторному приемнику

**Оборудование:** полупроводниковый усилитель на панели, детекторный приемник на панели, громкоговоритель, батарея аккумуляторов.

Во всех рассмотренных схемах усилителей для питания использовалось два источника.

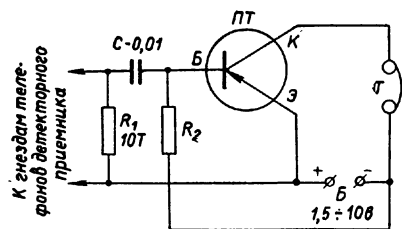


Рис. 175. Усилитель к детекторному приемнику

Начертив на доске схему с общим эмиттером, обращают внимание учащихся на то, что батарею базы и батарею коллектора можно объединить в одну и включить между эмиттером и коллектором. Для подачи напряжения на базу ее через сопротивление  $R_2$  соединяют с минусом источника тока (рис. 175). Величину сопротивления  $R_2$  подбирают

опытным путем и обычно оно колеблется от нескольких килоом до одного-двух мегомов.

Конденсатор  $C$  отделяет радиоприемник от источника питания усилителя. Сопротивление входа колеблется в пределах 1—3 ком и его также надо подобрать опытным путем.

Объяснив схему усилителя, подключают на его вход демонстрационный детекторный приемник, а на выход телефон. Настроив приемник, отчетливо слышат передачу местной станции.

Отключив усилитель, подключают на выход приемника телефон, но передачу не слышно. Делают вывод, что полупроводниковый усилитель усиливал сигналы, даваемые детекторным приемником.

### О п ы т 114. Двухкаскадный усилитель

Об о р у д о в а н и е: двухкаскадный усилитель на полупроводниковых триодах, селеновый выпрямитель, фотоэлемент, электромагнитное реле типа РП.

Демонстрационное двухкаскадное реле на полупроводниковых триодах собрано на вертикальной панели по схеме усилителя УПП-2 (см. рис. 171), выпускаемого промышленностью, ограничивающие диоды  $D_1$  и  $D_2$  укреплены на обратной стороне панели.

Начертив на доске схему усилителя, необходимо рассказать учащимся, что двухкаскадный усилитель собран на двух полупроводниковых триодах, включенных по схеме «с общим эмиттером». Работа двухкаскадного выпрямителя принципиально не отличается от работы однокаскадного усилителя. Однако первый каскад должен дать по возможности большее усиление, а второй — наибольшую выходную мощность. Поэтому первый каскад собран на мало-мощном триоде П-14, а второй на более мощном триоде П-202; связь между каскадами непосредственная. Для питания усилителя необходимо постоянное напряжение 36 в.

Наибольшее усиление первого каскада достигается правильным подбором сопротивления  $R_1$ , а наибольшая выходная мощность — подбором нагрузки, которой обычно служит обмотка промежуточного реле ( $R \approx 1000$  ом). Выходная мощность усилителя равна или больше 0,5 вт, коэффициент усиления равен или более 50.

Выходная мощность усилителя рассчитывается как разность мощностей, снимаемых с усилителя при изменении тока от минимума до максимума.

Под коэффициентом усиления усилителя понимают отношение изменения выходного напряжения, снимаемого с сопротивления нагрузки  $U_{\text{вых}} = I_{\text{вых}} \cdot R_{\text{вых}}$  к изменению входного напряжения

$$k = \frac{\Delta U_{\text{вых}}}{\Delta U_{\text{вх}}}.$$

Подключив на вход усилителя фотоэлемент, а на выход промежуточное реле, через нормально закрытые контакты которого под-

ключена лампа накаливания, демонстрируют работу усилителя. Пока фотоэлемент не освещен, сигнал на входе усилителя отсутствует. В этот момент ток коллектора триода П-14 минимален. Тогда благодаря положительному потенциалу эмиттера триода П-202, относительно его базы, ток коллектора триода П-202 (ток нагрузки) имеет наибольшее значение. Поэтому при затемненном фотоэлементе промежуточное реле РП срабатывает и размыкает цепь управления.

При освещении фотоэлемента увеличивается напряжение между основанием и эмиттером триода П-14, а следовательно, увеличивается и напряжение на сопротивлении  $R_1$  (это учащимся известно из предыдущих демонстраций), что ведет к уменьшению отрицательного потенциала базы триода П-202. В результате уменьшается напряжение между эмиттером и базой этого триода, что ведет к уменьшению тока нагрузки. Реле отключается и его нормально закрытые контакты замыкаются, включая рабочую цепь.

## § 5. ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЙ ТЕРМОЭЛЕМЕНТ

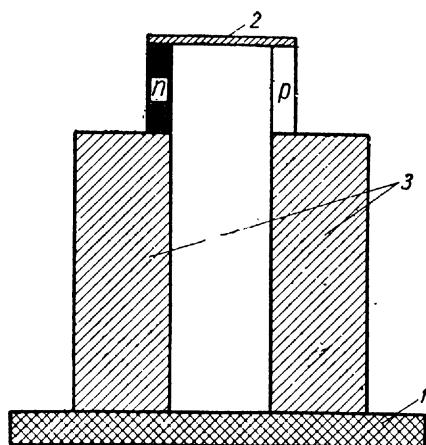


Рис. 176. Полупроводниковый термоэлемент:

1 — изолятор; 2 — медная пластина; 3 — медные радиаторы

Термоэлектрические явления не нашли достаточно полного отражения в программе физики, однако программой предусмотрено изучение термопары и термобатарей. Опираясь на это, учитель может на опыте познакомить учащихся с принципом работы полупроводниковых термогенераторов и полупроводниковых холодильников.

Для демонстрации связанных с этим опытов в кабинете необходимо иметь полупроводниковый термоэлемент, состоящий из стержня электронного полупроводника и стержня дырочного полупроводника, соединенных мед-

ной пластинкой (рис. 176). Демонстрационный вариант такого термоэлемента был разработан В. А. Буровым.

## О п ы т 115. Простейший термогенератор

Оборудование: полупроводниковый термоэлемент, демонстрационный гальванометр, паяльник.

Соединив демонстрационный термоэлемент с гальванометром, прикладывают к медному мостику нагретый паяльник. Наблюдают отклонение стрелки гальванометра.

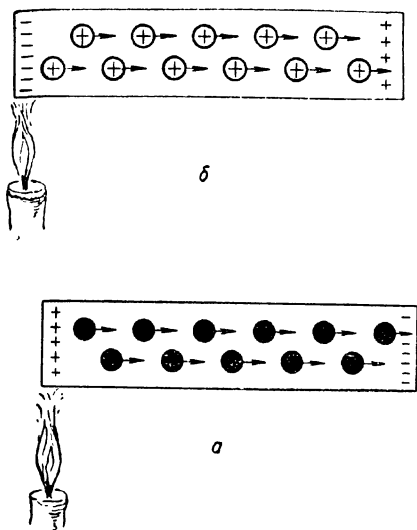


Рис. 177. Схема, поясняющая принцип работы термоэлектрического генератора:

*а* — перемещение электронов от горячего конца к холодному в полупроводнике с электронной проводимостью. Черные кружки обозначают электроны; *б* — перемещение «дырочек» от горячего конца к холодному в полупроводнике с «дырочной» проводимостью. Кружочки со знаком «+» обозначают дырки»

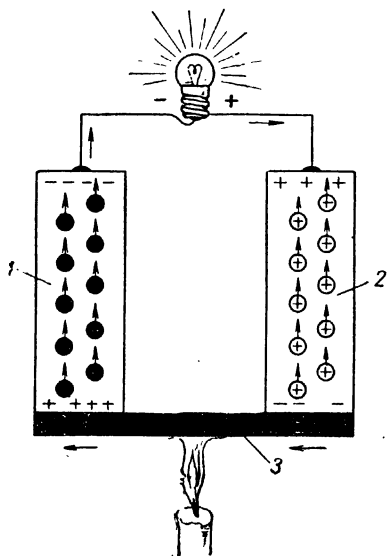


Рис. 178. Принцип работы термоэлемента:

термопара, составленная из полупроводников с электронной проводимостью 1 и с «дырочной» 2, соединенная металлической пластинкой 3

Для объяснения наблюдаемого явления рисуют на доске три схемы (рис. 177, *а*, *б*; 178), поясняющие механизм разделения зарядов в термоэлементе, состоящем из электронного и дырочного полупроводников.

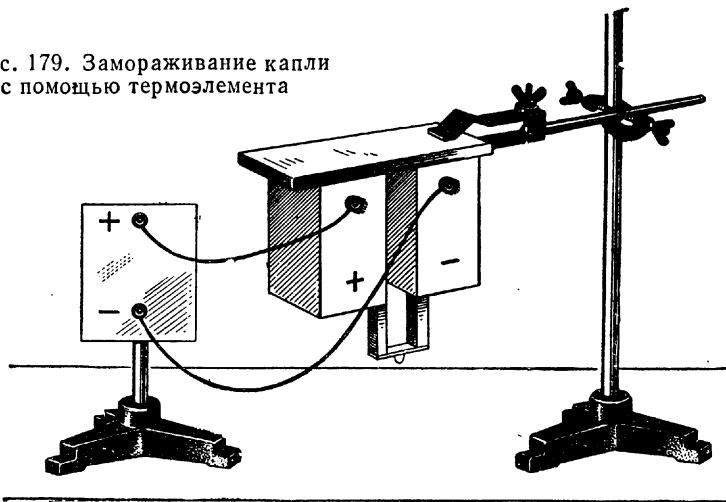
После объяснения принципа работы термогенератора, состоящего из одного термоэлемента, следует рассказать о термогенераторах, применяемых для питания радиоприемников типа (ТГИ-3) радиостанций (типа ТГК-10). В заключение можно просмотреть V фрагмент учебного кинофильма «Полупроводники и их применение».

## Опыт 116. Принцип работы полупроводникового холодильника

**Оборудование:** полупроводниковый термоэлемент, осветитель для теневой проекции, экран, источник постоянного тока, демонстрационный термометр, пипетка.

С помощью полупроводникового термоэлемента можно показать учащимся принцип работы полупроводникового холодильника. Для этого термоэлемент располагают так, чтобы медная соединительная пластинка была вверх. На пластинку наносят несколько капель воды и переворачивают ее на  $180^\circ$ . Капельки соберутся в одну большую каплю (рис. 179), которую надо показать в теневой проекции.

Рис. 179. Замораживание капли с помощью термоэлемента



Присоединив термоэлемент к источнику постоянного (или пульсирующего) тока (направление тока и величину надо выбрать до опыта), замыкают цепь. Через 5—6 минут капля воды замерзает.

Для успешной постановки опыта важно подобрать нужную величину тока, при которой отводимое от спаев количество теплоты было бы значительно меньше теплоты выделяемой. Так, в термоэлементе, которым пользовались в 215-й школе г. Москвы, быстрее всего капля замерзала при токе 8,1 а и напряжении на термоэлементе 0,73 мв. При токе 7,8 и 8,2 а капля не замерзала.

Очень важно для успешного осуществления опыта наличие хороших радиаторов, отводящих теплоту с противоположных концов термоэлемента.

Для того чтобы ускорить процесс замерзания капли, ее можно накрыть обрезком пробирки, укрепляемой на термоэлементе пластилином. Касаясь демонстрационным термометром верхних и нижних спаев, показывают, что в то время, когда нижние спаи охлаждаются, верхние, наоборот, нагреваются.

В заключение, пользуясь схематическим рисунком, следует рассказать о полупроводниковом холодильнике. В таком холодильнике холодные спаи введены внутрь холодильной камеры, а горячие — наружу.

## ГЛАВА VIII

### МАГНИТНОЕ ПОЛЕ

#### § 1. СВЯЗЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И МАГНИТНЫХ ЯВЛЕНИЙ

Электрическое и магнитное поля тесно связаны друг с другом. В явлении электрического тока они существуют одновременно и неразрывно.

Необходимо на выразительных, точных и вместе с тем простых опытах показать учащимся эту неразрывную связь электрического и магнитного полей.

Но среди источников тока, которыми располагает преподаватель физики, нет таких, которые позволяли бы одновременно и убедительно показать и электрическое и магнитное поля. Все доступные учителю физики средства позволяют наблюдать какое-либо одно поле — электрическое или магнитное.

На протяжении более полувека не прекращаются попытки обойти это основное затруднение в методике преподавания электричества. С этой целью предлагались различные способы наблюдения магнитного поля электростатической машины. Но все эти способы являются косвенными или требуют дорогих приборов. Предлагались также способы наблюдения электрических полей у электродов элементов и аккумуляторов, обеспечивающих получение мощных магнитных полей, но образующих очень слабое электрическое поле. Для его обнаружения использовались или очень чувствительные электроскопы (которые порой наблюдают при помощи микроскопа), или пользуются увеличением измеряемого потенциала при уменьшении емкости системы. Однако ни то, ни другое не дает удовлетворительных результатов и не решает задачи.

Таким образом, взаимосвязь электрического и магнитного полей остается неясной, не раскрывается достаточно глубоко и достаточно убедительно.

Самым убедительным доказательством неудовлетворительности этих приемов является тот факт, что появляются все новые и новые предложения для решения этой задачи.

Основной недостаток большинства предложений состоит в том, что поля не обнаруживают себя оба одновременно в форме, доступ-

ной для непосредственного восприятия учащимися. Обычно в этих демонстрациях какое-либо из полей проявляет себя через ряд явлений, и нужны более или менее сложные умозаключения, в результате которых только и приходят к выводу о существовании второго поля.

Исключение составляет опыт, предложенный Д. И. Сахаровым в его учебнике физики для педагогических училищ. В этом опыте электрическое поле обнаруживается непосредственно, но только в электролите, в присутствии ряда сложных явлений. Нужны опять-таки умозаключения, чтобы прийти к выводу, что наблюдаемый эффект обусловлен именно электрическим полем, а не другими явлениями. Остается неясным также, может ли поле существовать вне электролита.

В результате получается, что при изучении курса электричества в средней школе электростатика отрывается от электродинамики, электрическое поле от магнитного. Это иногда приводит к тому, что у учащихся создается ложное представление о двух «сортах» электричества: статического и динамического, а взаимосвязь этих видов для них неясна. Последнее усугубляется еще и тем, что в школах не ставят те немногие опыты, которые подчеркнули бы связь электростатики с током: например, в школах редко измеряют разность потенциалов на концах гальванического элемента при помощи электрометра.

Один из виднейших советских методистов Е. Н. Горячкин, признавая все это, в своей методике писал:

«На основе электростатических явлений учащиеся получают первое представление об электрическом токе, как о перемещении электрических зарядов по проводнику. Однако это представление весьма шатко и далеко не полно, так как оно возникает только на основе логики заключения о необходимости перемещения зарядов при явлениях заряжения и разряжения тел. Учащиеся скорее доверяют словам учителя о существовании электрического тока, чем убеждены в этом. Поэтому очередной задачей преподавателя является ознакомление учащихся с такими свойствами или, вернее, внешними проявлениями (действиями) электрического тока, на основании которых можно было бы заключить о его реальном существовании...

По техническим (разрядка наша. — Н. Ш.) и отчасти методическим соображениям преподаватель лишен возможности продемонстрировать действие тока при разряде электростатического характера» (Е. Н. Г о р я ч к и н, Методика преподавания физики в семилетней школе, т. I, Учпедгиз, 1948, стр. 396).

Здесь ясно выражено и основное затруднение и его причина.

С помощью описанного выше универсального выпрямителя удастся преодолеть эти технические трудности и показать одновременное существование электрического и магнитного полей.



Очень важно экспериментально показать, что магнитное поле действует только на движущиеся электрические заряды и не действует на неподвижные, ибо это черта присущая только магнитному полю, отличающая его от электрического поля, которое действует на неподвижные электрические заряды.

Наконец, особое место занимают опыты, демонстрация которых необходима при введении понятий магнитной индукции и напряженности, а также при изучении магнитного поля прямого тока и катушки.

## § 2. ВВОДНЫЕ ОПЫТЫ

О существовании магнитного поля мы судим по его проявлениям. Назначение описанных ниже опытов заключается в том, чтобы уже при первоначальном знакомстве учащихся с магнитным полем на ряде его проявлений показать реальное существование магнитного поля. Демонстрируемые в них явления не являются в этом месте обучения предметом глубокого и всестороннего изучения, что будет сделано позже.

### О п ы т 117. Одновременное существование электрического и магнитного полей постоянного тока

О б о р у д о в а н и е: универсальный выпрямитель, демонстрационный амперметр, электрометр, электрический султан, электромагнит с высоковольтной обмоткой.

Цель опыта заключается в том, чтобы показать одновременное существование электрического и магнитного полей постоянного тока.

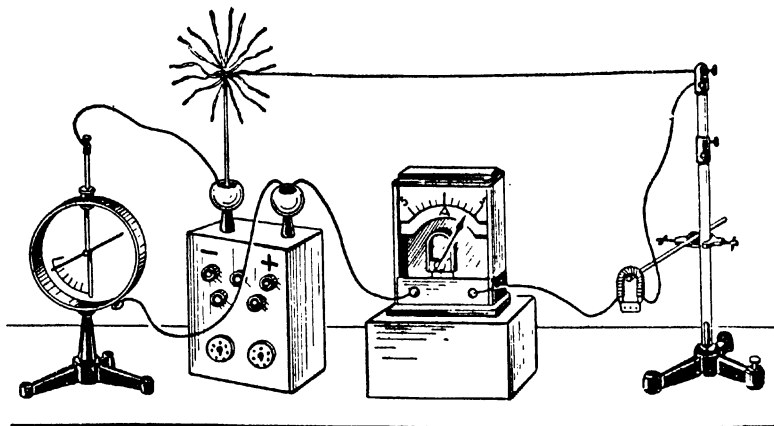


Рис. 180. Демонстрация одновременного существования электрического и магнитного полей

Для этого собирают цепь, состоящую из высоковольтного выпрямителя, гальванометра, специального электромагнита (обмотка которого рассчитана на высокое напряжение), электрометра и электрического султана (рис. 180).

Включив высоковольтный выпрямитель, наблюдают отклонение стрелки электрометра и расхождение листочков электрического султана, что свидетельствует о наличии электрического поля. Одновременно наблюдают отклонение стрелки гальванометра и действие электромагнита, который притягивает лезвия безопасных бритв, ученические перья, мелкие гвозди и т. п., что свидетельствует о наличии магнитного поля.

При выключении выпрямителя листочки султана опадают, стрелки электрометра и гальванометра возвращаются в исходное положение, электромагнит перестает притягивать стальные предметы.

На основании сделанного опыта делают вывод, что в явлении электрического тока электрическое и магнитное поля существуют одновременно как две стороны одного и того же явления. Такое поле принято называть электромагнитным. Так как электромагнитное поле постоянного тока постоянно во времени, то его обычно называют стационарным электромагнитным полем.

#### Опыт 118. Магнитное поле постоянного тока

**Оборудование:** батарея аккумуляторов ЗНКП-22, магнитная стрелка, демонстрационный ключ, толстый алюминиевый провод, ртутная лампа типа ПРК-2, стеклянная трубка, наполненная электролитом, источник постоянного тока (120 в, 5 а).

Цель опыта — показать, что вокруг любого проводника, по которому проходит электрический ток, независимо от природы проводника (металл, электролит, разреженный газ), существует магнитное поле. Опыт целесообразно разбить на три отдельные демонстрации.

1. Собирают установку, изображенную на рисунке 181. Проводник, соединяющий реостат с аккумулятором, не должен быть слиш-

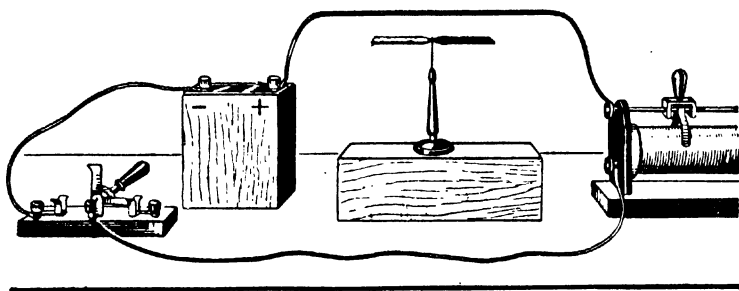


Рис. 181. Магнитное поле постоянного тока

ком мягким, чтобы его можно было, изогнув, установить над магнитной стрелкой.

Наилучшее расположение стрелки — вдоль демонстрационного стола, тогда за ней легко наблюдать со всех мест аудитории. Если же в кабинете демонстрационный стол расположен не вдоль магнитного меридиана, а поперек — наблюдение за поворотом стрелки затруднено. В этом случае надо воспользоваться несколькими искусственными линейными магнитами для того, чтобы изменить расположение магнитной стрелки на более удачное для целей демонстрации. Магниты лучше всего положить за ящиком-подставкой и обращать на них внимание учащихся не следует, так как они не изменяют существа опыта.

Опыт хорошо удается при токе 3—5 а и хорошей намагниченности стрелки. Внимание учащихся необходимо сосредоточить на магнитной стрелке, являющейся в данном опыте индикатором магнитного поля.

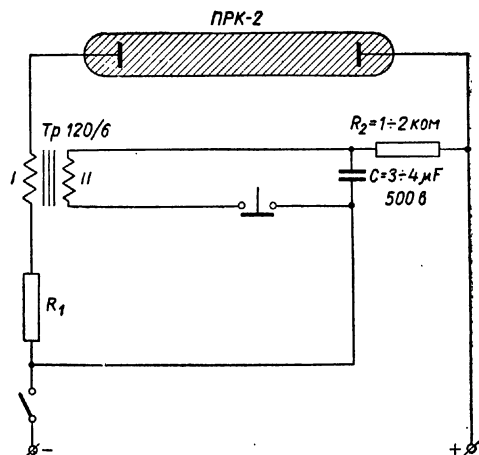


Рис. 182. Схема включения ртутной лампы ПРК-2

Замкнув цепь, наблюдают отклонение магнитной стрелки от первоначального положения. Разомкнув цепь, экранируют проводник алюминиевой фольгой (можно продеть проводник в алюминиевую трубку), которую соединяют с землей, и повторяют опыт.

Делают вывод, что отклонение магнитной стрелки вызывается не электрическим полем.

2. Металлический проводник заменяют стеклянной трубкой, в которую наливают раствор медного купороса. При включении тока замечают отклонение магнитной стрелки от первоначального положения.

3. Стеклоанную трубку заменяют ртутной лампой типа ПРК-2 (рис. 182), аккумулятор — источником постоянного тока с напряжением, достаточным для горения данной лампы.

При включении тока, как и в предыдущих опытах, замечают отклонение магнитной стрелки от своего первоначального положения, правда, не столь значительное.

Для защиты глаз учащихся от вредного действия ультрафиолетового излучения перед ртутной лампой необходимо поставить толстое стекло.

### Опыт 119. Магнитное поле постоянных магнитов

**Оборудование:** магнитная стрелка, демонстрационный прямолинейный магнит (полосовой), алюминиевый экран, два кольцевых магнита из высококоэрцитивного сплава, стеклянная банка, мензурка или стеклянная трубка большого диаметра.

Цель опыта заключается в том, чтобы показать наличие магнитного поля вокруг постоянных магнитов. Опыт распадается на две небольшие взаимодополняющие демонстрации:

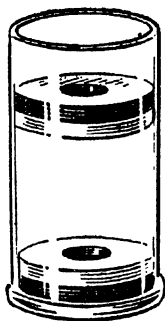


Рис. 183. «Парение» магнитов

1) берут большой демонстрационный магнит и, перемещая его около магнитной стрелки, замечают движение стрелки. Поместив между магнитной стрелкой и магнитом заземленный алюминиевый экран, повторяют опыт. Делают вывод, что вокруг магнита, как и вокруг проводника с током, есть магнитное поле, через которое действие магнита передается на магнитную стрелку;

2) кольцевой магнит, изготовленный из порошка высококоэрцитивного сплава, спрессованного с помощью пластмассы, опускают на дно стеклянного цилиндра, взятого из лабораторного комплекта по электролизу. Второй кольцевой магнит опускают в цилиндр так, чтобы магниты были обращены друг к другу одноименными полюсами. Наблюдают «парение» верхнего магнита над нижним (рис. 183).

Затем одевают магниты на стеклянную трубку, расположенную горизонтально. Передвигая один магнит к другому, замечают движение второго магнита по трубке.

Опыты с кольцевыми магнитами весьма наглядны и ощутимо показывают наличие магнитного поля.

### Опыт 120. Магнитное поле конвекционных токов

**Оборудование:** таблица.

Опыт Роуланда — Эйхенвальда, имеющий большое значение для формирования правильных представлений о магнитном поле, в нас-

тоящее время не может быть осуществлен в школьном физическом кабинете, вследствие его сложности. Поэтому для его объяснения необходимо изготовить простейшую схему опыта, нарисованную на большом листе бумаги (рис. 184).

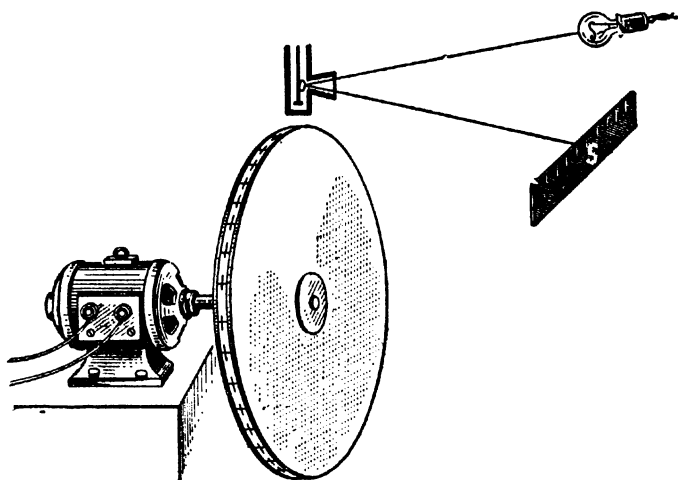


Рис. 184. Схема опыта Роуланда — Эйхенвальда

При объяснении опыта следует обратить внимание учащихся на малую напряженность магнитного поля, получающуюся в результате вращения диска, которая в десятки тысяч раз меньше напряженности магнитного поля Земли, что делает опыты чрезвычайно трудными для воспроизведения.

### Опыт 121. Действие магнитного поля на электрические заряды

**Оборудование:** демонстрационный штатив, аккумуляторная батарея, демонстрационный ключ, гибкий проводник, демонстрационный дугообразный магнит, универсальный выпрямитель, трубка с экраном.

Назначение опыта заключается в том, чтобы показать, что магнитное поле не действует на неподвижные и действует на движущиеся электрические заряды. Для этого собирают установку, изображенную на рисунке 185, а. Проводник должен быть гибким и достаточно длинным (1,5—2 м). Лучше всего его изготовить из тонкой алюминиевой фольги, которую для лучшей видимости следует слегка измять. Собрав цепь, обращают внимание учащихся на то, что проводник, присоединенный к отрицательному полюсу батареи аккумуляторов, заряжен отрицательно. Поднося к проводнику де-

монстрационный дугообразный магнит, замечают, что магнитное поле последнего не действует на неподвижные электрические заряды, имеющиеся на проводнике.

Замыкают цепь и замечают втягивание (или выталкивание) проводника (рис. 185, б). Так как при замыкании цепи изменилось только состояние электрических зарядов (неподвижные заряды пришли в движение), то делают вывод, что магнитное поле не действует на неподвижные заряды и действует на движущиеся, что является его отличительным признаком.

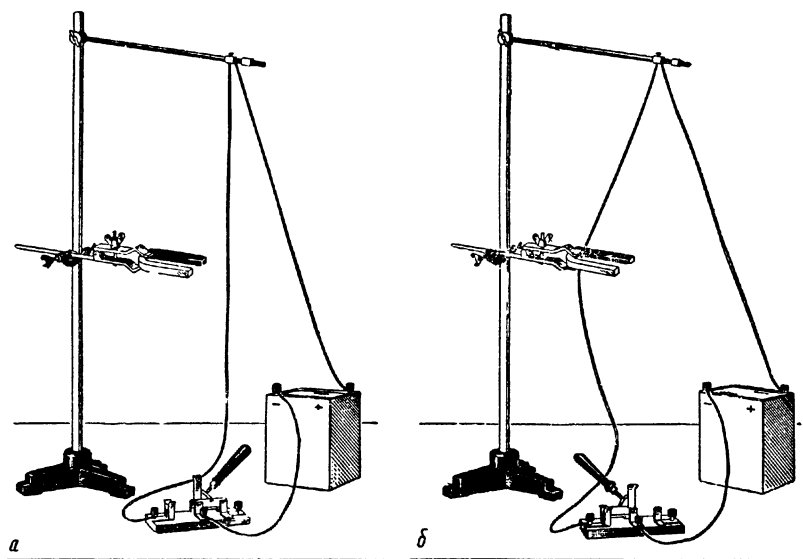


Рис. 185. Действие магнитного поля на электрические заряды

Для закрепления полученного вывода, а также для конкретизации явления необходимо проделать аналогичный опыт с электронным пучком.

К высоковольтному выпрямителю присоединяют трубку с экраном для наблюдения электронного пучка. Замкнув цепь, подносят магнит к трубке и наблюдают отклонение пучка. Изменив положение магнита, замечают отклонение пучка в противоположную сторону.

### О п ы т 122. Действие магнитного поля на сталь

О б о р у д о в а н и е: полосовой магнит, стрелка из мягкой отожженной стали, стальные опилки.

Цель демонстрации — показать действие магнитного поля на железо. Изучение явления магнитной индукции в этом опыте не проводится.

Стрелку из мягкой отожженной стали подносят к стальным опилкам и наблюдают, что опилки не притягиваются к стрелке. Делают вывод, что стрелка не намагничена.

Установив стрелку на подставке, подносят к ней полосовой магнит. Замечают, что стальная стрелка располагается по направлению к одному из полюсов магнита. К дальнему концу стрелки подносят коробочку со стальными опилками и замечают, что стрелка притягивает опилки. Отодвинув полосовой магнит от стрелки, наблюдают опадение опилок. Делают вывод, что сталь, будучи внесена в магнитное поле, намагничивается.

### О п ы т 123. К а р т и н ы м а г н и т н ы х п о л е й

О б о р у д о в а н и е: проекционный аппарат, приспособления для демонстрации картин магнитных полей, стальные опилки.

Наблюдение спектров магнитных полей имеет огромное значение для формирования представлений учащихся о магнитном поле. С помощью спектров создается геометрический образ поля, вскрывается его структура.

Демонстрацию лучше всего проводить в проекции. Для этого проекционный аппарат устанавливают в положение для горизонтальной проекции. Конденсор аппарата защищают тонким стеклом от загрязнения стальными опилками и от механических повреждений. На стекло устанавливают либо постоянные магниты, либо специальные приспособления для наблюдения спектров магнитных полей прямого тока, кольцевого тока и тока катушки. После того как магниты или проводники установлены на стекле, включают лампу аппарата и проектируют установленный объект на экран. Если демонстрируют спектр магнитного поля постоянного магнита, магнит накрывают стеклом и равномерно посыпают на второе стекло стальные опилки, для чего перемещают коробочку-сито вверх и вниз под углом  $45^\circ$  к горизонту. Такое направление движения удобно тем, что опилки не попадают на объектив и рука учителя не загрязняется его.

Для получения хорошего спектра берут карандаш за конец и слегка постукивают другим концом его по краю стекла.

### § 3. ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ТОКОВ

Большое число практических применений электромагнетизма основано на использовании сил взаимодействия между токами (электродвигатели, электроизмерительные приборы и т. п.). Наиболее простым случаем взаимодействия токов является взаимодействие

параллельных токов. При этом следует иметь в виду, что цепь постоянного тока всегда замкнута и когда речь идет о взаимодействии параллельных токов, то рассматривают взаимодействие двух контуров, имеющих очень длинные прямолинейные отрезки, расположенные параллельно друг другу. При этом рассматривается лишь взаимодействие средних частей этих участков и пренебрегают взаимодействием отдаленных участков.

В настоящее время в средней школе взаимодействие параллельных токов изучают описательно. Устанавливают лишь сам факт, что параллельные токи притягиваются, а антипараллельные — отталкиваются. При таком объяснении явления не создается условий для введения понятия индукции магнитного поля, так как учащимся нельзя объяснить, почему необходимо взять для измерения индукции отношение силы, действующей на ток, к произведению тока на длину проводника, по которому он проходит. Кроме того, при таком описательном изучении явления нельзя дать определение единице тока в системе МКСА.

Если же взаимодействие параллельных токов изучить несколько глубже и установить экспериментально, от чего и как зависит сила их взаимодействия, то возможно показать роль среды в магнитном взаимодействии токов, вести понятие о магнитной проницаемости и объяснить учащимся, почему в формуле индукции в знаменателе стоит длина проводника.

#### **Опыт 124. Установка для изучения взаимодействия параллельных токов**

**Оборудованье:** аэродинамические весы<sup>1</sup>, две рамки, два демонстрационных амперметра, два низкоомных реостата (30 ом, 5 а), аккумуляторы 6-НКН-10.

Рамку размером 100 × 200 мм, состоящую из 40—50 витков провода диаметром 0,2—0,3 мм, с помощью специального держателя укрепляют на рычаге аэродинамических весов конструкции, разработанной в Институте методов обучения (рис. 186).

Передвигая противовес  $P$ , уравнивают рамку (стрелка динамометра должна находиться на нулевом делении). С помощью подставки вторую рамку располагают так, чтобы расстояние между взаимодействующими проводниками было 0,5 см. Включают рамки в цепь постоянного тока по схеме, изображенной на рисунке 187.

Амперметры нужны для измерения токов, проходящих через рамки, а реостаты  $R_1$  и  $R_2$  — для их изменения. Сопrotивление реостатов 25—30 ом; они должны быть рассчитаны на ток до 5 а.

Если в кабинете нет двух демонстрационных амперметров, можно обойтись одним, включая его только в цепь с регулируемым током.

---

<sup>1</sup> Конструкция весов разработана С. А. Шурхиным под руководством А. А. Покровского.



В качестве источника тока можно использовать батарею щелочных аккумуляторов 6-НКН-10.

Замыкают обе цепи и устанавливают в рамках ток по 1 а. Направление токов в рамках должно быть таким, чтобы они отталкива-

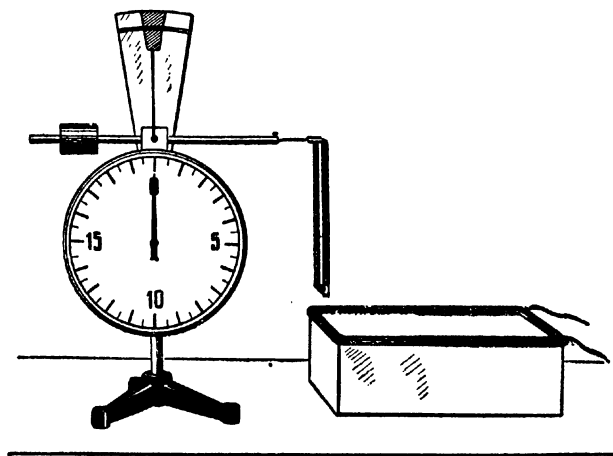


Рис. 186. Установка для изучения взаимодействия параллельных токов

лись. Возвратив рамку при помощи динамометра в первоначальное положение, находят значение силы взаимодействия в условных единицах. Увеличивают ток в подвижной рамке в два раза, замечают, что и сила взаимодействия также возрастает в два раза; при увеличении тока в три раза сила взаимодействия возрастает также в

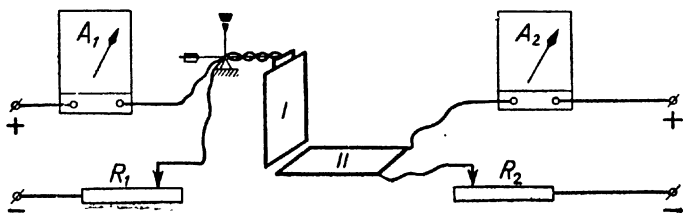


Рис. 187. Схема электрической цепи для изучения взаимодействия параллельных токов

три раза. Из опыта видно, что сила взаимодействия параллельных токов пропорциональна току в одном из проводников. Вывод записывается на доске  $F \sim I_1$ .

Меняя аналогичным образом ток в неподвижном проводнике, устанавливают, что  $F \sim I_2$ .

Увеличивая расстояние между проводами в два, три и четыре раза, замечают, что сила взаимодействия уменьшается в соответственное число раз, т. е.

$$F \sim \frac{1}{d}.$$

Изменив положение обеих рамок таким образом, чтобы взаимодействовали их длинные стороны, устанавливают, что

$$F \sim l.$$

Помещают под подвижной рамкой фотокувету; в нее кладут неподвижную рамку и наливают парамагнитную жидкость так, чтобы оба взаимодействующие проводника оказались под слоем жидкости. Уравновесив подвижную рамку и установив ток такой же величины, как и в предыдущем опыте, убеждаются, что сила взаимодействия параллельных токов зависит от магнитных свойств среды; записывают следующим образом:  $F \sim \mu$ .

Объединяя результаты наблюдений, записывают

$$F \sim \mu \frac{I_1 I_2 l}{d}$$

или, перейдя к знаку равенства,

$$F = k\mu \frac{I_1 I_2 l}{d}.$$

Затем сообщают учащимся, что многократные измерения, проведенные в лучших лабораториях мира, показали, что каждый метр двух очень длинных параллельных проводников, расположенных на расстоянии 1 м друг от друга в вакууме, когда по ним проходит ток по 1 а, взаимодействует с силой  $2 \cdot 10^{-7}$  н. На доске записывают

$$2 \cdot 10^{-7} \text{ н} = k\mu \frac{1\text{ а} \cdot 1\text{ а} \cdot 1\text{ м}}{1\text{ м}}.$$

Далее объясняют, что коэффициент пропорциональности  $k$  был взят равным  $\frac{1}{2\pi}$ . Следовательно, для вакуума коэффициент  $\mu$  равен  $4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{н}}{\text{а}^2}$ . Его обозначают через  $\mu_0$  и называют магнитной постоянной

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{н}}{\text{а}^2}.$$

Магнитные свойства веществ удобно сравнивать с магнитными свойствами вакуума. Так, сила взаимодействия параллельных токов в вакууме и в какой-либо среде может быть подсчитана по формулам

$$F_0 = \frac{\mu_0 I_1 I_2 l}{2\pi d}; \quad F = \frac{\mu I_1 I_2 l}{2\pi d}.$$

Отношение  $\frac{F}{F_0} = \frac{\mu}{\mu_0} = \mu_r$  называется относительной магнитной проницаемостью среды и оно показывает, во сколько раз сила

взаимодействия параллельных токов в данной среде больше или меньше силы взаимодействия этих же токов в вакууме.

Величина  $\mu = \mu_0 \mu_r$  называется магнитной проницаемостью данной среды.

#### § 4. ИНДУКЦИЯ И НАПРЯЖЕННОСТЬ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

Для характеристики магнитного поля введены две векторные величины — индукция и напряженность. В учебной и методической литературе нет четкого разделения этих величин.

С целью внесения необходимой ясности в понимание величин индукции и напряженности уместно проследить историю их введения. Исторически раньше стало изучаться магнитное поле постоянных магнитов. При этом предполагалось, что существуют магнитные массы, являющиеся источниками магнитного поля. В качестве силовой характеристики магнитного поля постоянных магнитов была введена напряженность, которая определялась как величина, измеряемая отношением силы, с которой поле действует на северную магнитную массу, к величине этой магнитной массы

$$H = \frac{F}{m}.$$

Направление напряженности было выбрано совпадающим с направлением силы, действующей на северную магнитную массу.

Позже понятием напряженности воспользовались для описания магнитного поля тока. При этом сила, с которой поле действует на северную магнитную массу, определялась по закону Био — Савара.

Развитие физики, и особенно электротехники, потребовало изучения и характеристики силового действия магнитного поля на ток. Для этого и была введена индукция магнитного поля как величина, измеряемая отношением силы, с которой магнитное поле действует на ток, проходящий по проводнику, расположенному перпендикулярно к магнитным силовым линиям, к произведению тока на длину проводника, по которому этот ток проходит

$$B = \frac{F}{Il}.$$

Направление вектора индукции было взято перпендикулярным к направлению силы, действующей на ток, и к направлению тока. Такой выбор направления для вектора индукции давал возможность пользоваться введенными через напряженность магнитными силовыми линиями.

Величины напряженности и индукции в однородной среде связаны соотношением:

$$B = \mu H,$$

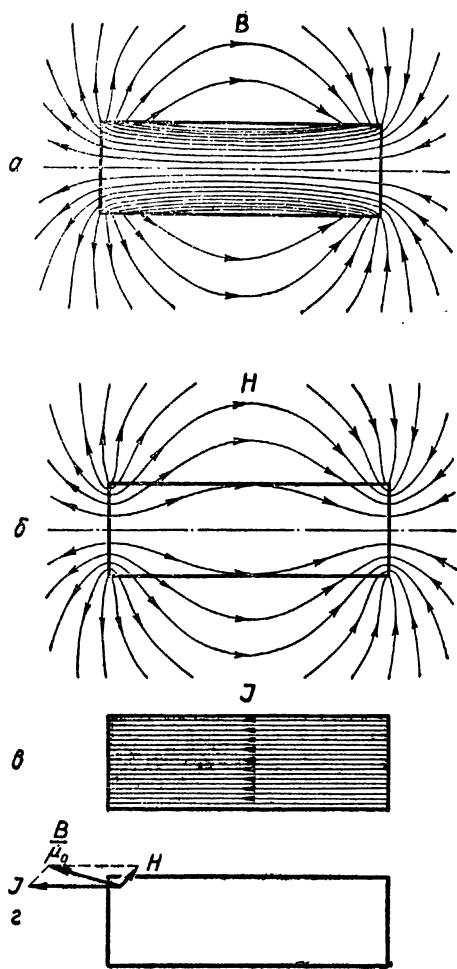


Рис. 188. Направление векторов магнитной индукции и напряженности магнитного поля для случая однородного намагниченного стержня, находящегося в воздухе

где  $\mu$  — магнитная проницаемость среды, в которой создано магнитное поле.

То обстоятельство, что в гауссовой системе единиц  $\mu$  величина безразмерная, иногда дает повод пользующимся этой системой думать, что индукция и напряженность магнитного поля — величины принципиально одинаковые. Это неверно: напряженность и индукция магнитного поля принципиально различны.

Это различие подтверждается тем, что:

1. Напряженность и индукция магнитного поля различны по способу их введения. Напряженность была введена как величина, характеризующая силовое действие магнитного поля на северную магнитную массу, а индукция — как величина, характеризующая силовое действие магнитного поля на ток;

2. Магнитная индукция и напряженность магнитного поля связаны между собой сложной зависимостью. Графически эта зависимость для ферромагнетиков выражается петлей гистерезиса на плоскости  $BH$ ;

3. Индукция магнитного поля в однородной среде зависит от магнитных свойств среды, в которой создано магнитное поле, а напряженность — не зависит;

4. В анизотропных средах напряженность и индукция имеют различное направление (рис. 188).

5. Напряженность и индукция во всех системах единиц, за исключением гауссовой (СГС), имеют различную размерность.

Из всего сказанного следует, что в средней школе надо четко различать индукцию и напряженность магнитного поля.

### О п ы т 125. Введение понятия о магнитной индукции

О б о р у д о в а н и е: магнитная стрелка, постоянный магнит, аккумуляторная батарея, проводник, демонстрационный ключ.

Используя демонстрационную магнитную стрелку в качестве простейшего индикатора поля, демонстрируют, что поле, создаваемое постоянным магнитом в различных точках, различно. Следовательно, необходима величина, дающая полю количественную характеристику. Рассказывают учащимся, что для этой цели может быть использовано любое проявление поля (например, действие магнитного поля на ток, на магнитную стрелку, явление магнитострикции и т. п.). Однако в силу того, что в большинстве технических устройств используется силовое действие магнитного поля на ток, целесообразно характеризовать магнитное поле в каждой его точке отношением силы, с которой магнитное поле действует на «пробный» ток, к величине тока и длине проводника, по которому этот ток проходит:

$$B = \frac{F}{I \cdot l}.$$

Здесь уместно напомнить учащимся о способе введения напряженности электрического поля  $E = \frac{F}{q}$ . Необходимо обстоятельно разъяснить появление величины  $l$  в знаменателе, опираясь на изученное ранее взаимодействие параллельных токов, а также на то, что проводник должен располагаться перпендикулярно к магнитным силовым линиям.

Дав определение вновь введенной величине как силовой характеристике магнитного поля, обращают внимание учащихся на ее векторный характер, указав, что направление индукции магнитного поля выбрано перпендикулярным и к направлению тока  $I$  и к направлению силы  $F$ .

После этого учащимся объясняют устройство индикатора индукции и демонстрируют его работу.

### О п ы т 126. Магнитное поле прямого тока

О б о р у д о в а н и е: большая рамка из 50—100 витков изолированного провода, индикатор магнитной индукции, реостат, источник тока, сосуд с плоскопараллельными гранями, парамагнитная жидкость, демонстрационный ключ.

К изучению магнитного поля прямого тока можно подойти двумя путями:

- 1) используя формулу для подсчета силы взаимодействия параллельных токов;
- 2) не используя этой формулы. Разница этих двух подходов скажется на характере описанного ниже эксперимента.

Если идти первым путем, то после того, как введено понятие индукции, выводят формулу индукции магнитного поля прямого тока:

$$B = \frac{\mu I}{2\pi d}$$

и задача эксперимента сводится к проверке этой формулы.

Идя вторым путем, необходимо, используя индикатор индукции магнитного поля, экспериментально установить зависимость

$$B \sim \frac{\mu I}{d}.$$

Техника постановки эксперимента при обоих способах одинакова.

На демонстрационном столе устанавливают большую рамку, состоящую из 50—100 витков провода диаметром 0,2—0,3 мм. Последовательно с рамкой включают реостат на 20—30 ом и ключ.

Вблизи вертикальной стороны рамки устанавливают индикатор индукции магнитного поля (рис. 189).

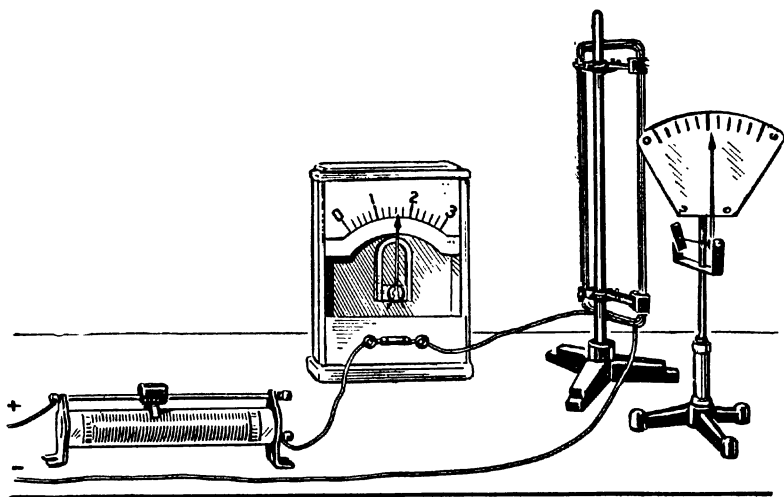


Рис. 189. Установка для изучения магнитного поля катушки

Меняя величину тока в рамке, убеждаются, что  $B \sim I$ . Отодвигая рамку от индикатора (при постоянном токе в рамке), убеждаются, что

$$B \sim \frac{I}{d}.$$

Установив рамку и индикатор в сосуд с плоскопараллельными гранями, включают ток и замечают отклонение стрелки индикатора. Выключив ток, наливают в сосуд парамагнитную жидкость. После включения тока замечают, что стрелка индикатора отклоняется на больший угол, следовательно, индукция магнитного поля зависит от магнитных свойств среды:  $B \sim \mu$ .

Объединяя результаты наблюдений, записывают

$$B \sim \frac{\mu I}{d}.$$

Или, переходя к знаку равенства,

$$B = k \frac{\mu I}{d}.$$

Почему коэффициент  $k = \frac{1}{2\pi}$ , а не единице, учащимся не объясняют.

Установленные на опыте закономерности конкретизируют представление учащихся об индукции магнитного поля, вскрывают ее физическую сущность, показывают зависимость от тока, расстояния и магнитных свойств среды.

### О п ы т 127. Магнитное поле катушки

**Оборудование:** индикатор магнитной индукции, две демонстрационные катушки, реостат, соединительные проводники, батарея аккумуляторов, парамагнитная жидкость, ванна.

Цель опыта заключается в том, чтобы экспериментально установить, от каких причин и как зависит индукция магнитного поля внутри катушки. Для этого помещают индикатор индукции внутрь демонстрационной катушки (рис. 190) и, меняя величину тока в ней, устанавливают, что  $B \sim I$ .

Установив такое значение

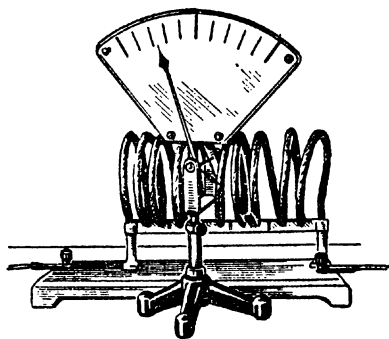


Рис. 190. Установка для изучения магнитного поля прямого тока

тока, при котором стрелка индикатора занимает некоторое среднее положение, присоединяют последовательно к первой катушке вторую. Вновь в середину катушки вставляют индикатор (рис. 191), и, доведя значение тока до того значения, которое было в первом случае, убеждаются, что индукция поля внутри катушки не зависит от числа витков.

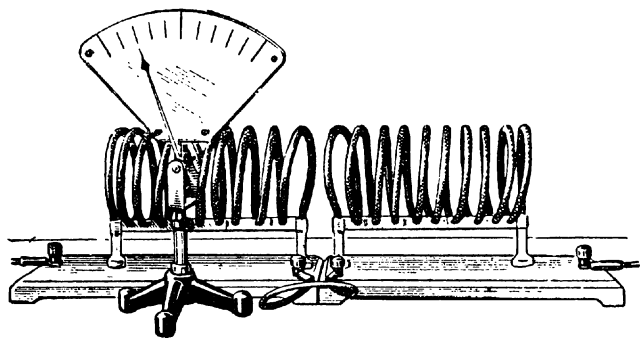


Рис. 191. Индукция магнитного поля однослойной катушки не зависит от числа витков

После этого вторую катушку соединяют так, как показано на рисунке 192. В этом случае вдвое увеличивается число витков, приходящихся на единицу длины. Установив индикатор и включив ток (прежней величины), убеждаемся, что индукция также увеличилась вдвое; как вывод записывают на классной доске:

$$B \sim \frac{n}{l}.$$

Установив индикатор и демонстрационную катушку в ванну, сделанную из органического стекла, включают ток и замечают показания индикатора. Выключив ток, наполняют ванную парамагнитной жидкостью и вновь включают ток. Замечают, что стрелка индикатора отклонилась на большую величину. Делают вывод, что индукция магнитного поля зависит от магнитных свойств среды.

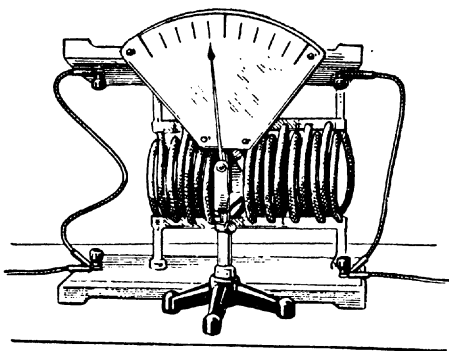


Рис. 192. Индукция магнитного поля катушки зависит от числа витков, приходящихся на единицу длины



$$B \sim \mu$$

Объединяя результаты наблюдений, получают

$$B \sim \frac{\mu I n}{l}$$

или, переходя к знаку равенства,

$$B = k \frac{\mu I n}{l}; \quad B = k \mu \frac{I \cdot n}{l}.$$

В рационализованной системе МКСА  $k = 1$ , и формула приобретает наиболее простой вид:

$$B = \frac{\mu I \cdot n}{l}.$$

### О п ы т 128. Введение понятия напряженности магнитного поля

**О б о р у д о в а н и е:** индикатор напряженности магнитного поля, демонстрационная рамка, две демонстрационных катушки, парамагнитная жидкость, источник тока, реостат, соединительные проводники.

Понятие напряженности магнитного поля вводится после понятия индукции, что дает возможность учителю опереться на знание учащимися предыдущего материала. Для измерения напряженности используется индикатор напряженности и с его помощью изучается магнитное поле прямого тока и катушки. Установка и методика демонстраций аналогичны описанным выше, но вместо индикатора индукции берут индикатор напряженности. В процессе изучения поля обнаруживается, что напряженность магнитного поля не зависит от магнитных свойств среды. Это наиболее существенное отличие напряженности от индукции находит отражение в формулах для подсчета напряженности магнитного поля прямого тока и катушки, которые устанавливаются также на основании опыта.

Постановка опытов аналогична опытам 126 и 127.

### О п ы т 129. Соотношение между магнитной индукцией и напряженностью магнитного поля

**О б о р у д о в а н и е:** индикатор магнитной индукции, индикатор напряженности магнитного поля, демонстрационная катушка, источник тока, реостат, сосуд с плоскопараллельными стенками (аквариум), парамагнитная среда, соединительные проводники

Сравнение соответствующих формул индукции и напряженности дает возможность установить соотношение между этими величинами:

$$B = \mu H.$$

Прямую пропорциональность  $B$  и  $H$  показывают на опыте<sup>1</sup>. Для этого внутрь демонстрационной катушки на одинаковом расстоянии от ее концов устанавливают индикаторы  $B$  и  $H$ . Регулируя ток в катушке, замечают, что индукция и напряженность магнитного поля изменяются пропорционально изменению тока.

Опыт дает основание для утверждения, что эти величины связаны между собой прямой пропорциональной зависимостью.

## § 5. МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА ВЕЩЕСТВ

Новой программой физики предусмотрено изучение магнитных свойств веществ. В настоящее время нет достаточно полно разработанной методики изучения этой темы, но несомненно то, что основное внимание должно быть обращено на изучение свойств ферромагнетиков, играющих исключительно важную роль в современной технике. Достаточно глубокое изучение свойств ферромагнитных веществ одновременно будет способствовать развитию кругозора учащихся в области физики.

Описанные ниже демонстрационные опыты, по-видимому, несколько выходят за рамки программы средней школы и частично могут быть опущены учителем.

### О п ы т 130. Ферромагнетизм

**Оборудование:** мощный демонстрационный электромагнит или электромагнит, собранный из деталей универсального трансформатора, источник постоянного тока (100  $\text{в}$ , 10  $\text{а}$ ), проекционный аппарат, экран, стальной, никелевый и кобальтовый стержни длиной 20—30  $\text{мм}$ , диаметром 2—3  $\text{мм}$ , специальный подвес, тонкая нить, реостат (30  $\text{ом}$ , 5  $\text{а}$ ).

Цель опыта заключается в том, чтобы показать, что ряд веществ (сталь, никель, кобальт), будучи внесены в магнитное поле, намагничиваются и располагаются вдоль силовых линий поля.

Если в школе нет мощного демонстрационного электромагнита, можно собрать достаточно хороший электромагнит из деталей универсального трансформатора. Для этого катушки трансформатора, рассчитанные на включение в сеть 120 и 220  $\text{в}$ , одевают на магнитопровод и соединяют параллельно. На разомкнутые концы магнитопровода устанавливают и прочно закрепляют полюсные наконечники; расстояние между наконечниками должно быть около 25  $\text{мм}$ . В пространство между полюсными наконечниками подвешивают на капроновой нити-паутинке последовательно стержни из стали,

---

<sup>1</sup> Случай ферромагнетиков пока не рассматривается.

никеля и кобальта (рис. 193). Для успеха демонстрации существенно, чтобы магнитное поле не было очень сильным.

В начале опыта стержни располагают точно между полюсами и с помощью головки подвеса устанавливают перпендикулярно к магнитным силовым линиям и проектируют на экран.

Замкнув цепь, демонстрируют ориентацию ферромагнитного стержня вдоль силовых линий. Выключив ток, наблюдают возвращение стержня в первоначальное положение.

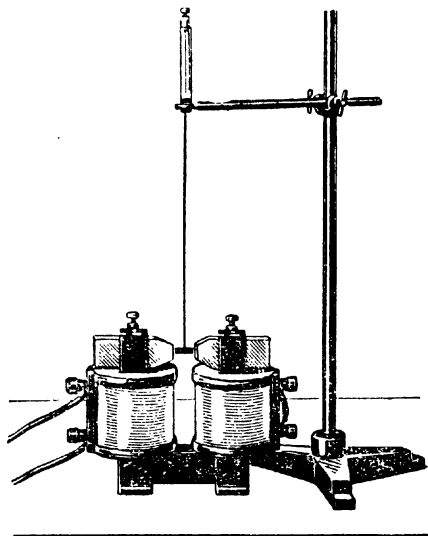


Рис. 193. Установка для демонстрации поведения веществ в магнитном поле

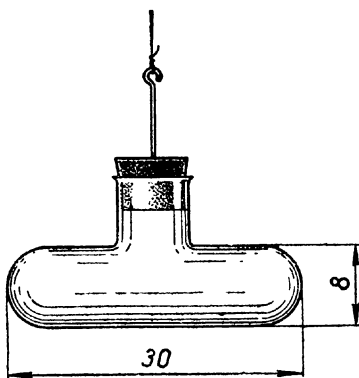


Рис. 194. Ампула с хлорным железом

### О п ы т 131. Парамагнетизм

**Оборудование:** то же, что и в предыдущем опыте, и, кроме того, ампулы с хлорным железом и кристаллическим марганцем.

Собирают установку, описанную в предыдущей демонстрации. В пространство между полюсными наконечниками электромагнита на длинной и тонкой нити подвешивают ампулу с хлорным железом (рис. 194). С помощью головки подвеса ампулу располагают перпендикулярно к полюсным наконечникам. Установку проектируют на экран.

Замкнув цепь, замечают поворот ампулы, которая устанавливается вдоль магнитных силовых линий.

Аналогично повторяют опыт с ампулой, наполненной марганцем. В этом случае опыт проходит более наглядно.

Для успеха опыта существенное значение имеет толщина и длина нити, на которой подвешивают ампулы: чем тоньше и длиннее нить, тем меньше ее противодействующий момент. Очень удобны капроновые нити из чулок «паутинка». Для того чтобы избежать закручивания нити во время опыта, ампулу надо подвесить заранее, нить вытянется и раскрутится.

### Опыт 132. Диамагнетизм

**Оборудование:** то же, что и в предыдущем опыте, и, кроме того, висмутовый стержень.

Висмутовый стержень размером  $4 \times 4 \times 20$  мм подвешивают на капроновой нити-паутинке точно между полюсами электромагнита. В начале опыта с помощью подвижной головки стержень располагают вдоль силовых линий и проектируют на экран.

Включив ток, наблюдают поворот стержня в магнитном поле. Опыт хорошо удается при токе в катушках 6—8 а. Такой ток катушки могут выдержать только несколько секунд. Поэтому включать катушки надо через плавкий предохранитель, который сгорает через 2—3 сек после включения.

### Опыт 133. Зависимость ферромагнитных свойств от температуры

**Оборудование:** универсальный трансформатор с катушкой на 220 в, две тонкие стальные проволоки диаметром 1—1,5 мм, лезвие от безопасной бритвы, аккумулятор, газовая горелка.

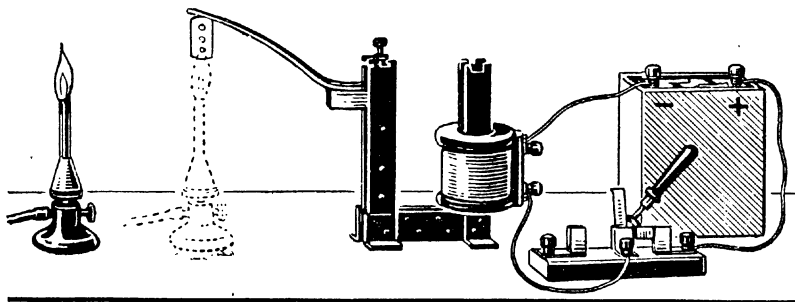


Рис. 195. Зависимость ферромагнитных свойств от температуры

Стальную пластинку длиной 20—25 см зажимают под полюсные наконечники так, как показано на рисунке 195. Включают ток и, поднося лезвие от безопасной бритвы к пластинке, наблюдают его притяжение.

Подставив под лезвие зажженную газовую горелку или спиртовку, наблюдают, что при нагревании лезвие падает на стол. Опыт свидетельствует о потере лезвием ферромагнитных свойств.

После того как лезвие остынет, его вновь подносят к стальной пластинке и снова наблюдают проявление ферромагнитных свойств.

#### Опыт 134. Нагревание ферромагнетика при циклическом перемagnetивании

**Оборудование:** катушка от универсального трансформатора, рассчитанная на включение в сеть напряжением 220 в; медный и стальной стержни длиной 15—20 см, диаметром 15—20 мм; воск, спички, источник переменного тока, реостат.

Нагревание ферромагнетика при циклическом перемagnetивании демонстрируют следующим образом. Два одинаковых по размерам стержня, стальной и медный, устанавливают на деревянной дощечке, которую затем ставят в катушку от универсального трансформатора (рис. 196). С помощью воска на стержнях на одинаковой высоте укрепляются 2—3 спички.

Включив через реостат переменный ток, безопасный для катушки, наблюдают, что через некоторое время спички на стальном стержне падают, а на медном стержне остаются в неизменном положении.

Учащиеся обычно пытаются объяснить наблюдаемое явление токами Фуко. Однако элементарные подсчеты, которые можно будет провести после изучения явления электромагнитной индукции, показывают, что токами Фуко нагревается сильнее медный стержень. В самом деле, при одинаковых геометрических размерах стержней в них индуктируются поля с одинаковыми э. д. с. Однако благодаря тому, что удельное сопротивление меди (0,0175) примерно в семь раз меньше удельного сопротивления стали (0,15), величина токов Фуко в меди должна быть в семь раз больше токов Фуко в стали. Пользуясь законом Джоуля-Ленца, показывают, что количество тепла, выделяемое в медном стержне токами Фуко, в семь раз больше, чем в стальном. Следовательно, токи Фуко не являются причиной наблюдаемого эффекта.

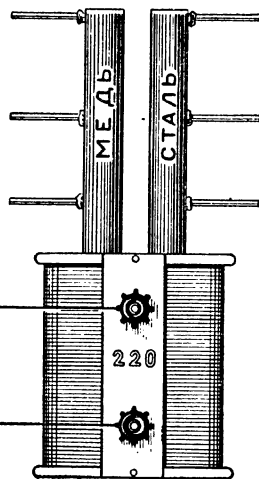


Рис. 196. Нагревание ферромагнетика при циклическом перемagnetивании

Главной причиной сильного нагрева ферромагнитного стержня являются необратимые процессы перемагничивания. Опыт особенно хорошо получается, если взять стержень из закаленной стали.

Расчеты, связанные с нагреванием стержней токами Фуко, могут быть предметом домашнего задания.

### Опыт 135. Демонстрация петли гистерезиса

Оборудование: образец ферромагнетика для испытаний, электронно-лучевая трубка с отклоняющей системой, выпрямитель, электронный осциллограф ЭО-7, универсальный трансформатор, батарея конденсаторов  $20—50\text{ нф}$ , реостат  $30—50\text{ ом}$ , реостат  $2000—5000\text{ ом}$

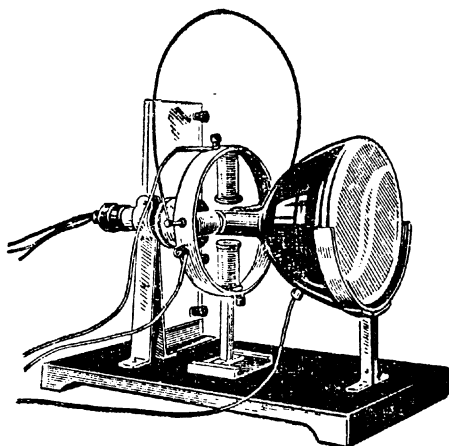


Рис. 197. Демонстрация петли гистерезиса на экране электронно-лучевой с магнитным отклонением луча

Собирают установку, изображенную на рисунке 197. Подав на катушки переменное напряжение из сети, добиваются, чтобы каждая пара катушек растягивала луч на  $8—10\text{ см}$ . Включив обе пары катушек, наблюдают светящуюся линию под углом  $45^\circ$  к горизонту. Вносят в горизонтальные катушки длинный изогнутый прут из закаленной стали и наблюдают на экране петлю гистерезиса.

Если петля, полученная на экране, велика и ее ветви уходят за экран, то уменьшают ток в катушках. Если на экране получится зеркальное изображение петли, меняют местами проводники у одной пары смещающих катушек.

Для наблюдения петли гистерезиса с помощью осциллографа собирают цепь, изображенную на рисунке 198.

Горизонтальную развертку осциллографа выключают. Включив осциллограф, наблюдают на его экране светящееся пятно. Подав на вертикальные пластины напряжение с сопротивления  $R_1$ , с помощью усилителя добиваются, чтобы светлое пятно растянулось в вертикальную прямую.

Объясняют учащимся, что отклонение электронного пучка по вертикали пропорционально  $H$ . Отключают вход осциллографа. Подав на горизонтальные пластины напряжение с конденсатора,

наблюдают на экране осциллографа горизонтальную полосу. Объясняют, что отклонение луча по горизонтали пропорционально индукции  $B$ . Включив оба входа осциллографа, регулируют величину сопротивлений  $R_1$  и  $R_2$  и усиление на входах, добиваясь нужного

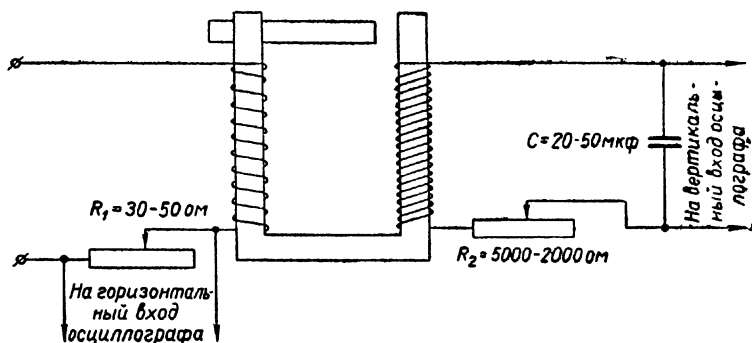


Рис. 198. Схема установки для демонстрации петли гистерезиса с помощью электронного осциллографа

масштаба изображения на экране осциллографа. Опыт лучше всего получается, когда в трансформаторе взяты катушки на 120 и 220 в.

### Опыт 136. Эффект Баркгаузена

**Оборудование:** ламповый усилитель или электронный осциллограф, сильный постоянный магнит, сердечник из никелевых проволочек, специальная катушка, постоянное сопротивление, кенотронный выпрямитель, динамик.

Намагничивание ферромагнетика происходит неоднородно. Особенно заметна неоднородность в процессе намагничивания на среднем участке кривой намагничивания, где намагниченность изменяется скачками.

Скачкообразное намагничивание ферромагнетика было открыто Баркгаузеном в 1919 г.

Для демонстрации скачков Баркгаузена специально изготовленную индикаторную катушку присоединяют на вход демонстрационного усилителя, нагруженного динамиком (рис. 199, а). Регулятор громкости ставят в такое положение, при котором в динамике не слышалось бы отдельных тресков или было бы их немного.

Подносят сверху к катушке сильный постоянный магнит и обращают внимание учащихся на то, что при этом в работе усилителя не происходит заметных изменений. Вставляют внутрь катушки сердечник из никелевых проволочек и повторяют опыт. При приближении магнита к индикаторной катушке слышатся отдельные трески и шумы, свидетельствующие о том, что намагничивание никеля происходит скачками. Скачкообразное намагничивание приводит к воз-

никновению значительных э. д. с. в катушке, которые, будучи усилены усилителем, и слышатся в динамике.

Вместо усилителя и динамика можно взять электронный осциллограф и наблюдать скачки Баркгаузена на экране (рис. 199, б).

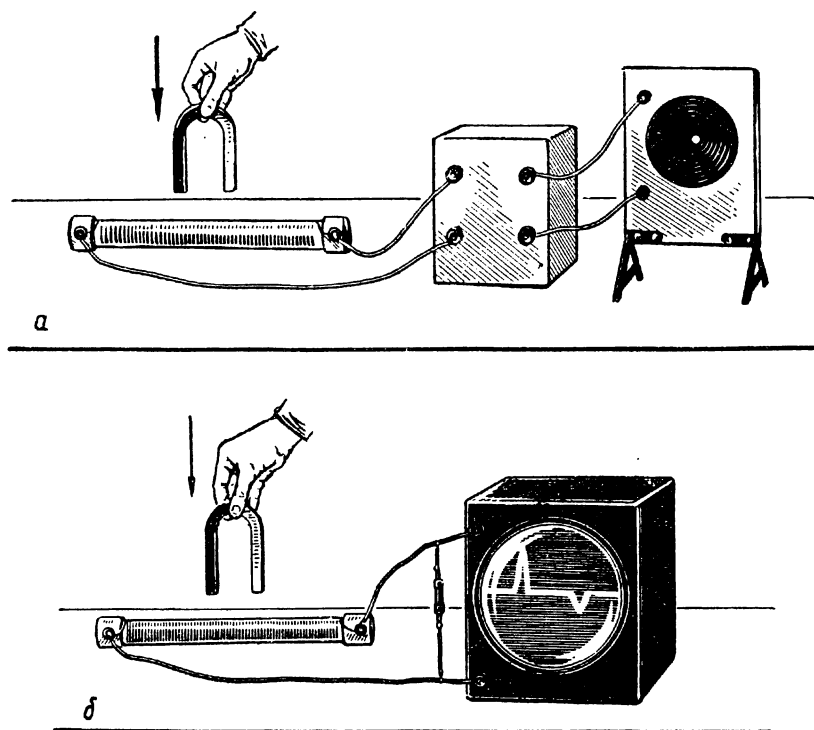


Рис. 199. Демонстрация скачков Баркгаузена:

а — 1-й вариант; б — 2-й вариант

В этом случае вход осциллографа необходимо зашунтировать постоянным сопротивлением  $R$ , величина которого должна быть близкой к величине сопротивления катушки.

### О п ы т 137. Процесс намагничивания ферромагнетика

**Оборудование:** эпидиаскоп или проекционный аппарат, фотографии или диапозитивы с изображением областей самопроизвольного намагничивания; таблица «Кривая первоначального намагничивания».

Демонстрация фигур Акулова — Биттера в настоящее время не может быть поставлена в средней школе. Поэтому при объяснении



природы ферромагнетизма демонстрируют в проекции фотографии или диапозитивы порошковых фигур, полученные в специальных лабораториях. Такие фотографии можно найти в книгах: К. П. Белов «Что такое магнетизм» (М., ГИТТЛ, 1956); Л. В. Киренский

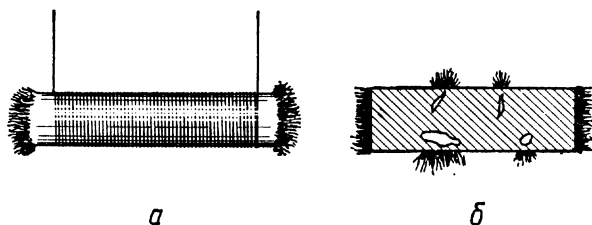


Рис. 200. Притяжение стальных опилок к местам с неоднородным магнитным полем:  
а — у полюсов; б — в местах, где однородность поля нарушена

«Ферромагнетизм и его применения» (М.—Л., АН СССР, 1959); К. П. Белов «Упругие тепловые и электрические явления в ферромагнетиках» (М., ГИТТЛ, 1957); Я. Б. Дорфман «Беседы о магнетизме» (М.—Л., АН СССР, 1950); Ф. Бозорт «Ферромагнетизм» (М., ИИЛ, 1956) и в ряде других книг.

Однако анализ фигур Акулова — Биттера будет доступен учащимся только после того, как они усвоят, что стальные опилки при-

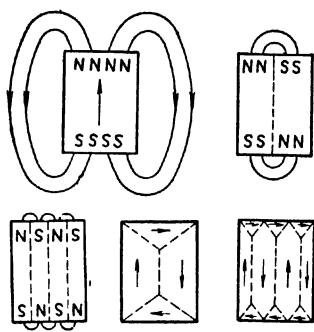


Рис. 201. К образованию доменов

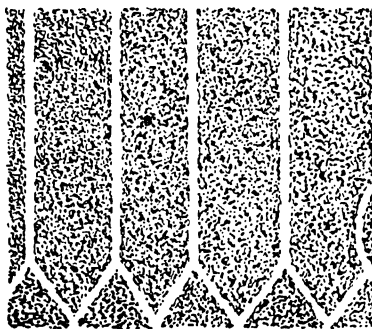


Рис. 202. Доменная структура

тягиваются в местах, где нарушена однородность магнитного поля. Поэтому перед тем, как рассматривать с учащимися порошковые фигуры, демонстрируют притяжение мелких стальных опилок полюсами заклеенной катушки, по которой проходит ток, и нейтральной областью магнита, когда в последнем имеется трещина или надрез (рис. 200).

После этого учащимся демонстрируют фотографии порошковых фигур на немагнитном образце. Рассматривая эти фигуры, приходят к выводу, что в ферромагнетике даже тогда, когда он не намагничен, имеются области самопроизвольного намагничивания — домены.

Затем, опираясь на знание учащимися принципа устойчивости тела (тело находится в устойчивом состоянии тогда, когда оно обладает наименьшей потенциальной энергией), рассматривают возможные формы доменов (рис. 201) и приходят к выводу, что наиболее вероятной формой домена должна быть форма, изображенная

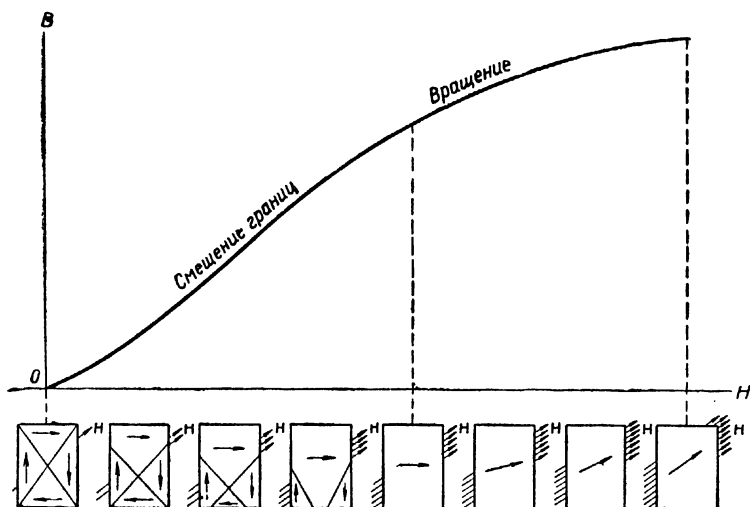


Рис. 203. Схема процесса намагничивания ферромагнетика

на рисунке 202, которая совпадает с действительно наблюдаемой.

Знание этого материала позволяет перейти к рассмотрению процесса намагничивания ферромагнетика, для чего пользуются схемой, изображенной на рисунке 203.

В заключение демонстрируют фотографии порошковых фигур, наблюдаемых на намагниченном образце.

### О п ы т 138. Магнитная цепь

**Оборудование:** два полосовых магнита, четыре стальные пластинки, стальная П-образная скоба, приспособление для крепления магнитов, набор грузов.

Магнитное поле широко используется в современной технике. Действие электромагнитов, электродвигателей, индукционных генераторов, трансформаторов, измерительных приборов основано на использовании магнитного поля. Применяя ферромагнитные ма-

териалы различной формы и размеров, можно не только создавать нужные магнитные поля, но и направлять их в требуемом направлении.

Совокупность тел, внутри которых проходит магнитное поле, называют магнитной цепью.

Понятие о последовательной магнитной цепи проще всего ввести при рассмотрении магнитного поля двух линейных магнитов с помощью рисунка. Выводы, сделанные при рассмотрении схемы магнитной цепи, проверяют на опыте.

Для этого магниты с помощью алюминиевого зажима укрепляют в штативе (рис. 204, а). К нижним полюсам магнитов подносят стальную пластину с крючком. Подвешивают к пластине грузы до тех пор, пока она не оторвется (рис. 204, а). Соединяют стальной

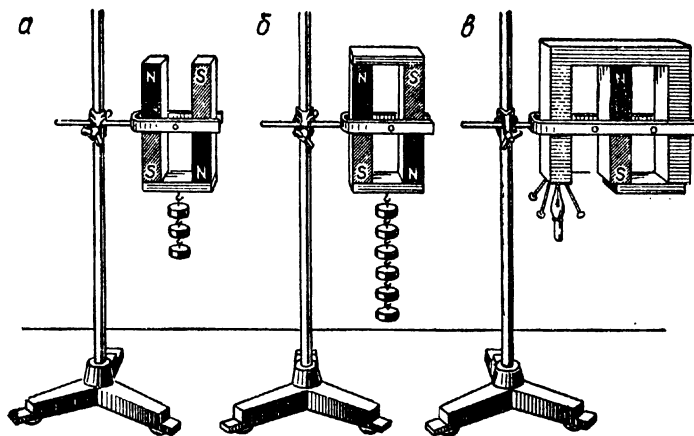


Рис. 204. Последовательная и разветвленная магнитная цепи

пластиной верхние полюсы магнитов (рис. 204, б) и повторяют опыт. Замечают, что во втором случае для отрыва нижней пластины нужна значительно большая сила.

Для демонстрации разветвления магнитного потока берут П-образную скобу (рис. 204, в) и, прикладывая к ней стальной якорь, показывают, что скоба не намагничена. После этого в среднюю часть скобы вставляют линейный магнит и, прикладывая якорь меньших размеров, демонстрируют разветвление магнитного потока.

### О п ы т 139. Магнитная экранировка

О б о р у д о в а н и е: проекционный аппарат с приспособлением для горизонтальной проекции, дуговой магнит, толстое стальное кольцо, тонкое стальное кольцо, стальные опилки, магнитная

стрелка на подвесе, обрезок толстой стальной трубы большого диаметра.

В технике часты случаи, когда приборы и аппараты необходимо защитить от воздействия внешних магнитных полей.

Опыт, посвященный выяснению принципа магнитной экранировки, полезно разбить на три отдельные демонстрации:

1) на конденсор проекционного фонаря устанавливают стекло, на которое в свою очередь устанавливают дугообразный магнит и толстое стальное кольцо. Покрыв магнит и кольцо вторым стеклом, демонстрируют в проекции спектр магнитного поля. Обращают внимание на то, что стальные опилки внутри кольца располагаются в беспорядке. Делают вывод, что внутри кольца нет магнитного поля;

2) массивное кольцо заменяют тонким кольцом, изготовленным из стальной фольги. Вновь демонстрируют спектр и замечают, что внутри кольца стальные опилки ориентированы.

Объясняют, что надежная экранировка будет только тогда, когда экран имеет достаточную толщину;

3) демонстрационную магнитную стрелку подвешивают на очень тонкой капроновой или шелковой нити на высоте 15—20 см от стола. В верхней части нити укреплена бумажная стрелка, расположенная вдоль демонстрационного стола. Издали подносят к стрелке магнит и наблюдают его действие на магнитную стрелку.

Помещают магнитную стрелку внутрь обрезка стальной трубы. Повторяя опыт, убеждаются, что магнит не действует на экранированную стрелку. Порядок демонстрации может быть иным.

#### **Опыт 140. Демонстрация учебного кинофильма «Электромагниты и их применения»**

Учащиеся знакомы со многими применениями электромагнитов, однако их знания различны по объему и не систематизированы. Для повторения и закрепления этих знаний целесообразно просмотреть учебный кинофильм «Электромагниты и их применение». Содержание фильма:

устройство электромагнита,  
электромагнитный подъемный кран,  
электромагнитный стол,  
электромагнитная сепарация,  
электромагнитное реле,

использование электромагнитных реле в технике.

Демонстрация фильма продолжается 20 мин.

### **§ 6. ДВИЖЕНИЕ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ**

Действующей программой не предусмотрено изучение движения заряженных частиц в магнитном поле. Однако без изучения этого материала нельзя понятно объяснить принцип устройства уско-

рителей заряженных частиц и получение изображений в телевизионных приемниках. Поэтому учитель обычно в какой-то мере объясняет этот материал учащимся. Описанные ниже демонстрации помогут изложить этот материал более доходчиво.

### О п ы т 141. Движение электронов в магнитном поле

**Оборудование:** универсальный выпрямитель, трубка с люминесцирующим экраном, постоянный магнит, соединительные проводники.

Трубку с экраном, люминесцирующим под ударами электронов, присоединяют к высоковольтному выпрямителю. Поднося к трубке постоянный магнит, наблюдают искривление траектории движения электронов (рис. 205). Меняя расстояние между пучком электронов и магнитом, убеждаются, что отклонение пучка обратно пропорционально расстоянию. Следовательно, сила, действующая на электроны, пропорциональна индукции поля  $B$ .

Меняя приложенное к трубке напряжение, убеждаются, что радиус кривизны тем меньше, чем меньше приложенное к трубке напряжение, и наоборот, — возрастает с увеличением приложенного напряжения. Так как величина приложенного напряжения определяет скорость движения электронов, то очевидно, что сила, с которой магнитное поле действует на движущиеся электроны, пропорциональна их скорости.

### О п ы т 142. Движение ионов в магнитном поле

**Оборудование:** катушка от универсального трансформатора, полюсный наконечник специальной формы, неглубокая прозрачная кювета, раствор медного купороса, медное кольцо, медный цилиндр, поплавки из пенопласта, источник постоянного тока, соединительные проводники.

Катушку 220 в от универсального трансформатора одевают на магнитопровод, на торец которого ставится полюсный наконечник. Диаметр полюсного наконечника должен быть 15—20 см. На полюсный наконечник ставят круглую неглубокую кювету диаметром 20—25 см, в которую наливают раствор медного купороса. В раствор опускают толстое медное кольцо, диаметр которого почти равен диаметру кюветы. В центр кюветы ставят небольшой медный цилиндр с клеммой.

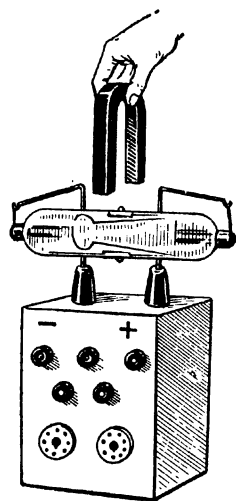


Рис. 205. Отклонение электронного пучка магнитным полем

На поверхность жидкости опускают поплавок из пенопласта или пробку, снабженную флажком. При прохождении тока через электролит и обмотку электромагнита (обмотку можно соединить последовательно с электролитом) ионы при своем движении отклоняются магнитным полем и вследствие трения приводят всю жидкость во вращательное движение, о котором судят по движению поплавка. Опыт хорошо удается при токе 4—5 а.

#### Опыт 143. Магнитная линза

**Оборудование:** электронно-лучевая трубка 18ЛК-2Б; высоковольтный выпрямитель, фокусирующая катушка, батарея аккумуляторов, реостат.

На горловину электронно-лучевой трубки 18ЛК-2Б одевают фокусирующую катушку или, как часто говорят, — магнитную линзу. Демонстрационная модель магнитной линзы представляет собой многослойную катушку, намотанную проводом 0,1 мм с эмалевой изоляцией. Длина катушки 60 мм, внутренний диаметр равен диаметру трубки, число витков 2000—3000. Включив питание электронно-лучевой трубки, наблюдают на экране трубки размытое светящееся пятно.

Подключив фокусирующую катушку к батарее аккумуляторов, подбирают при помощи реостата нужную величину тока, при которой все электроны попадают примерно на одну и ту же точку экрана.

#### Опыт 144. Электронно-лучевая трубка с магнитным управлением луча

**Оборудование:** то же, что и в предыдущем опыте, и, кроме того, демонстрационная модель отклоняющей системы.

Электронно-лучевую трубку 18ЛК-2Б (или любая другая трубка с магнитным управлением луча) с одетой магнитной линзой устанавливают на подставке и подключают к высоковольтному выпрямителю. Сфокусировав луч, на экране наблюдают светящееся пятно.

Подносят к трубке постоянный магнит и наблюдают отклонение электронного пучка магнитным полем. Заменяют магнит электромагнитом. Меняя постоянный ток, проходящий через обмотку электромагнита, замечают, что отклонение светлого пятна на экране трубки тем больше, чем больше ток катушки.

Отключив электромагнит от источника постоянного тока, пропускают через его обмотку переменный ток. Наблюдают на экране светящуюся полосу, длина которой зависит от величины проходящего тока. Установив около горловины трубки отклоняющую систему из четырех катушек, соединенных попарно, пропускают через каждую пару катушек переменный ток. Наблюдают, что одна

пара катушек отклоняет электронный пучок по горизонтали, другая — по вертикали, а обе вместе — под углом  $45^\circ$  к горизонту.

Из опыта делают вывод, что движением электронного пучка можно управлять с помощью магнитного поля.

#### **О п ы т 145. Демонстрация фрагмента из учебного кинофильма «Электронно-лучевая трубка»**

Для закрепления знаний учащихся о движении электронов в магнитном поле целесообразно показать фрагмент учебного кинофильма «Электронно-лучевая трубка», в котором показано устройство магнитной отклоняющей системы и движение электронов в магнитном поле. Демонстрация фрагмента продолжается 2 мин.

---

## ГЛАВА IX

### ЯВЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ

#### § 1. ПОНЯТИЕ ОБ ИНДУКТИРОВАННОМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ

Изучение явления электромагнитной индукции имеет исключительно большое значение для развития общенаучного и политехнического кругозора учащихся.

При изучении электромагнитной индукции обобщаются и развиваются представления учащихся об электрическом и магнитном полях. Необходимо на четко поставленных, выразительных опытах показать их взаимосвязь и взаимопревращение и тем самым создать первые представления о едином переменном электромагнитном поле<sup>1</sup>.

Изучение явления электромагнитной индукции с необходимостью приводит к заключению, что электрическое поле может возбуждаться не только электрическими зарядами, но и изменениями магнитного поля. Получаемое таким образом индуктированное электрическое поле отличается от электростатического и от стационарного электрического поля постоянного тока. Это отличие заключается в следующем:

1) индуктированное поле создается не электрическими зарядами, а изменением магнитного поля;

2) силовые линии электростатического и стационарного поля всегда разомкнуты; они начинаются и заканчиваются на зарядах. Силовые линии индуктированного поля замкнуты, а само поле имеет вихревой характер;

3) в случае электростатического и стационарного поля можно было указать истоки поля (заряды или пограничный слой между металлом и электролитом, контакт двух различных металлов); в случае индуктированного поля этого сделать нельзя: поле индуцируется во всех участках контура.

---

<sup>1</sup> Методика изучения явления электромагнитной индукции подробно и глубоко разработана В. Г. Глазыриным в его диссертации «Методика изучения электромагнитной индукции в средней школе», изд. АПН РСФСР, Институт методов обучения, 1956.



Эти отличия индуктированного электрического поля от электростатического и стационарного не могут быть непосредственно показаны на опыте, но они вытекают из всей совокупности опытов.

Поэтому в описанных ниже опытах основное внимание уделено трактовке наблюдаемых явлений, и этим они отличаются от аналогичных опытов, описанных в других руководствах.

## **§ 2. ВВОДНЫЕ ОПЫТЫ**

Учащиеся знакомы с явлением электромагнитной индукции из курса физики восьмилетней школы. Поэтому вводные опыты, с одной стороны, должны напомнить учащимся ранее изученный материал, а с другой, что более существенно, — подвести их к пониманию того, что при всяком изменении магнитного поля в области, охватываемой замкнутым контуром, в последнем возникает электрическое поле, вызывающее в контуре ток.

### **О п ы т 146. Получение индукционного тока при движении постоянного магнита относительно контура**

**О б о р у д о в а н и е:** демонстрационный гальванометр, катушка от универсального трансформатора, сильный полосовой магнит, соединительные проводники.

Катушку от универсального трансформатора, рассчитанную на 220 в, присоединяют к демонстрационному гальванометру. Вводя в катушку постоянный магнит, наблюдают отклонение стрелки гальванометра при движении магнита. Обращают внимание, что при неподвижном относительно катушки магните стрелка гальванометра остается в покое.

Видоизменяют опыт, оставляя магнит неподвижным, перемещают катушку и вновь наблюдают отклонение стрелки гальванометра. В заключение опыта катушку вращают вокруг магнита. Обращают внимание на то, что стрелка гальванометра не отклоняется.

Отклонение стрелки гальванометра свидетельствует о возникновении в катушке электрического тока. Но причиной электрического тока является электрическое поле. Следовательно, проделанный опыт свидетельствует о возникновении в катушке электрического поля.

Это поле называется наведенным или индуктированным, а само наблюдаемое явление — электромагнитной индукцией. Единственной переменной величиной в проделанных опытах является магнитное поле, поэтому естественно предположить, что причиной возникновения индуктированного электрического поля является изменение магнитного поля.

### **О п ы т 147. Получение индукционного тока при изменении магнитной индукции**

**О б о р у д о в а н и е:** универсальный трансформатор, реостат, батарея аккумуляторов, демонстрационный гальванометр.

Для проверки сделанного в предыдущем опыте предположения постоянный магнит заменяют электромагнитом, собранным из деталей универсального трансформатора. Электромагнит соединяют с источником постоянного тока через реостат (рис. 206). Меняя ток в катушке электромагнита, наблюдают возникновение индуцированного тока во второй катушке.

Обращают внимание учащихся на то, что в ходе опыта меняется только магнитная индукция поля и, следовательно, магнитный поток, охватываемый контуром. Таким образом, опыт подтверждает сделанное при обсуждении первого опыта предположение, что индуцированное электрическое поле в контуре возникает при изменении магнитного поля.

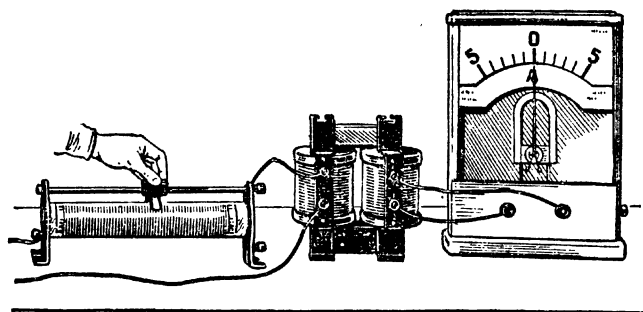


Рис. 206. Получение индукционного тока при изменении магнитной индукции

Оставляя постоянным ток в обмотке электромагнита, замыкают магнитную цепь якорем и наблюдают в момент замыкания возникновение индуцированного электрического тока. Аналогичное явление наблюдают при разрыве магнитной цепи и выдвигании сердечника из катушек.

#### **Опыт 148. Получение индукционного тока при изменении площади контура, находящегося в постоянном магнитном поле**

**Оборудование:** универсальный трансформатор, источник постоянного тока (60 в, 5 а), реостат (30 ом, 5 а), зеркальный или демонстрационный гальванометр, гибкий шнур длиной 4—5 м, соединительные проводники.

Из деталей универсального трансформатора собирают электромагнит, используя катушку 120 в с замкнутым сердечником. На свободный стержень магнитопровода навивают 6—8 витков гибкого шнура. Диаметр каждого витка делают 200—300 мм. Концы шнура присоединяют к гальванометру. Замкнув цепь, демонстрируют возникновение индукционного тока при замыкании цепи электромагнита. Увеличивая ток в катушке электромагнита, замечают возник-

новение незначительного тока в контуре, соединенном с гальванометром.

Быстро дергают за концы шнура так, чтобы диаметр витков сократился до 40—50 мм. Стрелка гальванометра при этом немного отклонится. Если при постановке опыта используют зеркальный гальванометр, отклонение светового зайчика будет значительным.

Обсуждая опыт, приходят к выводу, что и в этом случае возникновение индуцированного электрического поля произошло в результате изменения магнитного поля (изменился магнитный поток, пронизывающий контур, так как изменилась площадь контура).

На основании сделанных опытов делают вывод, что при всяком изменении магнитного поля, пронизывающего проводящий контур, в последнем возникает индуцированное электрическое поле, существующее в течение всего процесса изменения магнитного поля.

### § 3. ВЕЛИЧИНА Э. Д. С. ИНДУЦИРОВАННОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ

Возникающее индуцированное электрическое поле может быть охарактеризовано напряженностью (силовая характеристика) и э. д. с. (энергетическая характеристика).

Демонстрируя учащимся, как и от чего зависит э. д. с. индуцированного электрического поля, надо всячески подчеркивать, что э. д. с. — лишь характеристика поля. Если этого не делать, то учащиеся часто э. д. с. приписывают роль самого поля, что находит выражение в таких формулировках, как «э. д. с. вызывает ток», «э. д. с. действует на заряд» и т. д.

#### О п ы т 149. Величина э. д. с. индуцированного поля

О б о р у д о в а н и е: демонстрационный гальванометр, гибкий проводник длиной 4—5 м, универсальный трансформатор, реостат 30—40 ом, 2—4 а, источник постоянного тока, ключ.

Для выяснения причин, определяющих величину э. д. с. индуцированного поля, собирают установку, изображенную на рисунке 206. Меняя с различной скоростью ток в обмотке электромагнита, убеждаются, что величина э. д. с. прямо пропорциональна скорости изменения магнитного потока, пронизывающего катушку, в которой индуцируется электрическое поле.

К такому же выводу приходят, перемещая катушку с различной скоростью по отношению к электромагниту. Вывод записывают на классной доске следующим образом

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

Заменив катушку гибким проводником, замыкают цепь и наблюдают небольшое отклонение стрелки гальванометра. Затем из провода делают 2, 3, 4 и т. д. витков и замечают увеличение угла откло-

нения стрелки в соответствующее число раз. Следовательно, величина э. д. с. прямо пропорциональна числу витков. Результат записывают на доске:

$$E \sim n.$$

Объединяя результаты наблюдений, получают

$$E \sim n \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$

или, переходя к знаку равенства,

$$E = kn \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}.$$

Если все величины, входящие в эту формулу, выражать в какой-либо одной системе, то  $k = 1$ . Поэтому в системе МКСА:

$$E = n \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}.$$

#### § 4. ЗАКОН ЛЕНЦА

Закон Ленца вытекает из закона сохранения энергии: индукционные токи производят определенную работу. Следовательно, при движении замкнутого контура в магнитном поле должна производиться определенная работа. Эта работа идет на преодоление сил взаимодействия индукционного тока с магнитным полем, которые направлены в сторону, противоположную движению.

Справедливость закона Ленца может быть показана с помощью нескольких демонстраций. Ниже описаны три взаимно дополняющие друг друга демонстрации, постановка которых вполне доступна для средней школы.

#### О п ы т 150. Демонстрация справедливости закона Ленца с помощью прибора Петровского

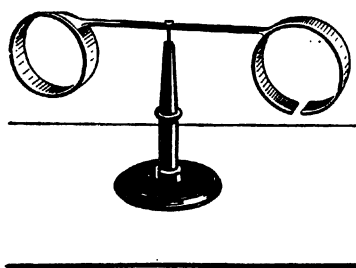


Рис. 207. Опыт с прибором Петровского

**Оборудование:** прибор Петровского, сильный полосовой магнит.

Поставив на подставку прибор Петровского, быстро вдвигают в сплошное кольцо (рис. 207) постоянный магнит. Кольцо отталкивается от магнита. Придержав кольцо рукой, вставляют в него магнит. Быстро вынимают магнит и замечают притяжение кольца к магниту.

Повторяют опыт с разрезанным кольцом и убеждаются, что кольцо не реагирует на движение магнита.

**Опыт 151. Демонстрация справедливости закона Ленца с помощью алюминиевого кольца и электромагнита**

**Оборудование:** катушка от универсального трансформатора, алюминиевое кольцо, стальной стержень диаметром 30—35 мм, длиной 25—30 см, источник постоянного тока, реостат 20—30 ом, 2—4 а, нитки, штатив, ключ.

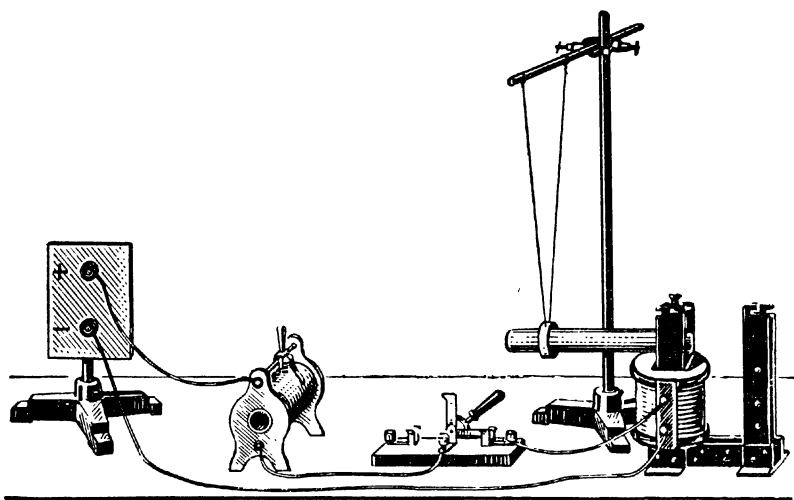


Рис. 208. Демонстрация, подтверждающая справедливость закона Ленца

В катушку от универсального трансформатора, рассчитанную на 220 в, вставляют стальной сердечник длиной 25—30 см, диаметром 30—35 мм. Сердечник имеет упор, не позволяющий ему втягиваться внутрь катушки при включении тока.

На сердечник одевают легкое, алюминиевое кольцо диаметром 5—8 см, подвешенное на бифилярном подвесе длиной 100—150 см так, что при своих колебаниях оно не задевает стальной сердечник (рис. 208). Катушку через реостат подключают к источнику постоянного тока напряжением 20—30 в.

При замыкании цепи и увеличении в ней тока наблюдают отталкивание кольца от катушки, а при уменьшении тока и размыкании цепи — притяжение.

## Опыт 152. Демонстрация справедливости закона Ленца с помощью магнита, катушки и гальванометра

**Оборудование:** постоянный магнит, противовес к магниту, блок, демонстрационный гальванометр, реостат, батарея аккумуляторов, трехполосный переключатель, штатив.

Катушку от универсального трансформатора устанавливают вертикально, а над ней с помощью неподвижного блока и штатива подвешивают магнит из высококоэрцитивного сплава, уравновешенный противовесом.

Катушка с помощью трехполосного рубильника может подключаться либо к гальванометру, либо через гальванометр к источнику постоянного тока.

Принципиальная схема установки показана на рисунке 209, а монтажная на рисунке 210.

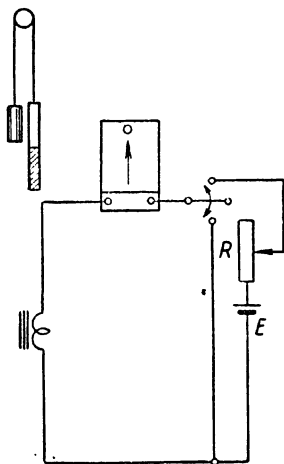


Рис. 209. Принципиальная схема установки для демонстрации закона Ленца

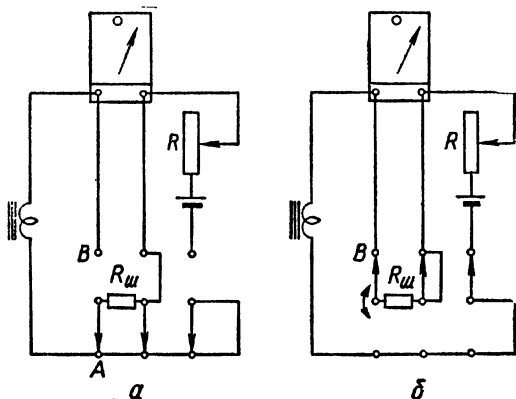


Рис. 210. Монтажная схема установки для демонстрации закона Ленца:

а — первая стадия опыта; б — вторая стадия

Переключив рубильник в положение А (рис. 210, а), опускают магнит в катушку и наблюдают отклонение стрелки гальванометра. Индуцированный ток в катушке имел такое направление, что противодействовал движению магнита. Для демонстрации этого рубильник переключают в положение В (рис. 210, б) и наблюдают выталкивание магнита из катушки при направлении тока в ней, совпадающего с индукционным. (В этом случае гальванометр шунтируется сопротивлением  $R_{ш}$ .)

Направление и величина тока, а также сопротивление шунта должны быть подобраны заранее такими, чтобы стрелка гальвано-

метра отклонялась в ту же сторону, что и при прохождении индукционного тока, и не выходила за пределы шкалы.

Вытягивая магнит из катушки, наблюдают индукционный ток противоположного направления.

Переменяя местами провода, подходящие к батарее аккумуляторов, наблюдают втягивание магнита в катушку.

Делают вывод, что индукционный ток всегда возникает такого направления, что его магнитное поле противодействует причине, его вызвавшей.

## § 5. ЯВЛЕНИЕ САМОИНДУКЦИИ

Цель описанных ниже опытов — показать, что при всяком изменении тока в цепи в ней возникает индуктированное электрическое поле, противодействующее изменению тока.

### О п ы т 153. Самоиндукция при замыкании цепи

О б о р у д о в а н и е: катушка 220 в от универсального трансформатора, реостат (30 ом, 5 а), батарея аккумуляторов с э. д. с. 4—5 в, ключ, соединительные проводники, две лампочки от карманного фонаря, амперметр демонстрационный, катушка с очень большой индуктивностью.

I. Собирают цепь, схема которой показана на рисунке 211, а. В качестве индуктивности используют катушки с очень большой индуктивностью.

Замкнув цепь, наблюдают, как медленно растет ток в цепи. Проходит почти полминуты, пока прекратится движение стрелки по шкале.

Объясняют, что причиной наблюдаемого явления является изменение магнитного поля вокруг проводников, в результате чего в них возникает индуктированное электрическое поле, препятствующее электрическому полю источника. В результате ток в цепи устанавливается не мгновенно.

Демонстрация опыта производит очень сильное впечатление на учащихся, так как до этого все электрические явления происходили почти мгновенно и в их сознании электрические явления связывались с чем-то быстротечным.

Опыт подводит учащихся к чрезвычайно важному выводу: процесс самоиндукции проявляется как своеобразная инертность тока и магнитного поля.

II. Собирают цепь, схема которой показана на рисунке 211, б. В качестве индуктивности используют катушку 220 в от универсального трансформатора.

Замыкая цепь, наблюдают, что лампа, включенная последовательно с катушкой, загорается несколько позже лампочки, включенной последовательно с реостатом. Обращают внимание учащихся

на факт одинакового свечения лампочек в установившемся режиме, что свидетельствует о равенстве сопротивлений катушек и реостата.

Объясняют, что причиной наблюдаемого явления является изменение магнитного поля вокруг проводников, в результате чего в них возникает индуцированное электрическое поле, препятствующее возрастанию тока.

Так как величина э. д. с. при прочих равных условиях зависит от числа витков, то в катушке, имеющей большее число витков, чем в реостате, возникает большая э. д. с., которая и препятствует нарастанию тока в этой ветви.

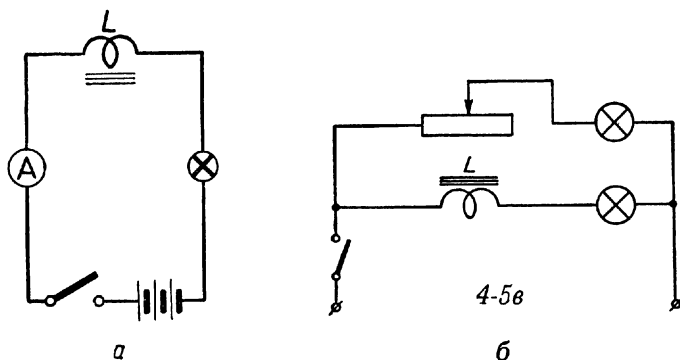


Рис. 211. Схемѣ опыта явления самоиндукции при замыкании цепи

Сообщают, что наблюдаемое явление называется самоиндукцией, а э. д. с. индуцированного таким образом поля — э. д. с. самоиндукции.

#### О п ы т 154. Осциллограмма нарастания тока в цепи с катушкой

**Оборудование:** электронный осциллограф, универсальный трансформатор, лампочка от карманного фонаря, демонстрационный ключ, реле РП-4 (или звонок), батарея аккумуляторов 5-НКН-10, селеновая шайба или диод типа ДГЦ-27, реостат 30—40 ом.

Для демонстрации характера нарастания тока при замыкании цепи с индуктивностью собирают цепь (рис. 212). Полупроводниковый диод исключает попадание на вход осциллографа э. д. с. самоиндукции при размыкании. Параллельно лампочке подключают вход электронного осциллографа. Установив частоту развертки 7—30 гц, замыкают и размыкают при помощи ключа цепь. На экране осциллографа при этом наблюдают неустойчивые осциллограммы нарастания тока (рис. 213, а).

Чтобы получить устойчивые осциллограммы, заменяют рубильник электрическим звонком или лучше поляризованным реле РП-4 (рис. 214). Подбрав частоту развертки осциллографа равной частоте



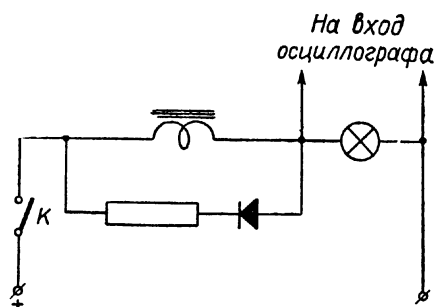


Рис. 212. Схема установки для наблюдения осциллограммы нарастания тока в цепи с индуктивностью

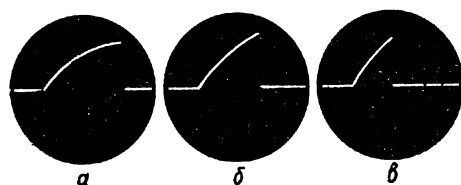


Рис. 213. Осциллограммы, иллюстрирующие влияние индуктивности на скорость нарастания тока в цепи

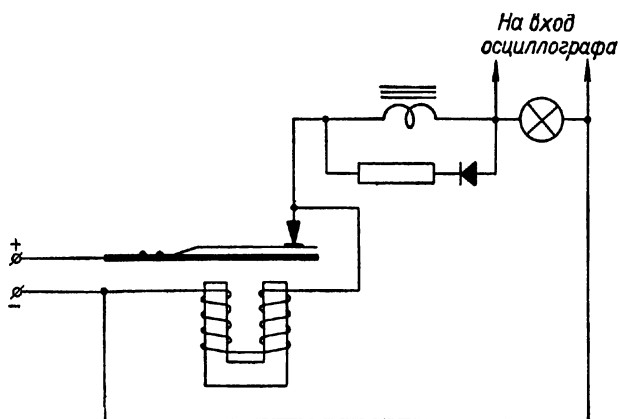


Рис. 214. Схема установки для наблюдения устойчивых осциллограмм тока при замыкании цепи с катушкой

те колебаний молотка звонка или якоря реле, наблюдают устойчивую осциллограмму нарастания тока в цепи с индуктивностью. Сняв якорь с магнитопровода трансформатора, замечают, что нарастание тока в цепи происходит быстрее (см. рис. 213, б, в).

### О п ы т 155. Самоиндукция при размыкании цепи

**О б о р у д о в а н и е:** универсальный трансформатор, катушка с очень большой индуктивностью, неоновая лампа, батарея аккумуляторов 5-НКН-10, двойной ключ, соединительные проводники, демонстрационный ключ.

I. Собирают цепь, изображенную на рисунке 215. Эта цепь отличается от цепи, собиравшейся в опыте 153, только тем, что здесь использован двойной ключ, позволяющий отключать источник от цепи без размыкания цепи. Это достигается тем, что промежуток между неподвижными контактами несколько уже ширины подвижного контакта. Поэтому при передвижении подвижного контакта из положения 1 в положение 2 цепь не размыкается, а источник отключается от цепи.

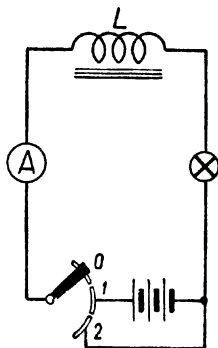


Рис. 215. Определение направления тока самоиндукции при размыкании цепи

Замкнув цепь, наблюдают медленный рост тока в цепи. После того как ток достигнет максимального значения, передвигают подвижный контакт в положение 2 и наблюдают медленное убывание тока в цепи: стрелка идет до нулевого деления почти полминуты.

Обращают внимание учащихся на то, что индуктированное электрическое поле самоиндукции противодействует причине его вызвавшей—убыванию основного поля (поля источника).

II. Катушку от универсального трансформатора, одетую на магнитопровод, подключают параллельно с неоновой лампочкой к источнику тока напряжением 5—6 в. Порог зажигания лампочки должен быть около 100—120 в. При размыкании цепи наблюдают яркую вспышку лампочки.

В случае применения неоновой лампочки с тарельчатыми (дисковыми) электродами ее необходимо включить так, чтобы ток самоиндукции вызывал свечение газа около электрода, обращенного к классу.

### О п ы т 156. Осциллограмма э. д. с. самоиндукции при размыкании цепи

**О б о р у д о в а н и е:** универсальный трансформатор, демонстрационный ключ, батарея аккумуляторов 3-НКН-10, электронный осциллограф, соединительные проводники.

Для наблюдения осциллограммы э. д. с. самоиндукции при размыкании цепи собирают цепь по рисунку 216. В качестве автоматического ключа можно использовать звонок или, что значительно лучше, поляризованное реле РП-4. Подобрав частоту развертки осциллографа, наблюдают устойчивую осциллограмму э. д. с. самоиндукции при размыкании цепи.

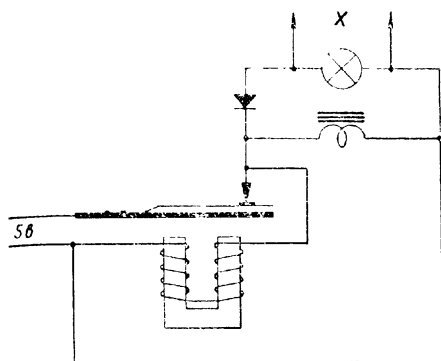


Рис. 216. Принципиальная схема установки для определения направления индукционного тока

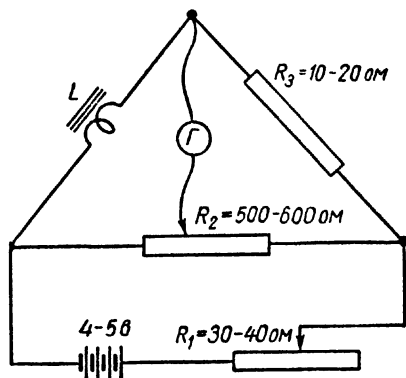


Рис. 217. Схема цепи для выяснения характера изменения тока при размыкании цепи

### Опыт 157. Явление самоиндукции при изменении тока в цепи

**Оборудование:** универсальный трансформатор, два низкоомных реостата (30 ом, 5 а), реостат на 500—600 ом, батарея аккумуляторов 3-НКН-10, демонстрационный гальванометр, соединительные проводники, ключ.

Для демонстрации явления самоиндукции при увеличении и уменьшении тока в цепи собирают мостовую схему (рис. 217), в которой в качестве индуктивности использована катушка от универсального трансформатора.

Замыкают цепь, уравнивают мостик. Размыкая цепь, наблюдают отклонение стрелки гальванометра, допустим, вправо, тогда при замыкании цепи стрелка отклонится влево. Объясняют, что при замыкании и размыкании цепи вследствие появления индукционного электрического поля равновесие мостика нарушается и в результате этого стрелка гальванометра отклоняется.

Меняют величину тока в цепи и наблюдают отклонение стрелки гальванометра при увеличении тока влево, а при уменьшении — вправо.

На основании проведенных опытов делают вывод, что при любых изменениях тока в цепи в ней возникает индукционное электрическое поле, препятствующее этим изменениям тока.

## Опыт 158. Величина э. д. с. самоиндукции

**Оборудование:** гальванометр демонстрационный, гибкий шнур длиной 8—10 м, реостат 30—40 ом (2—3 а), реостат высокоомный, реостат 10—20 ом, ключ, батарея аккумуляторов, парамагнитная жидкость.

Цель опыта — показать, что э. д. с. самоиндукции зависит от быстроты (скорости) изменения тока в цепи и от индуктивности проводника. Опыт распадается на следующие демонстрации.

1. Для демонстрации зависимости э. д. с. самоиндукции от скорости изменения тока в цепи собирают мостиковую цепь, описанную в предыдущем опыте. Медленно изменяя ток в цепи, наблюдают незначительное отклонение стрелки гальванометра. Изменяя быстрее ток в цепи, наблюдают большее отклонение стрелки гальванометра. Наконец, размыкают цепь и наблюдают сильный бросок стрелки гальванометра. На основании опыта делают вывод, что э. д. с. самоиндукции пропорциональна скорости изменения тока в цепи:

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

2. Чтобы показать зависимость э. д. с. самоиндукции от индуктивности проводника, заменяют катушку длинным гибким проводником, сложенным в виде петли на столе. Включив ток, уравнивают плечи моста.

Разомкнув цепь, наблюдают незначительное отклонение стрелки гальванометра. Навивают гибкий проводник на каркас и вновь включают в то же плечо моста. Размыкая цепь, наблюдают большее отклонение стрелки гальванометра. Опуская катушки в парамагнитную жидкость, замечают еще большее отклонение стрелки гальванометра при замыкании и размыкании цепи.

Делают вывод, что э. д. с. самоиндукции зависит от свойств проводника и окружающей проводник среды

$$E \sim L.$$

Объединяя результаты обоих опытов, приходят к выводу, что величина э. д. с. самоиндукции в цепи

$$E \sim L \frac{\Delta I}{\Delta t}.$$

Переходя к знаку равенства, записывают

$$E = kL \frac{\Delta I}{\Delta t}.$$

Коэффициент пропорциональности  $k$ , зависит от выбора единиц, для измерения величины  $E$ ,  $L$ ,  $I$  и  $t$  при пользовании одной системой равен единице, поэтому

$$E = -L \frac{\Delta I}{\Delta t}.$$

Появление знака «минус» объясняется тем, что индуцированное электрическое поле противодействует изменению тока в цепи (закон Ленца).

После того как установлены причины, определяющие величину э. д. с. самоиндукции, переходят к выяснению физического смысла величины  $L$ , характеризующей свойства проводника и окружающей проводник среды.

Проделанные опыты свидетельствуют о том, что индуктивность проводника зависит от длины и формы проводника и от магнитных свойств окружающей проводник среды.

### О п ы т 159. Энергия магнитного поля катушки

О б о р у д о в а н и е: универсальный трансформатор, демонстрационный амперметр, лампочка от карманного фонаря, батарея аккумуляторов, низкоомный реостат, демонстрационный ключ, электронный осциллограф.

Цель опыта — показать, что магнитное поле катушки обладает энергией, и выяснить, от каких величин зависит энергия магнитного поля катушки.

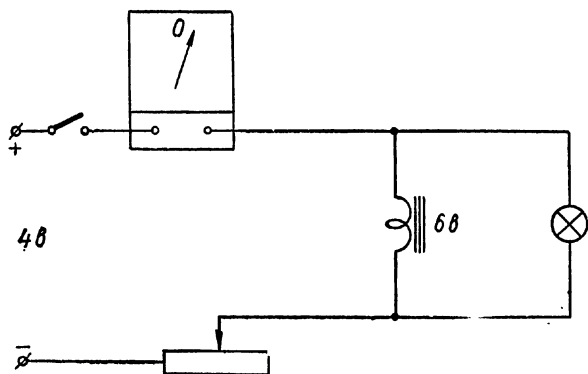


Рис. 218. К установлению зависимости энергии магнитного поля от индуктивности и величины тока

Катушку 6 в универсального трансформатора и лампочку от карманного фонаря подключают параллельно к батарее аккумуляторов. Для регулирования тока в цепь включен реостат, а для измерения тока — демонстрационный амперметр (рис. 218).

С помощью реостата устанавливают ток такой величины, при котором лампочка еще не светится. Размыкая цепь, наблюдают яркую вспышку лампочки, которая происходит за счет тока самоин-

дукции. Опыт свидетельствует о том, что магнитное поле обладает энергией.

Вынимая сердечник из катушки, повторяют опыт и наблюдают менее яркие вспышки лампочки. Делают вывод, что энергия магнитного поля зависит от индуктивности проводника

$$W_m \sim L.$$

Оставляя индуктивность проводника максимальной, уменьшают ток, проходящий через катушку. Размыкая цепь, наблюдают, что с уменьшением тока уменьшается и яркость вспышек. Следовательно, энергия магнитного поля зависит от величины проходящего тока

$$W_m \sim I.$$

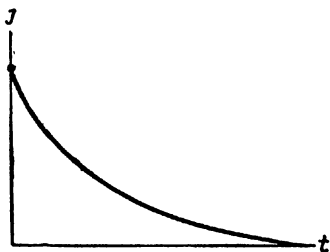


Рис. 219. График изменения тока при размыкании

Для выяснения характера изменения тока, проходящего через лампочку, параллельно ей подключают вход электронного осциллографа, заменив ключ электрическим звонком или, что значительно лучше, поляризованным реле (рис. 216). Подбрав частоту развертки осциллографа равной частоте замыканий цепи, наблю-

дают осциллограмму тока при размыкании цепи с индуктивностью.

Анализ осциллограммы дает возможность вывести формулу энергии магнитного поля катушки, которая подсчитывается через работу тока

$$W_m = A = I_{cp} E \Delta t.$$

Но величина э. д. с. самоиндукции может быть подсчитана по формуле

$$E = - L \frac{\Delta I}{\Delta t}.$$

Так как при размыкании цепи ток изменяется от величины  $I$  до 0 (рис. 219), то  $\Delta I = I$ .

Следовательно,

$$W_m = L \frac{I}{\Delta t} \cdot I_{cp} \cdot \Delta t = L \cdot I \cdot I_{cp}.$$

За среднее значение тока можно взять  $\frac{I}{2}$ . Тогда  $W_m = \frac{LI^2}{2}$ . Несмотря на некоторую некорректность допущения, что  $I_{cp} = \frac{I}{2}$ , полученная формула является точной.

## Опыт 160. Дугогасящие устройства

**Оборудование:** универсальный трансформатор, батарея конденсаторов, низкоомный реостат, батарея аккумуляторов, специальный демонстрационный рубильник.

При размыкании цепей, содержащих большие индуктивности, в них индуцируются сильные электрические поля, вызывающие в месте разрыва электрическую дугу. Электрическая дуга выводит из строя контакты размыкающего устройства и поэтому нежелательна.

Для предохранения контактов от разрушения применяют различные дугогасящие устройства. Наиболее простым способом гашения дуги является подключение параллельно контактам конден-

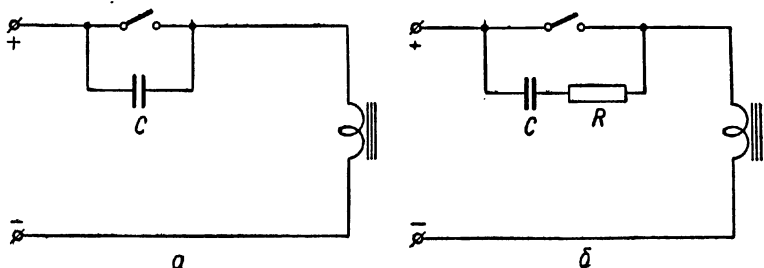


Рис. 220. Схема простейшего дугогасительного устройства

сатора емкостью  $0,1\text{--}2\text{ мкф}$  (рис. 220, а). В этом случае при размыкании цепи токи самоиндукции заряжают конденсатор, в результате чего интенсивность дуги уменьшается.

Недостатком описанного устройства является то обстоятельство, что при замыкании цепи конденсатор заряжается до напряжения источника, и поэтому в момент размыкания, разряжаясь через контакты, постепенно выводит их из строя. Для устранения этого недостатка последовательно с конденсатором включают сопротивление  $R = 50\text{--}100\text{ ом}$  (рис. 220, б).

Для демонстрации работы искрящего устройства собирают цепь с большой индуктивностью. Контакты специально изготовленного для этой демонстрации рубильника с помощью проекционного аппарата проектируют на экран. После этого замыкают цепь и через  $10\text{--}15\text{ сек}$  медленно размыкают. При этом наблюдают большую дугу и заметное разрушение поверхности контакта.

Повернув нож рубильника противоположной стороной, подключают параллельно контакту батарею конденсаторов и повторяют опыт. Наблюдают на экране менее сильную искру и неразрушенную поверхность контакта.

Для того чтобы у учащихся не оставалось сомнений в одинаковых качествах первого и второго контактов, повторяют опыт с от-

ключенной батареей конденсаторов и вновь наблюдают оплавление контактов.

Опыт требует тщательного подбора емкости, тока и индуктивности перед уроком. Для ориентировки укажем данные одного из успешно проделанных опытов. В качестве индуктивности использовался универсальный трансформатор, катушки которого 120 и 220 в соединялись параллельно;  $I = 4-5$  а;  $C = 1,0$  мкф; толщина алюминиевого ножа — 0,1 мм, сопротивление  $R = 60$  ом.

В последнее время в качестве дугогасящих устройств стали использовать нелинейные сопротивления, величина которых уменьшается с увеличением приложенного напряжения. Такими свойствами обладает неоновая лампочка, сопротивления из тирита, вилита, карборунда и некоторых других материалов.

Для демонстрации принципа устройства таких дугогасящих устройств в предыдущей установке параллельно контактам подключают неоновую лампочку, порог зажигания которой выше напряжения сети и меньше 270—300 в (порог образования дуги). В момент размыкания цепи лампочка ярко вспыхивает, а контакты не оплавляются.

## § 6. ВИХРЕВОЙ ХАРАКТЕР ИНДУКТИРОВАННОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ

Вихревой характер индуцированного электрического поля может быть экспериментально подтвержден на примере индукции в сплошных телах, поэтому в настоящий параграф включен опыт по наблюдению индукции в таких телах.

Для успешной демонстрации описанных ниже опытов желательно использовать мощный электромагнит, если в кабинете нет такого электромагнита, его можно заменить электромагнитом, собранным из деталей универсального трансформатора. Однако в этом случае опыты будут проходить хуже.

### Опыт 161. Индукционные токи в массивных проводниках

**Оборудование:** универсальный трансформатор, батарея аккумуляторов, легкоподвижный алюминиевый маятник, источник переменного тока.

Цель опыта — показать, что в массивных проводниках, находящихся в изменяющемся магнитном поле, возникают индукционные токи.

1. Из универсального трансформатора собирают электромагнит с полюсными наконечниками. С помощью стойки в воздушном зазоре электромагнита укрепляют сплошной алюминиевый маятник (рис. 221).

Отводят маятник на угол  $90^\circ$  и дают возможность свободно качаться. Считают число полных колебаний маятника до остановки.



Подключают электромагнит к аккумуляторной батарее и вновь дают возможность маятнику качаться. Считают число колебаний маятника и замечают, что маятник остановился значительно быстрее.

Торможение маятника во втором случае объясняют возникновением в нем индукционных токов, которые (в полном согласии с законом Ленца) препятствуют причине, их вызывающей, — качаниям маятника.

Заменяют сплошной маятник разрезанным и вновь повторяют опыт. Тормозящее действие индукционных токов во втором случае значительно меньше. Следовательно, в несплошных телах индукционные токи слабее.

### Опыт 162. Принцип работы магнитного тахометра

**Оборудование:** центробежная машина, алюминиевый цилиндр на оси, дугообразный демонстрационный магнит.

Магнитные тахометры находят в последнее время все более широкое применение в технике. Ознакомление учащихся с принципом их устройства не только расширяет их политехнический кругозор, но и закрепляет ранее изученный материал об индукции в сплошных телах и законе Ленца.

Для демонстрации принципа работы магнитного тахометра собирают установку, изображенную на рисунке 222. Вращая магнит, наблюдают вращение полого алюминиевого цилиндра.

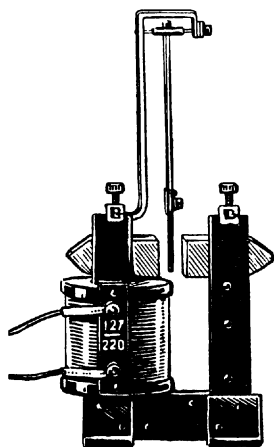


Рис. 221. Маятник Вольстенгофена

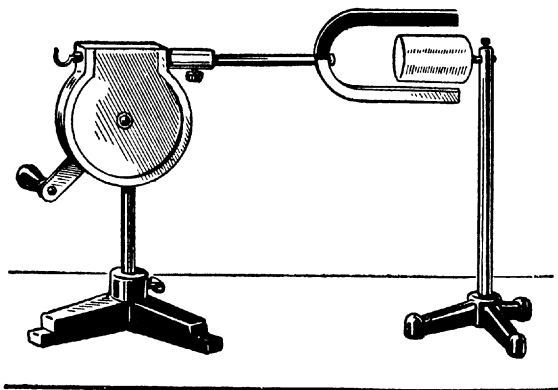


Рис. 222. Модель магнитного тахометра

### Опыт 163. Вихревой характер индуцированного электрического поля

**Оборудование:** универсальный трансформатор, два разрезанных диска, медное кольцо, источник переменного тока, воск.

Существенным отличием индуцированного поля от поля электростатического и стационарного поля постоянного тока является его вихревой характер. Цель описанных ниже опытов — показать вихревой характер индуцированного электрического поля.

Из универсального трансформатора собирают электромагнит, для чего обмотки катушек 120 и 220 в соединяют параллельно и включают в сеть переменного тока напряжением 120 в. Электромагнит снабжен полюсными наконечниками. В пространстве между

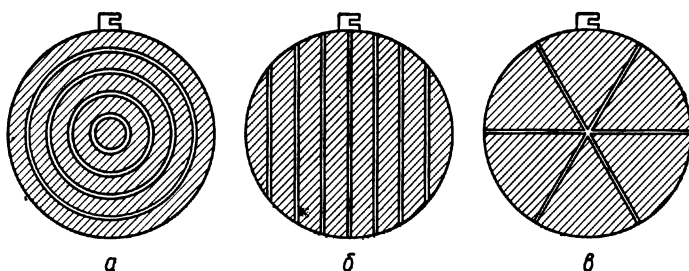


Рис. 223. Диски для демонстрации вихревого характера индуцированного электрического поля

полюсными наконечниками вносят сплошной медный диск, покрытый воском. Включают цепь и наблюдают плавление воска на диске. Опыт по существу знаком учащимся и ставится как вводный для постановки вопроса о структуре индукционного электрического поля в проводнике.

После того как учащиеся объясняют проделанный опыт, перед классом ставят вопрос о том, что надо сделать, чтобы в диске не возникали индукционные токи. Учащиеся обычно отвечают, что необходимо диск разрезать. В межполюсное пространство электромагнита вносят диск, разрезанный на ряд concentric колец (рис. 223, а; кольца укреплены на асбошифере), включают цепь и замечают плавление воска, которым покрыты кольца. После этого в межполюсное пространство электромагнита вносят диск, разрезанный, как показано на рисунке 223, б, и, включив ток, не наблюдают быстрого нагревания полосок диска. Повторяют опыт с диском, разрезанным на секторы (рис. 223, в).

Опыты дают основание для вывода о вихревом характере индукционного электрического поля.

## Опыт 164. Возникновение переменного магнитного поля при изменении электрического поля

**Оборудование:** звуковой генератор, электронный осциллограф, демонстрационный плоский конденсатор, специальный торойд, изолирующий штатив.

Одно из фундаментальных положений теории Максвелла заключается в том, что всякое изменение электрического поля сопровождается появлением вихревого магнитного поля. В литературе нет описания достаточно простого и наглядного опыта, демонстрирующего это положение.

Используя современное оборудование и новые материалы, можно поставить опыт, иллюстрирующий это фундаментальное положение физики.

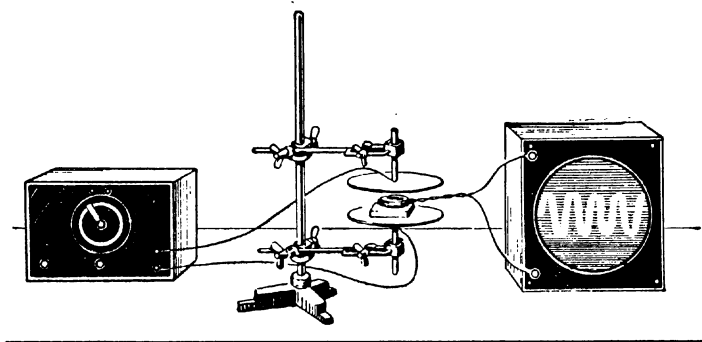


Рис. 224. Возникновение переменного магнитного поля при изменении электрического поля

К звуковому генератору (рис. 224) присоединяют плоский конденсатор с пластинами в виде дисков диаметром 250—300 мм. Расстояние между пластинами может меняться. Между пластинами, не касаясь их, помещают торойд из феррита или пермолоя диаметром 50—60 мм с площадью поперечного сечения 0,5—1 см<sup>2</sup>. На торойд намотано 200—300 витков проволоки ПЭШО сечением 0,1 мм<sup>2</sup>. От середины обмотки сделан отвод. Концы обмотки присоединяют на вход демонстрационного электронного осциллографа.

Установив частоту 2—3 кГц, включают звуковой генератор и на экране осциллографа наблюдают, что в обмотке торойда индуцируется переменный ток.

Меняя частоту генератора, замечают, что меняется и частота индуцируемого переменного тока. Одновременно замечают, что с увеличением частоты возрастают и амплитудные значения индуцируемого переменного тока, а с уменьшением — снижаются.

Поворачивая торойд вокруг горизонтальной оси, отмечают уменьшение амплитуды индуцируемого тока.

Подключив на вход половину витков катушки, замечают уменьшение амплитуды индуцируемого тока примерно вдвое.

При замене материала магнитопровода пластмассой или деревом наблюдают очень резкое изменение амплитуды осциллограммы.

Опыту может быть дано только одно объяснение: возникающее между пластинами конденсатора переменное магнитное поле индуцирует в катушке торойда переменный ток.

Опыт исключительно нагляден, хорошо воспринимается учащимися и весьма просто иллюстрирует одно из основных положений физики.

Следует, однако, отметить, что ряд методистов считает подобную трактовку опыта неправильной и склонны приписать наблюдаемый эффект электростатическим наводкам.

---

## ГЛАВА X

### ПЕРЕМЕННЫЙ ТОК

#### § 1. ОБЩИЕ ЗАМЕЧАНИЯ

В процессе изучения переменного тока происходит дальнейшее развитие представлений учащихся об электромагнитном поле. Изучая свойства переменного тока, учащиеся впервые встречаются с электромагнитными колебаниями, пульсирующим, бегущим и вращающимся полями и т. п.

В теме «Переменный ток» изучаются только токи промышленной частоты, которые могут рассматриваться как квазистационарные токи, ибо основным условием квазистационарности является достаточная медленность изменений поля.

Для объяснения ряда трудных явлений, таких, как фазовые соотношения, удобно рассматривать переменный ток на основе учения о колебаниях. Методику подобного изложения материала разработал А. А. Пинский<sup>1</sup>. Указанный подход к изучению переменного тока не только облегчит изучение ряда трудных вопросов, но и незаметно подготовит учащихся к изучению быстропеременных электромагнитных полей. Описанные ниже опыты по своему расположению соответствуют такому подходу к изучению переменного тока.

Для постановки ряда опытов необходим генератор переменного тока регулируемой частоты. В качестве его весьма удобен звуковой генератор типа ЗГ-1. Подобный генератор позволяет в очень широких пределах плавно регулировать частоту тока, дает ток синусоидальной формы и постоянного напряжения. Мощность генератора вполне достаточна для демонстрации всех опытов, в которых используется переменный ток регулируемой частоты.

При установлении фазовых соотношений в цепях переменного тока необходим коммутатор. В практике нашей работы использовались самые разнообразные коммутаторы. Лучшим оказался коммутатор, выпускаемый мастерскими средней школы 722 Москвы.

---

<sup>1</sup> А. А. Пинский, Изучение переменного тока в курсе физики средней школы, изд. АПН РСФСР, М., 1958.

## § 2. ОСНОВНЫЕ СВОЙСТВА ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Учащиеся знакомы с некоторыми свойствами переменного тока из курса восьмилетней школы. Однако эти знания неполны и не-систематичны. Поэтому на первых уроках необходимо повторить и углубить знакомый учащимся материал и подготовить почву для изучения более сложных явлений в цепях переменного тока. Подобранные в настоящем параграфе опыты решают задачу повторения и частичного углубления знаний учащихся о переменном токе.

### О п ы т 165. Индукционный генератор

О б о р у д о в а н и е: генератор переменного тока Еланского, электронный осциллограф, низкоомный реостат, демонстрационный амперметр, батарея аккумуляторов, ламповая панель на подставке.

Цель опыта — показать, что: 1) с помощью индукционного генератора можно создать в цепи вынужденные электромагнитные колебания; 2) величина индуцируемой в генераторе э. д. с. пропорциональна максимальному магнитному потоку, пронизывающему контур, скорости вращения и синусу угла поворота.

Генератор переменного тока присоединяют к лампочке от карманного фонаря и к электронному осциллографу (рис. 225). В цепь

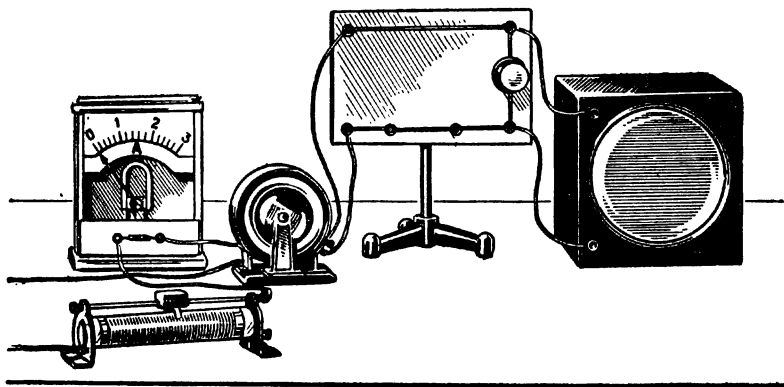


Рис. 225. Установка для изучения индукционного генератора

возбуждения генератора включают реостат и демонстрационный амперметр. Установив развертку осциллографа в диапазоне 7—30 гц, подбирают частоту вращения такой, чтобы она стала равной частоте развертки осциллографа. Наблюдают осциллограмму тока, проходящего через лампочку, которая имеет почти синусоидальную

форму. Следовательно, вынужденная э. д. с. изменяется по синусоидальному закону

$$E \sim \sin \omega t.$$

Увеличив скорость вращения ротора, замечают изменение частоты получаемого тока и тем самым демонстрируют основное свойство вынужденных колебаний — совпадение их частоты с частотой вынуждающих колебаний. Одновременно наблюдают и зависимость амплитуды индуктированной э. д. с. от скорости вращения ротора:

$$E \sim \omega.$$

Регулируя ток возбуждения, меняют магнитный ток, пронизывающий контур, образованный обмотками статора. Вращая ротор с прежней скоростью (об этом можно судить по устойчивости осциллограммы,) наблюдают пропорциональное изменение амплитуды.

Следовательно,

$$E \sim \Phi.$$

Объединяя результаты наблюдений, получают зависимость, ранее установленную аналитически

$$E \sim \Phi \omega \sin \omega t,$$

или, что одно и то же,

$$E \sim B S \omega \sin \omega t.$$

### § 3. ЦЕПЬ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА С АКТИВНЫМ СОПРОТИВЛЕНИЕМ

#### О п ы т 166. Введение понятия об активном сопротивлении

О б о р у д о в а н и е: источник переменного тока, демонстрационный амперметр, демонстрационный вольтметр, демонстрационный ваттметр, электрическая плитка, электрический двигатель небольшой мощности, батарея конденсаторов, соединительные проводники, источник постоянного тока (120 в, 5 а).

Собирают электрическую цепь из электрической плитки, амперметра, вольтметра и ваттметра. Подключив цепь к источнику постоянного тока, замечают, что мощность, найденная как произведение тока на напряжение, равна мощности, показываемой ваттметром.

Повторяют опыт, подключив цепь к источнику переменного тока и наблюдают аналогичную картину.

Обсуждая результаты опыта, приходят к выводу, что в такой цепи вся подводимая к нагрузке электрическая энергия превращается в другой вид энергии.

Сообщают, что нагрузка, при которой вся подводимая к ней от генератора электрическая энергия превращается в другой вид энер-

гин, называется активной, а ее сопротивление — активным сопротивлением.

Однако для учащихся не очевидно, что может существовать нагрузка, которая не превращает подводимой к ней энергии в другие виды. Для того чтобы показать учащимся, что такая нагрузка существует, заменяют плитку батареей конденсаторов. Увеличивая емкость батареи, устанавливают в цепи ток 2—3 а и наблюдают, что стрелка ваттметра стоит почти на нуле. Убеждаются в исправности ваттметра. Для этого, отключив конденсаторы, включают вместо их лампу накаливания и наблюдают отклонение стрелки ваттметра.

Обсуждая опыт, делают вывод, что батарея конденсаторов не преобразует подводимой электрической энергии в другие виды (мощность равна нулю), хотя в цепи и циркулирует значительный ток. Сообщают, что такая нагрузка называется реактивной.

Заменяв батарею конденсаторов двигателем, демонстрируют, что преобразуемая в цепи энергия зависит от нагрузки на двигатель. Следовательно, активное сопротивление в этом случае — величина переменная.

#### Опыт 167. Ознакомление с принципом работы электронного переключателя

Оборудование: электронный осциллограф, электронный переключатель, источник переменного тока, микрофон.

Электронный переключатель — вспомогательный прибор, и его изучение не входит в программу средней школы. Однако учащиеся

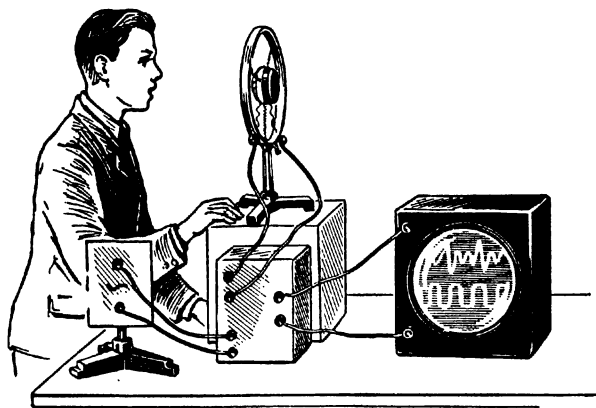


Рис. 226. Включение электронного переключателя

должны отчетливо представлять назначение переключателя и иметь самые элементарные сведения о принципе его работы (конечно, без рассмотрения схемы).



Подключают к электронному осциллографу переключатель и демонстрируют, что в этом случае светлая сплошная полоса на экране осциллографа разделилась на две штриховые, которые можно сдвигать и раздвигать. Таким образом, обычный однолучевой осциллограф превратился как бы в двухлучевой.

Подают на первый вход электронного переключателя переменное напряжение из сети и наблюдают осциллограмму. Затем на второй вход переключателя подключают пьезомикрофон и, объясняя перед микрофоном дальнейший материал урока, наблюдают на экране осциллографа одновременно две кривые (рис. 226). Объясняют, что электронный переключатель передает на осциллограф поочередно то один сигнал, то другой и делает это с большой частотой.

Для иллюстрации принципа работы переключателя полезно одним и тем же куском мела одновременно провести на доске две штриховых линии. Наконец, можно сравнить работу электронного переключателя с работой мастера на двух станках.

#### О п ы т 168. Фазовые соотношения в цепи с активным сопротивлением

О б о р у д о в а н и е: электронный осциллограф, панель для сборки цепи, электронный переключатель, реостат 30—40 ом.

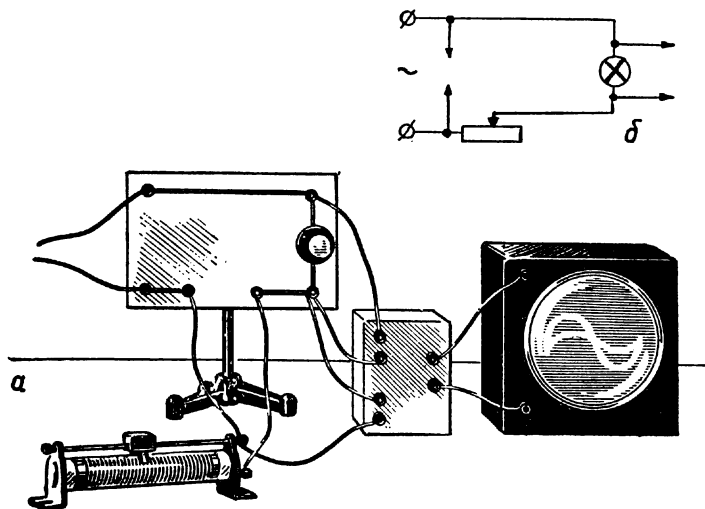


Рис. 227. Установка для наблюдения фазовых соотношений в цепи с активным сопротивлением (а) и схема включения приборов (б)

Совпадение по фазе колебаний тока и напряжения в цепи с активным сопротивлением не может быть доказано экспериментально, если пользоваться приборами одной какой-либо системы. Это объясняется тем, что электромагнитный осциллограф и измерительные приборы всех систем, за исключением электростатической, реагируют на ток, а электронный осциллограф и приборы электростатической системы — на напряжение. Следовательно, будучи включенными в цепь переменного тока, эти приборы будут показывать либо совпадение фаз токов на различных участках цепи, либо напряжений.

Поэтому фазовые соотношения в цепи переменного тока лучше всего установить, исходя из анализа механизма возникновения вынужденных колебаний электронов в проводниках.

Установленную аналитически зависимость (справедливость закона Ома для мгновенных значений тока и напряжения) можно проиллюстрировать с помощью осциллографа. Совпадение результатов наблюдений с аналитически установленной закономерностью весьма важно, так как в этом случае получают экспериментальный метод изучения фазовых соотношений в цепях переменного тока с емкостью и индуктивностью.

Чтобы проиллюстрировать с помощью электронного осциллографа совпадение по фазе колебаний тока и напряжения (рис. 227, а) собирают цепь, изображенную на рисунке 227, б.

На экране наблюдают осциллограмму тока, совпадающую по фазе с осциллограммой напряжения. Меняя с помощью реостата сопротивление цепи, наблюдают изменение амплитуды тока, что, однако, не ведет к нарушению фазовых соотношений.

#### § 4. ЦЕПЬ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА С ЕМКОСТЬЮ

##### О п ы т 169. Емкостное сопротивление

Об о р у д о в а н и е: источник переменного тока регулируемой частоты, батарея конденсаторов, лампочка от карманного фонаря, батарея аккумуляторов, электронный осциллограф, панель для сборки цепи.

Лампочку от карманного фонаря присоединяют последовательно с батареей конденсаторов к аккумуляторной батарее. Замыкая цепь, наблюдают, что лампочка не горит при любом значении емкости. Замыкают емкость накоротко, убеждаются в исправности лампочки и батареи аккумуляторов. На основании опыта делают вывод, что в цепи с емкостью постоянный ток невозможен.

Отсоединяют собранную цепь от батареи аккумуляторов и присоединяют к источнику переменного тока такого же напряжения, при этом лампочка светится. Присоединяют параллельно лампочке осциллограф (рис. 228) и убеждаются, что в цепи с емкостью

возникают незатухающие электромагнитные колебания (переменный ток), как и в цепи с активным сопротивлением.

Замыкают батарею конденсаторов накоротко и наблюдают более яркое свечение лампочки. Делают вывод, что конденсатор в цепи переменного тока является сопротивлением. В отличие от сопротивления, определяемого формулой  $R = \rho \frac{l}{S}$ , сопротивление, оказываемое переменному току конденсатором, называют емкостным и обозначают  $X_c$ .

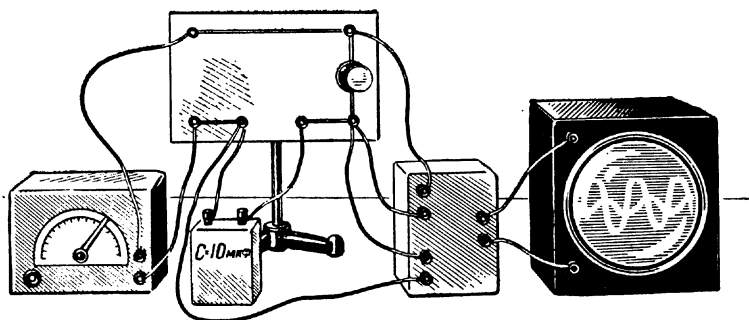


Рис. 228. Установка для изучения цепи переменного тока с емкостью

Увеличивают емкость включенной части батареи конденсаторов и наблюдают увеличение яркости свечения лампочки и амплитуды колебаний на экране осциллографа. Уменьшая емкость, наблюдают уменьшение яркости и амплитуды осциллографа. Делают вывод, что емкостное сопротивление обратно пропорционально величине емкости

$$X_c \sim \frac{1}{C}.$$

Увеличивая частоту переменного тока, наблюдают увеличение яркости свечения лампочки, а при снижении — уменьшение. Делают вывод, что емкостное сопротивление обратно пропорционально частоте

$$X_c \sim \frac{1}{\omega}.$$

Объединяют результаты наблюдений и записывают, что

$$X_c \sim \frac{1}{C\omega},$$

после чего переходят к знаку равенства

$$X_C = k \frac{1}{C\omega}.$$

Коэффициент пропорциональности при пользовании одной системой единиц для измерения  $X_C$ ,  $C$  и  $\omega$  равен единице, поэтому

$$X_C = \frac{1}{\omega C}.$$

#### О п ы т 170. Фазовые соотношения в цепи с емкостью

О б о р у д о в а н и е: источник переменного тока, электронный осциллограф, электронный переключатель, батарея конденсаторов, панель для сборки цепи.

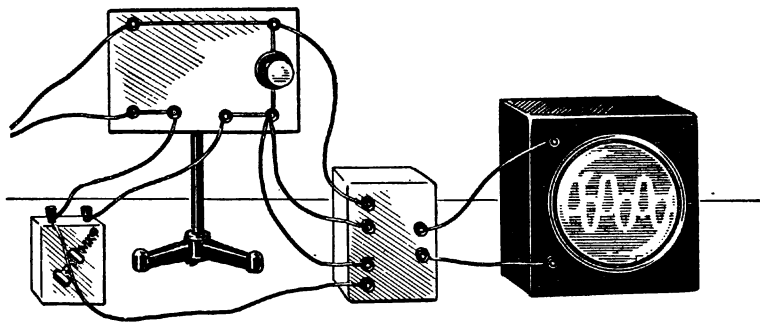


Рис. 229. Установка для наблюдения фазовых соотношений в цепи с емкостью

Собирают установку, изображенную на рисунке 229. Замыкают цепь и наблюдают на экране осциллографа две синусоидальные кривые. Меняя емкость батареи конденсаторов, отмечают изменение яркости свечения лампочки (которая по существу является демонстрационным амперметром) и изменение амплитуды одной из кривых, в то время как амплитуда второй кривой не изменяется. Это свидетельствует о том, что первая кривая—кривая тока, а вторая — напряжения. При этом замечают, что кривая тока лежит левее кривой напряжения примерно на четверть периода, что свидетельствует о том, что фаза колебаний тока опережает фазу колебаний напряжения.

Следовательно, если

$$u = U_m \sin \omega t, \text{ то } i = I_m \sin \left( \omega t + \frac{\pi}{2} \right).$$

## О п ы т 171. Закон Ома для цепи с емкостью

**Оборудование:** источник переменного тока регулируемой частоты, электронный осциллограф, электронный переключатель, батарея конденсаторов, батарея аккумуляторов, панель для сборки цепи.

Собирают установку, изображенную на рисунке 229. Замыкают цепь и наблюдают на экране осциллографа осциллограммы тока и напряжения.

Воспроизводя осциллограммы на доске, обращают внимание учащихся на то, что закон Ома для мгновенных значений тока и напряжения в цепи с емкостью несправедлив, что является существенным отличием цепи с емкостью от цепи с активным сопротивлением.

Увеличивают напряжения и отмечают, что при увеличении или уменьшении амплитуды напряжения соответственно увеличивается или уменьшается амплитуда тока. Следовательно, закон Ома справедлив для амплитудных значений тока и напряжения

$$I_m = \frac{U_m}{X_C}.$$

Заменив амплитудные значения тока и напряжения через действующие, показывают справедливость закона Ома для действующих значений

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

## § 5. ЦЕПЬ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА С ИНДУКТИВНОСТЬЮ

### О п ы т 172. Индуктивное сопротивление

**Оборудование:** источник переменного тока регулируемой частоты, универсальный трансформатор, лампочка от карманного фонаря, электронный осциллограф, панель для сборки цепи, батарея аккумуляторов.

Лампочку от карманного фонаря соединяют последовательно с катушкой универсального трансформатора к батарее аккумуляторов. Лампочка ярко светится. Одевая катушку на магнитопровод, убеждаются, что изменение индуктивности катушки не влияет на величину постоянного тока, проходящего через катушку.

Отсоединив цепь от батареи аккумуляторов, присоединяют ее к источнику переменного тока (рис. 230) такого же напряжения, что и батарея. Повторяют опыт и наблюдают, что изменение индуктивности влияет на величину тока, проходящего через катушку. Замкнув магнитопровод якорем, замечают, что лампочка перестает светиться. Замыкают катушку накоротко и вновь наблюдают яркое свечение лампочки. Делают вывод, что катушка в цепи перемен-

ного тока обладает, кроме сопротивления, определяемого по формуле  $R = \rho \frac{l}{S}$ , еще дополнительным сопротивлением, которое называется индуктивным и обозначается  $X_L$ . Индуктивное сопротивление зависит от величины индуктивности

$$X_L \sim L.$$

Присоединив параллельно лампочке осциллограф, уменьшают величину индуктивности катушки, постепенно отодвигая якорь магнитопровода, добиваясь яркого свечения лампочки.

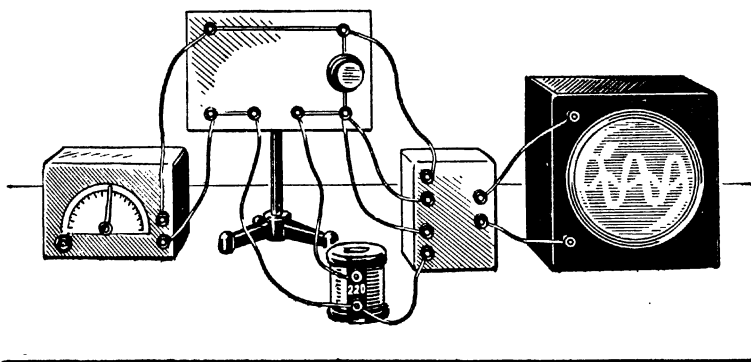


Рис. 230. Установка для изучения цепи переменного тока с индуктивностью

Увеличивают частоту переменного тока и наблюдают уменьшение яркости свечения лампочки; уменьшая частоту — увеличение яркости. Опыт свидетельствует, что индуктивное сопротивление прямо пропорционально частоте переменного тока

$$X_L \sim \omega.$$

Объединяя результаты наблюдений, записывают, что

$$X_L \sim L\omega.$$

Переходя к знаку равенства, записывают

$$X_L = kL\omega.$$

При пользовании одной системой единиц для измерения величин индуктивного сопротивления, индуктивности и частоты коэффициент  $k$  становится равным единице и тогда

$$X_L = L\omega.$$

### Опыт 173. Фазовые соотношения в цепи с индуктивностью

Оборудование: источник переменного тока, осциллограф, электронный переключатель, универсальный трансформатор, панель для сборки цепи.

Собирают установку, изображенную на рисунке 231. Замыкают цепь и наблюдают на экране осциллографа две синусоидальные кривые. Меняя величину индуктивности катушки, отмечают изменение яркости свечения лампочки. Одновременно наблюдают изме-

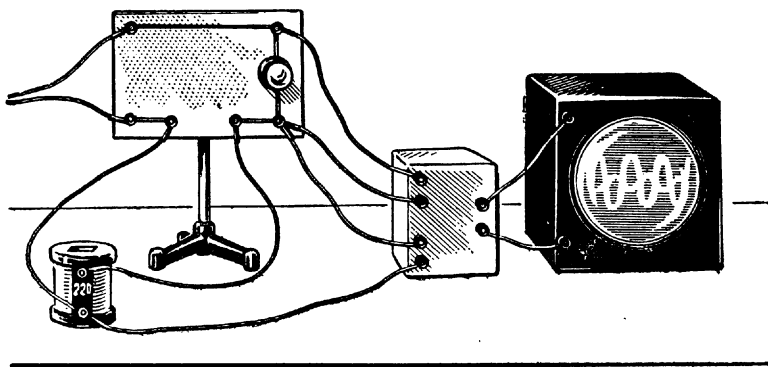


Рис. 231. Наблюдение фазовых соотношений в цепи с индуктивностью

нение амплитуды одной из кривых, в то время как амплитуда второй кривой не изменяется. Это говорит о том, что первая кривая — кривая тока, а вторая — напряжения.

Обращают внимание учащихся на то, что кривая тока лежит правее кривой напряжения примерно на четверть периода, что свидетельствует о том, что фаза колебаний напряжения опережает фазу колебаний тока. Следовательно, если

$$u = U_m \sin \omega t, \text{ то } i = I_m \sin \left( \omega t - \frac{\pi}{2} \right).$$

### Опыт 174. Закон Ома для цепи с индуктивностью

Оборудование то же, что и в предыдущем опыте.

Собирают установку, изображенную на рисунке 231. Замыкают цепь и наблюдают на экране осциллографа осциллограммы тока и напряжения.

Воспроизводя осциллограммы на доске, обращают внимание учащихся на то, что закон Ома в цепи с индуктивностью не справедлив для мгновенных значений тока и напряжения, что является существенным отличием цепи с индуктивностью от цепи с активным сопротивлением.

Увеличивают напряжение и наблюдают, что при увеличении или уменьшении амплитуды напряжения соответственно увеличивается или уменьшается амплитуда тока, что свидетельствует о справедливости закона Ома для амплитудных значений тока и напряжения

$$I_m = \frac{U_m}{X_L}.$$

Заменяя максимальные значения тока и напряжения через действующие, показывают справедливость закона Ома для их действующих значений

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

## § 6. ЦЕПЬ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА СО СМЕШАННЫМ СОПРОТИВЛЕНИЕМ

### Опыт 175. Сопротивление цепи переменного тока со смешанной нагрузкой

**Оборудование:** источник переменного тока, реостат, лампочка накаливания, универсальный трансформатор, батарея конденсаторов.

Лампочка включается последовательно с реостатом в сеть переменного тока. Меняя сопротивление цепи, добиваются яркого свечения лампочки.

Выключив ток, последовательно с реостатом включают батарею конденсаторов. Замыкают цепь и наблюдают уменьшение яркости свечения лампочки, что свидетельствует о том, что полное сопротивление цепи больше ее активного сопротивления. Отключив батарею конденсаторов, повторяют опыт с катушкой от универсального трансформатора и вновь замечают увеличение сопротивления.

Делают вывод, что полное сопротивление цепи всегда больше ее активного сопротивления.

Последовательно с реостатом, лампочкой и катушкой подключают батарею конденсаторов. Вопреки ожиданиям сопротивление цепи не увеличилось, а уменьшилось. Замыкают накоротко конденсатор и вновь наблюдают уменьшение яркости горения лампочки, что свидетельствует об увеличении полного сопротивления. Повторяют опыт, замыкая накоротко катушку, и наблюдают увеличение полного сопротивления.

Опыты обнаруживают, что при последовательном соединении емкостного и индуктивного сопротивления полное сопротивление цепи увеличивается на величину меньшую, чем при включении какого-либо одного из сопротивлений. Иными словами, при последовательном соединении индуктивного и емкостного сопротивлений они не складываются, а вычитаются.

Таким образом, опыты обнаруживают два существенно важных свойства полного сопротивления: во-первых, оно всегда больше ак-



тивного сопротивления, во-вторых, совместное действие индуктивности и емкости приводит не к увеличению, а к уменьшению полного сопротивления.

### Опыт 176. Фазовое соотношение в цепи переменного тока со смешанной нагрузкой

**Оборудование:** источник переменного тока, реостат, панель для сборки цепи, электронный осциллограф, электронный переключатель, батарея конденсаторов, универсальный трансформатор.

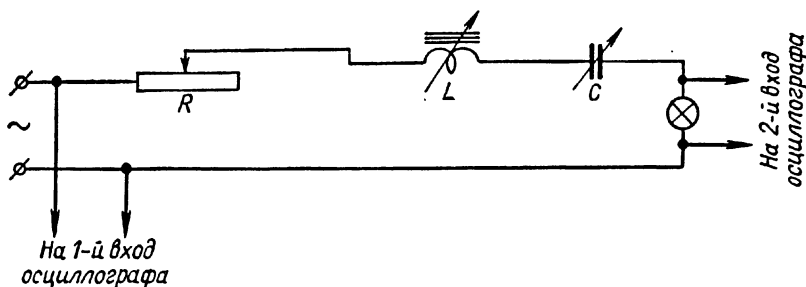


Рис. 232. Схема цепи переменного тока со смешанной нагрузкой

Собирают установку, изображенную на схеме рисунка 232. Включив ток, наблюдают на экране осциллографа две синусоидальные кривые, сдвинутые по фазе относительно друг друга.

Меняя величину емкости и индуктивности, замечают, что сдвиг фаз между колебаниями тока и напряжения зависит от соотношения между емкостным и индуктивным сопротивлением.

### Опыт 177. Резонанс в последовательной цепи переменного тока

**Оборудование:** источник переменного тока регулируемой частоты, электронный осциллограф, электронный переключатель, батарея конденсаторов, универсальный трансформатор, панель для сборки цепи, ключи.

Собирают последовательную цепь, состоящую из генератора переменного тока регулируемой частоты, катушки 12 в от универсального трансформатора, батареи конденсаторов, лампочки от карманного фонаря и двух ключей (рис. 233). Установив частоту генератора 50—60 гц, замыкают цепь и, меняя емкость батарей, устанавливают такой ток, при котором лампочка будет едва-едва светиться.

Изменяя частоту вынуждающих колебаний, наблюдают, как постепенно увеличивается яркость свечения лампочки, достигая

при некоторой частоте максимальной величины. Перейдя эту частоту, наблюдают постепенное уменьшение яркости свечения.

Объясняя проделанный опыт, обращают внимание учащихся на то, что при изменении частоты емкостное сопротивление уменьшается, а индуктивное увеличивается; разность же между ними уменьшается, становясь равной нулю в момент резонанса. В этот момент контур обладает только активным сопротивлением, что мож-

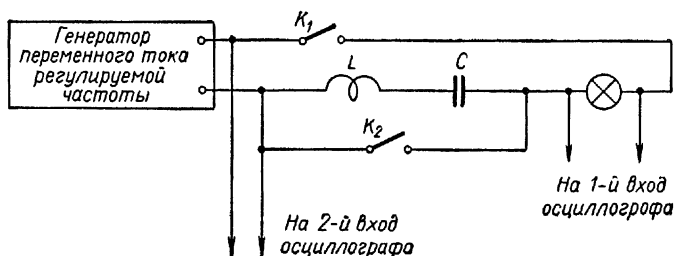


Рис. 233. Схема цепи для изучения явления резонанса в последовательной цепи переменного тока

но показать на опыте. Для этого замыкают ключ  $K_2$  и наблюдают, что никаких изменений в свечении лампочки не происходит. В момент резонанса величина тока достигает максимального значения.

Для демонстрации фазовых соотношений в период, предшествующий резонансу, в момент резонанса и в период, последующий за ре-

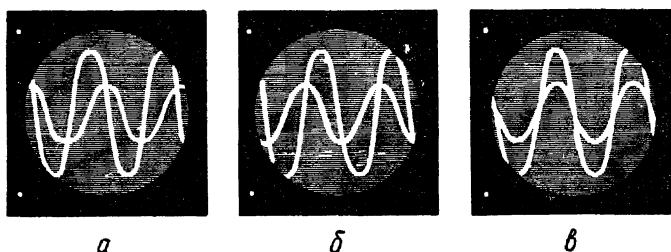


Рис. 234. Осциллограммы вынужденных колебаний и резонанса:

*а* — емкостное сопротивление больше индуктивного; *б* — индуктивное сопротивление больше емкостного; *в* — резонанс

зонансом, подключают к цепи электронный осциллограф и, меняя частоту вынуждающих колебаний, наблюдают изменение сдвига фаз при переходе через резонанс. Если вначале сдвиг фаз был емкостным, то после перехода резонирующей частоты он становится индуктивным. В момент резонанса фаза колебаний тока совпадает с фазой колебаний напряжения, и цепь ведет себя как активное сопротивление (рис. 234).

## Опыт 178. Резонанс в параллельной цепи переменного тока

**Оборудование:** генератор переменного тока регулируемой частоты, батарея конденсаторов, универсальный трансформатор, две лампочки от карманного фонаря, соединительные проводники.

К генератору регулируемой частоты подключают катушку 12 в от универсального трансформатора, батарею конденсаторов и две лампочки от карманного фонаря, которые выполняют роль демонстрационных амперметров (рис. 235).

Установив частоту переменного тока 30—40 гц, наблюдают яркое свечение лампочки, включенной в ветвь с катушкой. Лампоч-

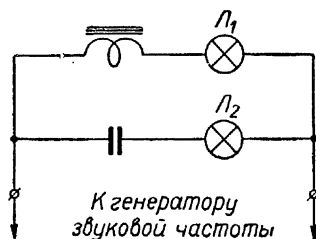


Рис. 235. Схема для изучения резонанса в параллельной цепи переменного тока

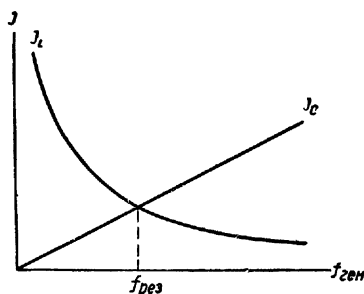


Рис. 236. График токов в параллельных ветвях переменного тока

ка, включенная последовательно с конденсатором, не светит. Объясняют, что при малой частоте вынуждающих колебаний емкостное сопротивление ветви с конденсатором велико, а индуктивное сопротивление катушки, наоборот, мало.

Увеличивая частоту переменного тока, наблюдают постепенное уменьшение яркости свечения лампочки, включенной в ветвь с катушкой. В то же самое время лампочка, включенная последовательно с конденсатором, начинает светиться все ярче и ярче.

Наконец, при некоторой частоте  $\omega_0$  (которую надо каким-либо образом заметить) обе лампочки начинают светить одинаково.

При дальнейшем увеличении частоты яркость свечения лампочек становится неодинаковой: лампочка в емкостной ветви светит все ярче, а лампочка в индуктивной ветви перестает светить совсем.

Объясняя проделанный опыт, обращают внимание учащихся на то, что при изменении частоты емкостное сопротивление ветви с конденсатором уменьшается, а индуктивное сопротивление ветви с катушкой увеличивается. В момент резонанса емкостное сопротивление равно индуктивному. Рассказ следует сопроводить графиком (рис. 236).

Для исследования явлений в неразветвленной части несколько видоизменяют схему цепи: отключают лампочки в ветвях и включают одну лампочку в неразветвленную часть цепи. Повторяя опыт, наблюдают уменьшение тока в неразветвленной части цепи при увеличении частоты. При частоте  $\omega_0$  лампочка не светится совсем. При дальнейшем увеличении частоты лампочка начинает светиться вновь.

Объясняя вторую часть опыта, обращают внимание учащихся на то, что колебания тока в ветви с емкостью опережают колебания напряжения на четверть периода, а в цепи с индуктивностью отстают на четверть периода. В результате ток в неразветвленной части цепи равен их разности. Но в момент резонанса токи в ветвях (для идеального контура) одинаковы и их разность равна нулю, а полное сопротивление цепи бесконечно велико. Однако в реальных контурах активное сопротивление не равно нулю и поэтому в момент резонанса в неразветвленной части цепи проходит небольшой ток, энергия которого и восполняет потери энергии в контуре.

В заключение следует начертить график изменения полного сопротивления контура при изменении частоты вынуждающих колебаний.

#### Опыт 179. Закон Ома для цепи переменного тока со смешанным сопротивлением

**Оборудование:** источник переменного тока регулируемой частоты, электронный осциллограф, электронный переключатель, реостат, лампочка, батарея конденсаторов, универсальный трансформатор, ключ, панель для сборки цепи.

Собирают установку, изображенную на рисунке 233. Замыкают цепь и наблюдают на экране осциллографа осциллограммы тока и напряжения.

Воспроизведя осциллограммы на доске, обращают внимание учащихся на то, что закон Ома не справедлив для мгновенных значений тока и напряжения.

Увеличивая напряжение, наблюдают, что при увеличении или уменьшении амплитуды напряжения соответственно увеличивается или уменьшается амплитуда тока, что свидетельствует о справедливости закона Ома для амплитудных значений тока и напряжения

$$I_m = \frac{U_m}{Z}.$$

Заменяя максимальные значения тока и напряжения через действующие значения, показывают, что закон Ома справедлив для действующих значений тока и напряжения

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

## § 7. МОЩНОСТЬ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

### Опыт 180. Мощность переменного тока

Оборудование: демонстрационный амперметр, демонстрационный вольтметр, демонстрационный ваттметр, батарея конденсаторов, универсальный трансформатор, реостат, лампа накаливания 500 вт, 120 в или плитка.

Цель опыта — показать, что: 1) для подсчета мощности переменного тока нельзя пользоваться ранее установленной формулой мощности  $P=IU$ ; 2) создать предпосылки для вывода формулы  $P=IU \cos\varphi$ . Опыт распадается на следующие взаимосвя-

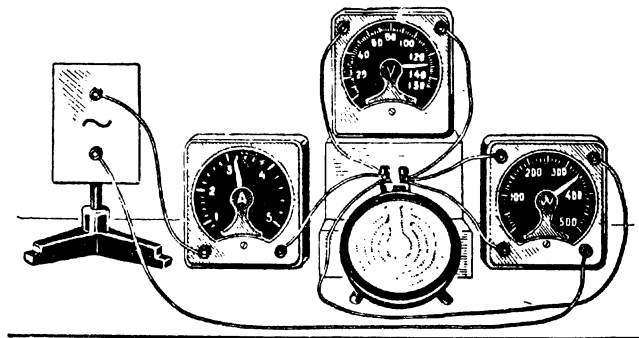


Рис. 237. Установка для измерения мощности в цепи переменного тока с активным сопротивлением

занные между собой демонстрации, часть из которых носит повторительный характер.

1. Собирают цепь, состоящую из плитки, амперметра, вольтметра и ваттметра (рис. 237). Замкнув цепь, измеряют ток, напряжение, мощность и убеждаются, что  $P=IU$ .

Обращают внимание учащихся на то, что энергия генератора в такой цепи превращается в другие виды энергии.

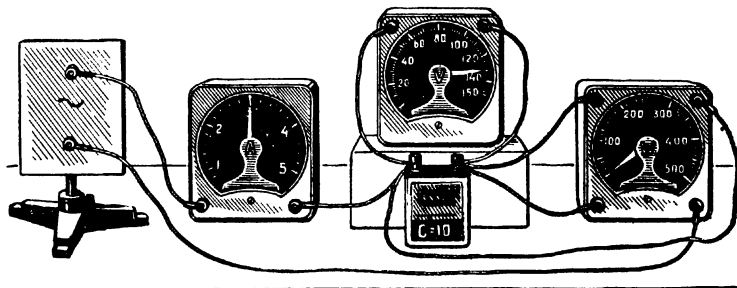


Рис. 238. Установка для измерения мощности в цепи переменного тока с емкостью.

2. Собирают цепь из амперметра, вольтметра, ваттметра и батареи конденсаторов (рис. 238). Увеличивая емкость батареи, устанавливают в цепи ток 2—3 а и убеждаются при этом, что стрелка ваттметра находится почти на нулевом делении. Убеждаются в исправности ваттметра. Для этого, отключив конденсатор, включают вместо него лампу накаливания и обнаруживают отклонение стрелки ваттметра.

Объясняют наблюдаемое явление тем, что в цепи переменного тока с емкостью в течение первой четверти периода происходит заряд конденсатора и энергия генератора превращается в энергию электрического поля конденсатора.

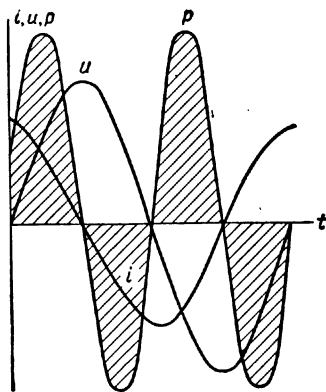


Рис. 239. График мгновенной мощности, тока и напряжения в цепи с емкостью

В течение второй четверти периода конденсатор разряжается и его энергия возвращается в цепь. Средняя же мощность за период будет равна нулю, что и показывает ваттметр. В процессе объяснения используют знание учащимися фазовых соотношений в цепи с емкостью для построения кривой мгновенной мощности (рис. 239).

Указывают, что мощность, измеряемая ваттметром, называется активной, а мощность, найденная по показаниям амперметра и вольтметра, — полной и обозначается буквой  $S$ .

3. Заменяв конденсатор катушкой 120 в от универсального трансформатора, повторяют опыт и замечают, что стрелка ваттметра также находится почти на нуле.

В цепи с индуктивностью, как и в цепи с емкостью, происходят обратимые превращения энергии генератора в энергию магнитного поля катушки и т. д. Рассказ также сопровождают графиком, построенным на основании анализа наблюдающихся ранее осциллограмм тока и напряжения.

4. Собирают цепь со смешанной нагрузкой и наблюдают, что активная мощность и в этом случае меньше полной. Так как  $S = IU$ , то можно записать

$$P = kIU.$$

Коэффициент  $k$  в различных цепях имеет следующие значения:

- а) в цепи с активным сопротивлением  $k = 1$ ;  $P = IU$ ;
- б) в цепи с емкостью  $k = 0$ ;  $P = 0$ ;
- в) в цепи с индуктивностью  $k = 0$ ;  $P = 0$ ;
- г) в цепи со смешанной нагрузкой  $1 > k > 0$ ;  $P > 0$ .

Следовательно,  $1 > k > 0$ .

Но в таких же пределах изменяется косинус угла сдвига фаз между током и напряжением:

- а) в цепи с активным сопротивлением  $\varphi = 0$ ;  $\cos \varphi = 1$ ;
- б) в цепи с емкостью  $\varphi = 90^\circ$ ;  $\cos \varphi = 0$ ;
- в) в цепи с индуктивностью  $\varphi = 90^\circ$ ;  $\cos \varphi = 0$ ;
- г) в цепи со смешанной нагрузкой  $0 < \varphi < 90^\circ$ ;  $0 < \cos \varphi < 1$ .

Это дает некоторое основание записать

$$P = IU \cos \varphi,$$

откуда коэффициент мощности может быть определен как величина измеряемая отношением активной мощности к полной

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

## § 8. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Описанные в настоящем параграфе опыты частично должны демонстрироваться на уроках электротехники.

### О п ы т 181. Однофазный трансформатор

**О б о р у д о в а н и е:** универсальный трансформатор, ламповый реостат с лампами на 6 в, амперметр на 2 а, амперметр на 15 а, вольтметр на 220 в, вольтметр на 10 в, электронный осциллограф, электронный переключатель, реостат на 30—40 ом.

Устройство трансформатора и его основные элементы известны учащимся. Поэтому целью описываемого опыта является не ознакомление с устройством его, а исследование процессов, происходящих в трансформаторе. Опыт распадается на ряд демонстраций.

Включив трансформатор, измеряют напряжение на первичной и вторичной обмотках и определяют коэффициент трансформации.

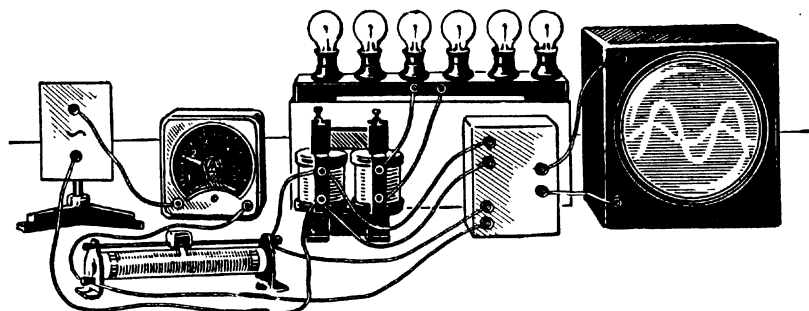


Рис. 240. Установка для изучения работы трансформатора

Присоединяют ко вторичной обмотке ламповый реостат. Увеличивая число включенных ламп, замечают, что возрастание нагрузки вызывает увеличение тока не только во вторичной цепи, но и в первичной.

Присоединив в первичной цепи электронный осциллограф (рис. 240), наблюдают, что при холостом ходе трансформатора сдвиг по фазе тока и напряжения близок к  $90^\circ$ . По мере загрузки вторичной цепи сдвиг фаз уменьшается и при некоторой нагрузке (для универсального трансформатора 170—180 *вт*) ток и напряжение практически совпадают по фазе.

Подключают электронный осциллограф к первичной и вторичной обмоткам трансформатора и наблюдают, что индуктируемая во вторичной обмотке синусоидальная э. д. с. сдвинута по фазе относительно напряжения сети на  $180^\circ$ . Напоминают в этой связи о законе Ленца.

### О п ы т 182. Вращающееся магнитное поле двигателя однофазного тока

Об о р у д о в а н и е: статор от демонстрационного двигателя, батарея конденсаторов, электронно-лучевая трубка, высоковольтный выпрямитель.

Статор от демонстрационного однофазного двигателя одевают на электронно-лучевую трубку (рис. 241). Подсоединив питание

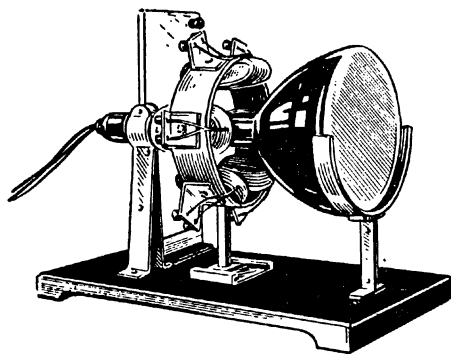


Рис. 241. Установка для демонстрации вращающегося магнитного поля двигателя однофазного тока

трубки, наблюдают светящееся пятно на экране. Затем, включив в сеть одну пару катушек статора, наблюдают на экране светящуюся прямую вертикальную линию. Отключив первую пару катушек, подключают вторую и наблюдают развертку луча по горизонтали. При одновременном включении обеих пар катушек на экране видна прямая, наклоненная к горизонтали под углом  $45^\circ$ . Проведенные опыты знакомы учащимся, и их объяснение не требует много времени.

Разрывают цепь одной пары катушек и подключают последовательно батарею конденсаторов. Включив ток в катушки, наблюдают на экране осциллографа не прямую линию, а круг, что свидетельствует о вращении отклоняющего магнитного поля.



### **Опыт 183. Вращающееся магнитное поле трехфазного тока**

**Оборудование:** то же, что и в предыдущем опыте.

Уменьшают число обмоток статора до трех и располагают их под углом  $120^\circ$  друг к другу. Присоединяют одну из обмоток к сети трехфазного тока. Светлая точка на экране растягивается в прямую линию. Это доказывает, что ток в обмотке создает переменное магнитное поле, которое и вызывает колебания электронного пучка.

При включении другой обмотки направление колебаний пучка изменится на  $120^\circ$ . При одновременном включении всех трех обмоток на экране появляется окружность. Опыт доказывает, что результирующее магнитное поле, поскольку оно вызывает вращение электронного пучка, вращается.

### **Опыт 184. Асинхронный двигатель**

**Оборудование:** статор от демонстрационного асинхронного двигателя, набор роторов.

Принцип устройства асинхронных двигателей однофазного и трехфазного тока одинаков. Поэтому демонстрации, связанные с устройством этих двигателей, отличаются только способом создания вращающегося магнитного поля.

Внутри статора двигателя устанавливают ротор, замкнутый на лампочку от карманного фонаря. Наблюдают свечение лампочки при неподвижном роторе, что свидетельствует об индукции в нем тока. Отпускают ротор и наблюдают его вращение. Обращают внимание учащихся на уменьшение яркости свечения лампочки. При увеличении нагрузки на ось ротора наблюдают уменьшение скорости вращения ротора и увеличивание яркости свечения лампочки. Вывинтив лампочку, разрывают цепь ротора и он останавливается. Повторяют опыт с замкнутой и разомкнутой рамками.

Проделанные опыты свидетельствуют о том, что: 1) вращающееся магнитное поле индуцирует в роторе ток; 2) индукционный ток, возникающий в роторе, взаимодействует с магнитным полем статора и приводит во вращение ротор; 3) при увеличении нагрузки на ось ротора уменьшается его скорость вращения, что приводит к увеличению индуцируемого в нем тока.

После этого объясняют устройство короткозамкнутого ротора и демонстрируют его вращение во вращающемся поле.

В заключение знакомят учащихся с устройством промышленного двигателя.

### **Опыт 185. Повышение коэффициента мощности**

**Оборудование:** источник переменного тока, электронный осциллограф, электронный переключатель, универсальный трансформатор, однофазный двигатель с приспособлением для торможения, ламповый реостат, реостат, амперметр.

Повышение коэффициента мощности ( $\cos \varphi$ ) является задачей, имеющей большое народнохозяйственное значение. Цель опыта — показать некоторые причины, вызывающие уменьшение коэффициента мощности, и способы его повышения.

Собирают установку, изображенную на рисунке 240. При разомкнутой вторичной цепи трансформатора наблюдают сдвиг фаз тока и напряжения, близкий к  $90^\circ$ . Следовательно, трансформатор работает в режиме индуктивного сопротивления. Постепенно загружают трансформатор и наблюдают уменьшение сдвига фаз, что свидетельствует о повышении коэффициента мощности.

Заменяют трансформатор двигателем и повторяют опыт, нагружая двигатель с помощью тормоза. Также наблюдают уменьшение сдвига фаз при увеличении нагрузки на двигатель.

Делают вывод, что ненагруженные и мало нагруженные трансформаторы и двигатели резко снижают коэффициент мощности. Поэтому необходимо подбирать мощность трансформаторов и двигателей таким образом, что они работали по возможности с номинальной нагрузкой.

Однако даже при номинальной нагрузке коэффициент мощности не может быть равным единице и для его повышения параллельно двигателю подключают конденсатор, что повышает коэффициент мощности установки.

Для демонстрации этого параллельно двигателю подключают батарею конденсаторов и, постепенно увеличивая емкость, добиваются почти полного устранения сдвига фаз. Рассказывают, что этот способ повышения коэффициента мощности находит сейчас широкое применение. Существуют и другие способы повышения коэффициента мощности, которые изучаются в курсе электротехники.

---

## Г Л А В А XI

### ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ

#### § 1. О НОВОМ ЭКСПЕРИМЕНТЕ В ТЕМЕ «ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ»

В теме «Электромагнитные колебания и волны» заканчивается первый этап формирования у учащихся представлений об электромагнитном поле. Этап чрезвычайно важный и сложный.

Обычно при изучении этой темы в средней школе демонстрируют: получение затухающих колебаний в контуре, принцип работы лампового генератора незатухающих колебаний, явление резонанса и принцип радиотелеграфной и радиотелефонной связи. Такой объем эксперимента нельзя признать достаточным.

Прежде всего при изучении этой темы необходимо на ряде простых и выразительных опытов показать учащимся основные свойства токов высокой частоты (т. в. ч.). Это позволит расширить политехнический кругозор учащихся, ибо токи высокой частоты находят все более широкое применение в технике и, что более важно, — создает большие методические возможности для формирования у учащихся глубоких представлений об электромагнитном поле. Так, при изучении передачи энергии высокой частоты можно очень просто познакомить учащихся с электромагнитными волнами, распространяющимися вдоль проводов, ввести понятие о длинной линии и тем самым подготовить учащихся к освоению новых специальностей, связанных с использованием высокочастотной техники. Поэтому в настоящей главе описанию опытов по изучению свойств токов высокой частоты уделено некоторое внимание.

Как уже отмечалось выше, в средней школе не изучаются свойства электромагнитных волн из-за отсутствия соответствующего оборудования. Новое оборудование, описанное выше, позволяет на простых и выразительных опытах показать отражение, преломление, интерференцию, дифракцию и поляризацию электромагнитных волн. Демонстрация этих опытов позволит создать у учащихся более полные и, следовательно, более точные представления об электромагнитном поле и подготовит их к изучению оптики, которая в этом случае будет рассматриваться, как естественное продолжение учения об электромагнитном поле.

Исходя из высказанных выше соображений, авторы уделили значительное внимание методике постановки опытов по изучению основных свойств электромагнитных волн.

## § 2. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ КОЛЕБАНИЯ

### О п ы т 186. Получение свободных электромагнитных колебаний

**Оборудование:** электронный осциллограф, кенотронный выпрямитель, релаксационный генератор или поляризованное реле, переключатель, батарея конденсаторов, реостат 40—50 ом, универсальный трансформатор.

Цель демонстрации — показать, что: 1) при разряде конденсатора на катушку индуктивности в образовавшейся цепи (контуре) возникают затухающие электромагнитные колебания; 2) причиной затухания электромагнитных колебаний являются необратимые превращения электрической энергии во внутреннюю энергию.

Катушку универсального трансформатора на 120 в, конденсатор емкостью 2—8 мкф (или батарею конденсаторов такой же емкости), реостат соединяют с электронным осциллографом и кенотронным выпрямителем (рис. 242).

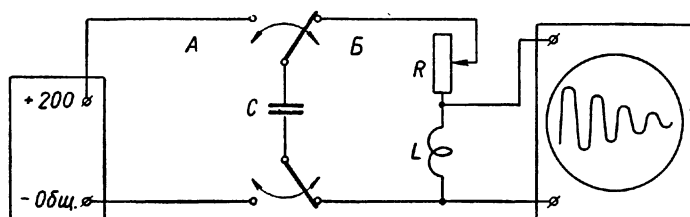


Рис. 242. Схема установки для наблюдения свободных электрических колебаний в контуре (ручное переключение)

Заряжая и затем разряжая конденсатор на индуктивность (для чего переключатель ставят сначала в положение А, а затем в В), наблюдают на экране осциллографа отдельные импульсы затухающих колебаний. Заменяв ручной переключатель автоматическим (рис. 243), подбирают частоту развертки осциллографа, равную частоте переключений, и наблюдают устойчивую осциллограмму свободных электромагнитных колебаний в контуре.

Объяснив процессы, происходящие в контуре превращением энергии электрического поля конденсатора в энергию магнитного поля катушки и последней вновь в энергию электрического поля конденсатора, выясняют причины затухания колебаний в контуре. Для этого с помощью реостата увеличивают активное сопротивление

ние контура и наблюдают на экране осциллографа увеличение затухания. Увеличив сопротивление реостата до 40—50 ом, наблюдают неколебательный разряд конденсатора.

Опыт дает право утверждать, что причиной затухания колебаний в контуре являются необратимые превращения энергии.

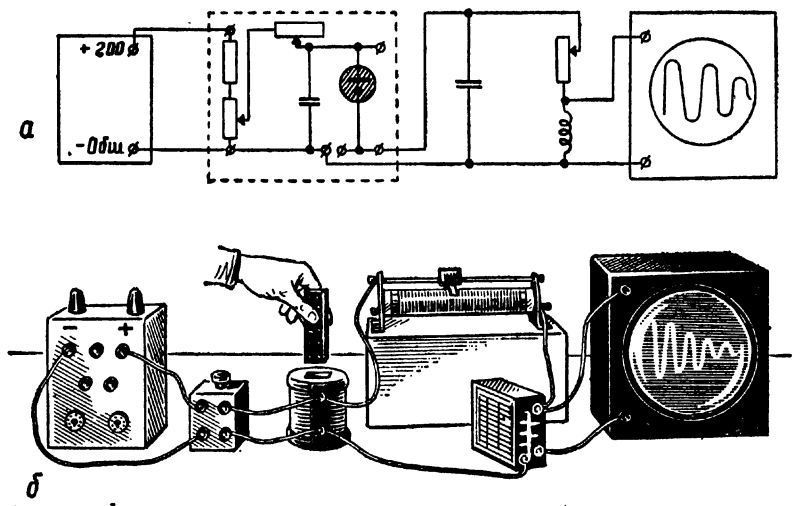


Рис. 243. Установка для наблюдения свободных электрических колебаний в контуре (автоматическое переключение):

а — схема; б — внешний вид

### Опыт 187. Частота свободных электромагнитных колебаний

**Оборудование:** то же, что и в предыдущем опыте.

Цель демонстрации — показать зависимость частоты электромагнитных колебаний в контуре от величины емкости и индуктивности контура.

В установке для демонстрации свободных электромагнитных колебаний в контуре увеличивают емкость включенной части батареи и наблюдают уменьшение частоты электромагнитных колебаний, а при уменьшении емкости — увеличение частоты.

Одев катушку на магнитопровод трансформатора, отмечают уменьшение частоты колебаний, а снимая плавно катушку с магнитопровода, наблюдают плавное изменение частоты колебаний. Проведенные опыты и объяснение их, данное учителем, служат достаточным основанием для введения формулы Томсона.

В классе с сильным составом учащихся можно математически вывести формулу Томсона, исходя из энергетических преобразований в контуре. Ниже дан простой вывод этой формулы.

Согласно закону превращения и сохранения энергии в идеальном контуре ( $R = 0$ ), энергия заряженного конденсатора равна энергии магнитного поля катушки

$$\frac{CU^2}{2} = \frac{LI^2}{2}, \text{ или } CU^2 = LI^2.$$

Рассматривая заряженный конденсатор как источник, а катушку как индуктивное сопротивление, можно записать, что

$$I = \frac{U}{X_L} = \frac{U}{2\pi Lf}.$$

Подставляя значение тока в формулу энергии магнитного поля в результате преобразований, получим

$$CU^2 = L \frac{U^2}{4\pi^2 L^2 f^2},$$

$$C = \frac{U^2}{4\pi^2 L f^2} = \frac{U^2}{4\pi^2 L},$$

откуда

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

### Опыт 188. Ламповый генератор

**Оборудование:** электронный осциллограф, батарея конденсаторов, универсальный трансформатор, ламповый генератор, кенотронный выпрямитель.

Ламповый генератор представляет собой автоколебательную систему. Поэтому из большого числа схем ламповых генераторов в описываемом опыте выбрана такая, в которой наиболее отчетливо видны основные элементы любой автоколебательной системы: контур, прямая и обратная связь, источник энергии, клапан (рис. 244).

Собрав установку, изображенную на рисунке 245, демонстрируют наличие электромагнитных колебаний в контуре и объясняют назначение основных узлов генератора. Затем меняя сначала индуктивность, а потом и емкость контура, демонстрируют изменение частоты колебаний в контуре и делают заключение, что в этом от-

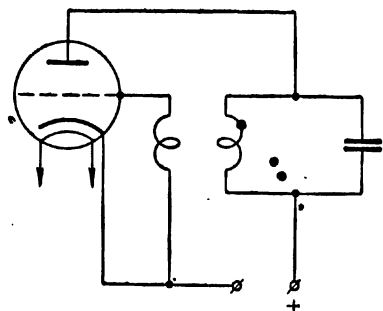


Рис. 244. Схема лампового генератора незатухающих колебаний

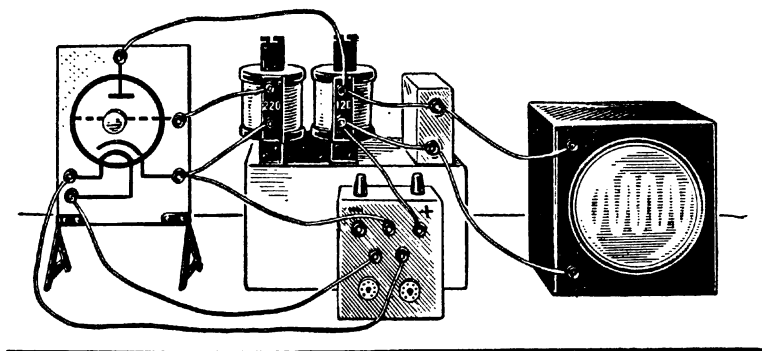


Рис. 245. Ламповый генератор незатухающих колебаний

ношении свойства автоколебаний совпадают со свойствами свободных колебаний.

Для успешной работы генератора важное значение имеет правильный подбор фазы обратной связи. Чтобы в контуре возникли незатухающие электромагнитные колебания, недостаточно условия поступления энергии в контур в такт его собственным колебаниям. Нужно, чтобы эта энергия поступала в момент нарастания тока в контуре. Нарушение этого условия приводит к немедленному затуханию колебаний.

Повернув катушку обратной связи на  $180^\circ$ , демонстрируют, что при неправильном подборе фазы обратной связи колебания в контуре не возникают. Поставив катушку обратной связи в первоначальное положение, наблюдают устойчивую работу генератора.

Для полноты объяснений можно показать также, что на работу генератора незатухающих колебаний влияет и степень связи между контурной катушкой и катушкой обратной связи. Чтобы показать это, относят катушку обратной связи от контурной катушки и наблюдают сначала уменьшение амплитуды колебаний, а затем и срыв колебаний в контуре.

### § 3. НЕКОТОРЫЕ СВОЙСТВА ТОКОВ ВЫСОКОЙ ЧАСТОТЫ

Широкое использование токов высокой частоты в современной технике и медицине требует ознакомления учащихся с некоторыми их свойствами. Ниже описаны опыты, которые могут быть поставлены в средней школе.

#### Опыт 189. Поверхностный эффект

**Оборудование:** генератор высокой частоты, виток из нескольких проволок, лампочки от карманного фонаря.

Для демонстрации поверхностного эффекта необходимо изготовить виток из пучка неизолированных медных проводников (рис. 246)

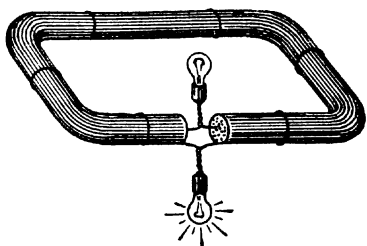


Рис. 246. Виток для демонстрации поверхностного эффекта.

К среднему и одному внешнему витку припаявают лампочки от карманного фонаря.

Поднося виток к работающему генератору высокой частоты, наблюдают яркое свечение лампочки, подключенной к наружным виткам, и еле заметный накал лампочки, подключенной к среднему витку.

Если опыт проводится с резонансным трансформатором Тэсла, следует показать безопасность токов высокой частоты для человека. Для этого следует взяться за кондуктор высокочастотной катушки.

### Опыт 190. Высокочастотная сушка

**Оборудование:** резонансный высокочастотный трансформатор Тэсла, демонстрационный плоский конденсатор, индукционная катушка ИВ-100, вата, демонстрационные весы.

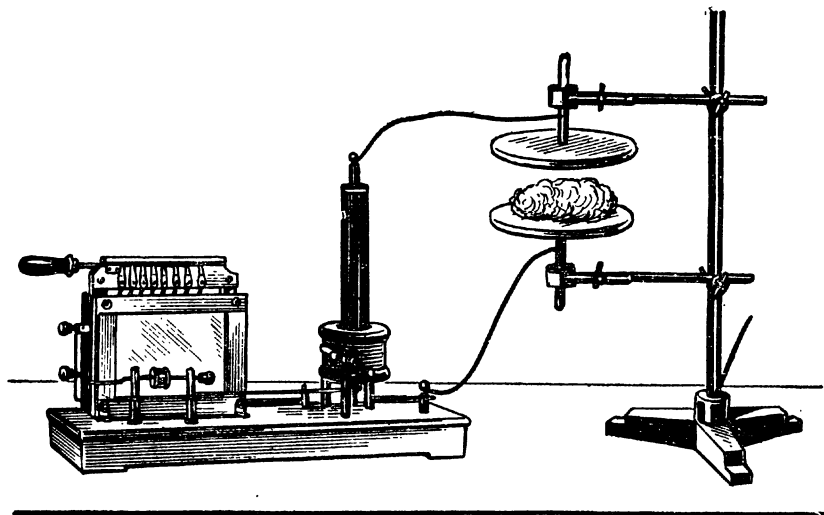


Рис. 247. Установка для демонстрации высокочастотной сушки

Присоединяют к высокочастотной катушке резонансного трансформатора Тэсла пластины от демонстрационного плоского конденсатора (рис. 247) и настраивают трансформатор.



Выключив трансформатор, уравнивают на демонстрационных весах комки влажной ваты.

Помещают вату тонким слоем на нижнюю пластинку конденсатора и включают генератор.

Через 2—3 минуты выключают генератор и помещают вату на весы. Замечают, что вата стала легче.

#### **О п ы т 191. Свечение безэлектродных газонаполненных трубок в электромагнитном поле высокой частоты**

**О б о р у д о в а н и е:** высокочастотный резонансный трансформатор Тэсла, комплект безэлектродных трубок, неоновая лампа, газонаполненная лампа накаливания, высокочастотный индуктор ИВ-100.

Включив предварительно настроенный резонансный трансформатор Тэсла, подносят к повышающей катушке газонаполненную лампу накаливания, держа последнюю за цоколь. Наблюдают яркое свечение газа в баллоне лампы.

Затем подносят к катушке неоновую лампочку и также замечают яркое свечение газа. Поднося к катушке безэлектродные трубки, наполненные неоном под низким давлением, наблюдают свечение газа в трубках. Газ в трубках светится только до того места, где их держит экспериментатор. Остальная часть трубки остается темной.

Весьма эффектно свечение газа в кольцевой безэлектродной трубке, помещенной сверху коаксиально по отношению ко вторичной обмотке трансформатора.

#### **§ 4. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ВОЛНЫ В ПРОВОДАХ**

Изучение свойств электромагнитных волн удобно начинать с знакомства со свойствами волн, распространяющихся вдоль проводов. В этом случае наиболее просто обеспечивается связь с переменным током и вместе с тем легко осуществляется переход к свободным электромагнитным волнам. Значительно проще при этом может быть объяснено излучение контура и роль антенны.

#### **О п ы т 192. Короткая линия переменного тока**

**О б о р у д о в а н и е:** источник переменного тока, двухпроводная линия, две неоновые лампочки с «усами» для крепления на линии, две лампочки накаливания.

Короткой линией переменного тока называется линия, протяженность которой значительно меньше длины волны вынуждающих электромагнитных колебаний.

При подключении такой линии к генератору переменного тока за время, в течение которого электромагнитное поле распространится от начала до конца линии, напряжение в ее начале не успеет

измениться, и поэтому напряжение в конце линии будет равно напряжению в начале. Благодаря этому электрическое и магнитное поля в начале и в конце линии будут одинаковыми.

Цель опыта — показать, что в короткой линии устанавливаются такие вынужденные колебания тока и напряжения, при которых напряжение и ток между проводами во всех точках одинаковы.

К двухпроводной линии присоединяют генератор переменного тока и две неоновые лампочки. Перемещая одну из лампочек вдоль линии, наблюдают, что яркость ее свечения всюду одинакова, что говорит о равенстве напряжений во всех точках линии.

Включают в линию последовательно несколько лампочек от карманного фонаря и наблюдают их одинаковое свечение. (Линия в конце замкнута!)

### О п ы т 183. Длинная линия переменного тока

О б о р у д о в а н и е: генератор высокой частоты Б. С. Звoryкина с принадлежностями, кенотронный выпрямитель, бумажные колечки, неоновые лампы.

Длинной линией переменного тока называется линия, протяженность которой значительно больше длины волны вынуждающих электромагнитных колебаний. При подключении такой линии к генератору переменного тока за время, в течение которого электромагнитное поле распространится от начала до конца линии, напряжение в ее начале успеет измениться и будет отличаться от напряжения в конце линии и других ее точках. В силу этого будут различны в различных точках линии электрическое и магнитное поля.

Цель опыта — показать, что напряжение и ток в различных точках длинной линии различны.

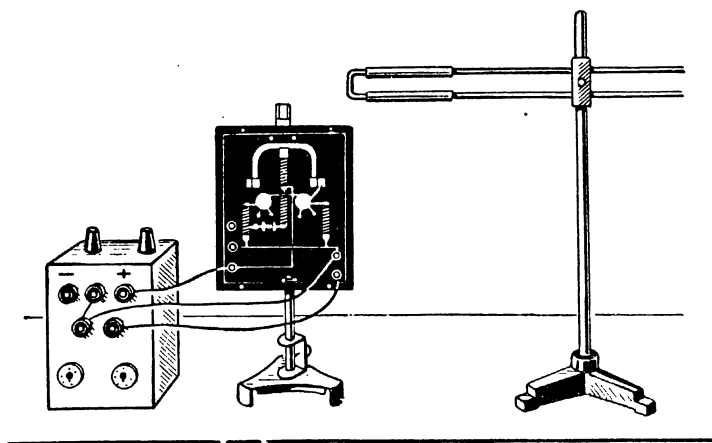


Рис. 248. Длинная линия

С генератором высокой частоты конструкции Б. С. Зворыкина индуктивно связывают двухпроводную линию (рис. 248). Петля линии не должна находиться слишком близко к петле генератора, так как при этом изменяется частота генератора. Линию до урока тщательно настраивают.

Включив генератор, перемещают неоновую лампочку от петли к открытому концу линии и наблюдают момент зажигания ее примерно на расстоянии 50 см от петли. По мере дальнейшего продвижения лампочки яркость ее свечения сначала увеличивается,

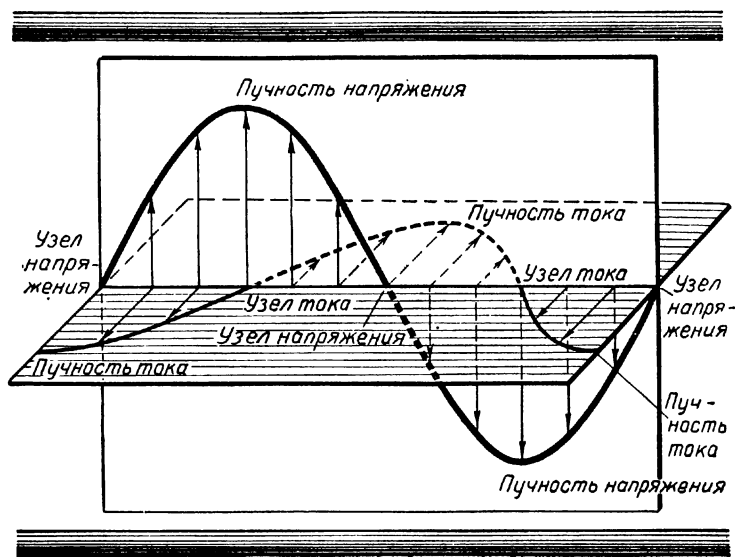


Рис. 249. График тока и напряжения в длинной линии

затем уменьшается, и лампочка гаснет. При помощи бумажного колечка, одеваемого на провод линии, отмечают место максимального свечения лампочки. Передвигая лампочку дальше, наблюдают вновь зажигание лампочки. Яркость свечения лампочки по мере продвижения к концу линии возрастает, достигая максимума на конце. Опыт свидетельствует, что напряжение в различных точках линии различно. Рассказывают учащимся, что в случае более длинной линии чередование максимумов и минимумов напряжений продолжалось бы. По результатам опыта на классной доске строят график напряжений.

Заменяют перемычки лампочками от карманного фонаря и замечают, что наиболее яркое свечение лампочек наблюдается в точках, равноотстоящих от максимумов напряжений. Опыт свидетельствует, что ток между проводами длинной линии в различных точках имеет разную величину. Строят график тока в линии (рис. 249)

Анализируя результаты наблюдений, приходят к выводу, что в длинной линии устанавливаются электромагнитные колебания, имеющие характер стоячих волн.

Объясняют, что стоячие электромагнитные волны в линии получаются в результате сложения волн, идущих от генератора, и волн, отраженных от концов линии. Для подтверждения этого расстраивают линию, изменив ее длину, и замечают, что стоячие волны не образуются.

Опыт дает основание сделать вывод о том, что линии передачи, обладая рассредоточенной емкостью и индуктивностью, представляют собой колебательный контур, имеющий, как и всякий контур, свою собственную частоту.

При совпадении собственной частоты линии с частотой генератора линия настраивается в резонанс, в ней устанавливаются стоячие волны.

## § 5. СВОБОДНЫЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ВОЛНЫ

### О п ы т 194. Открытый колебательный контур. Излучающая и приемная антенны

О б о р у д о в а н и е: то же, что и в предыдущем опыте.

Собрав установку, описанную в предыдущем опыте, настраивают линию в резонанс и наблюдают яркое свечение неоновой лампочки на ее концах. С помощью переходных уголков изгибают провода линии в точке максимума тока под углом  $90^\circ$  (рис. 250) и наблюдают, что свечение лампочки на концах не изменяется.

Показывают, что такое изменение формы линии привело к тому, что она приобрела свойство излучать электромагнитное поле в пространство. Для этого перед линией с отогнутыми концами ставят приемный диполь и наблюдают, что лампочка диполя не светится. Отогнув концы линии, наблюдают яркое свечение лампочки.

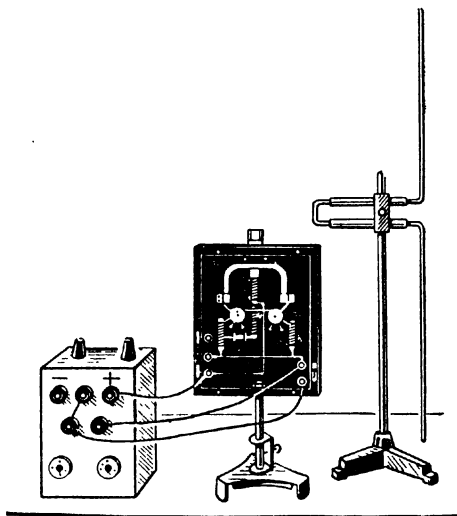


Рис. 250. Излучающая антенна

Обращают внимание учащихся на то, что в процессе излучения активную роль выполняют только отогнутые концы линии, осталь-

ная часть линии служит для подвода электромагнитных волн и является по существу волноводом (новый термин!).

Укорачивают линию до 50 см и наблюдают яркое свечение неоновой лампочки на ее концах. Затем стержни линии вывинчивают из соединительной скобы, соединяют их в прямолинейный отрезок, который устанавливают над витком генератора в зажиме держателя, и подносят к нему в разных точках неоновую лампочку. У концов стержней, где образуются пучности напряжения, лампочка загорается. Строят график напряжения. Изменяя длину стержня, показывают, что при несовпадении собственной частоты стержня и частоты вынуждающих колебаний стержень не настраивается в резонанс и стоячие волны в нем не возникают.

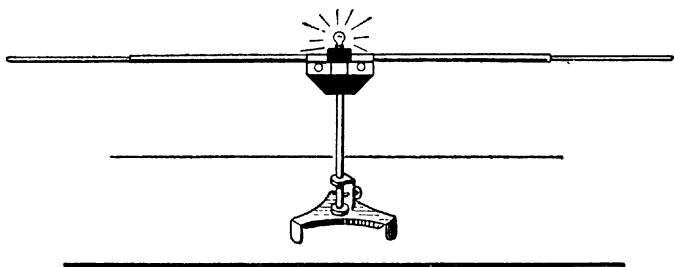


Рис. 251. Приемная антенна

Заменяв стержень другим, с лампочкой накаливания посередине (рис. 251), демонстрируют, что максимум колебаний тока находится посередине стержня. Строят график тока в полученном открытом колебательном контуре.

Установив приемный полуволновый диполь на расстоянии 2—3 м от генератора без открытого колебательного контура, замечают, что лампочка приемного диполя не светится. Устанавливают на генераторе линейный полуволновый вибратор и замечают яркое свечение лампочки. Опыт свидетельствует, что полуволновый линейный вибратор обладает хорошей излучающей способностью. На этом основано его использование в качестве излучающей антенны.

Заменяв приемный диполь контуром с сосредоточенными параметрами, настраивают контур в резонанс вблизи генератора. Отдвигая контур от приемника, замечают, что уже на расстоянии 15—20 см лампочка приемника не светится. Присоединяют к контуру индуктивно или электрически связанный полуволновый линейный вибратор и замечают яркое горение лампочки на расстоянии до 3—4 м.

Опыт свидетельствует о том, что полуволновый линейный вибратор обладает хорошей приемной способностью. На этом основано его использование в качестве приемной антенны.

## О п ы т 195. Скорость распространения электромагнитного поля в дистиллированной воде

**Оборудование:** генератор высокой частоты с принадлежностями, кенотронный выпрямитель, диполь длиной 11,1 см; стеклянный цилиндр, дистиллированная вода.

Цель опыта — показать, что длина стоячей волны в приемном диполе, помещенном в дистиллированную воду, меньше, чем длина волны в диполе, находящемся в воздухе. Из этого опытного факта следует, что скорость распространения электромагнитных волн в воде меньше скорости их в воздухе.

Перед генератором высокой частоты на равном расстоянии от его антенны располагают два приемных диполя, один из которых имеет длину 1 м и взят из набора к генератору, а второй имеет длину в десять раз меньшую (примерно 111 мм). Включают генератор и наблюдают яркое свечение лампочки, включенной в середине длинного диполя. Лампочка короткого диполя не светится, так как ее собственная частота в девять раз меньше частоты излучаемых колебаний.

Опускают короткий диполь в цилиндр с дистиллированной водой и наблюдают яркое свечение его лампочки.

Так как длина стоячих волн в диполях равна половине их длин, то непосредственно из опыта следует, что длина волны в воде в девять раз меньше длины волны в воздухе. Но длина волны пропорциональна скорости. Следовательно, скорость распространения электромагнитных волн в воде в девять раз меньше скорости распространения их в воздухе.

## О п ы т 196. Принцип радиотелеграфной передачи

**Оборудование:** генератор УКВ, кенотронный выпрямитель, телеграфный ключ.

На расстоянии 2—3 м от генератора УКВ, снабженного передающей антенной, устанавливают приемный диполь. В цепь сеток генератора включают телеграфный ключ. При размыкании цепи сеток лампы запираются и генератор не работает.

Манипулируя ключом, посылают радиотелеграфные сигналы различной продолжительности. Лампочка приемного диполя в соответствии с принятым сигналом светится в течение различного времени. Посылая длинные и короткие сигналы, можно передавать необходимые сигналы, пользуясь азбукой Морзе.

## О п ы т 197. Принцип радиуправления.

**Оборудование:** генератор Зворыкина с принадлежностями, детектор, поляризованное реле РП-4, магнитный пускатель, электродвигатель, автомобиль, управляемый по радио.

Заменяв в предыдущей установке малочувствительную лампочку детектором и поляризованным реле, включенным так, как показано на рисунке 252, демонстрируют управление работой электродвигателя при помощи радиосигналов, посылаемых передатчиком.

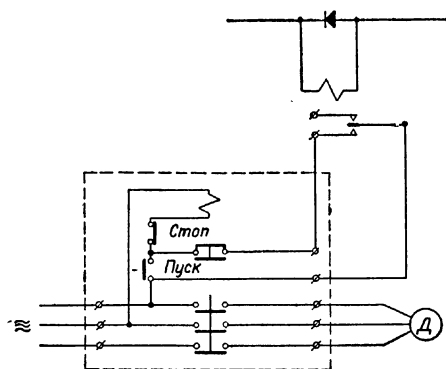


Рис. 252. Схема установки для демонстрации принципа радиуправления работой двигателя

После того как будет усвоен принцип радиуправления, на стол ставят автомобиль, управляемый по радио<sup>1</sup>, и, манипулируя ключом (или пультом управления), демонстрируют работу автомобиля.

### Опыт 198. Принцип амплитудной модуляции

**Оборудование:** электронный осциллограф, органная труба, или камертон, угольный микрофон, звуковой генератор, батарея аккумуляторов, постоянное сопротивление 200—400 ом, детектор, конденсатор 200—400 пф.

1. Собирают установку, изображенную на рисунке 253, а. Издавая при помощи камертона звуки, наблюдают на экране осциллографа их осциллограмму. Объясняют, что звуковые колебания воздуха перед микрофоном преобразуются последним в колебания электрического тока, которые и наблюдают на экране.

2. Собирают цепь по схеме, изображенной на рисунке 253, б. Демонстрируют осциллограмму переменного тока частотой 10—12 кГц. При этом частота развертки осциллографа берется той же, что и в первом опыте (20—200 кГц). Осциллограмма почти вливается в светлую полосу. Объясняют, почему это происходит.

3. В предыдущую цепь включают угольный микрофон, перед которым вновь издают звуки с помощью камертона (рис. 254). На экране осциллографа наблюдают модулированные по амплиту-

<sup>1</sup> Описание автомобиля дано в журнале «Физика в школе», 1959, № 5, стр 81.

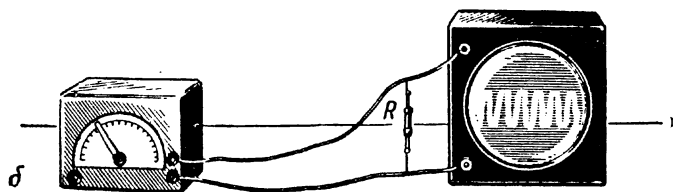
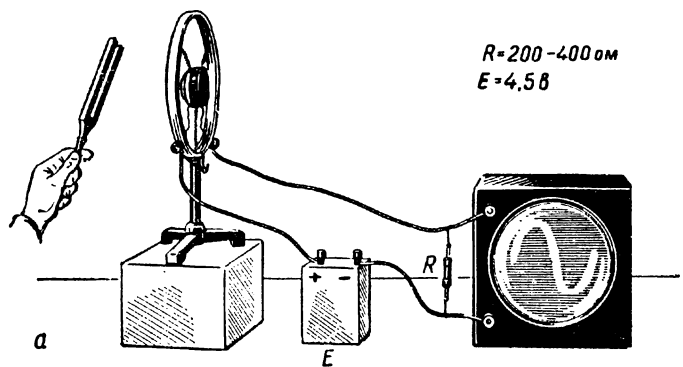


Рис. 253. Наблюдение осциллограмм:  
а — низкой частоты; б — высокой частоты

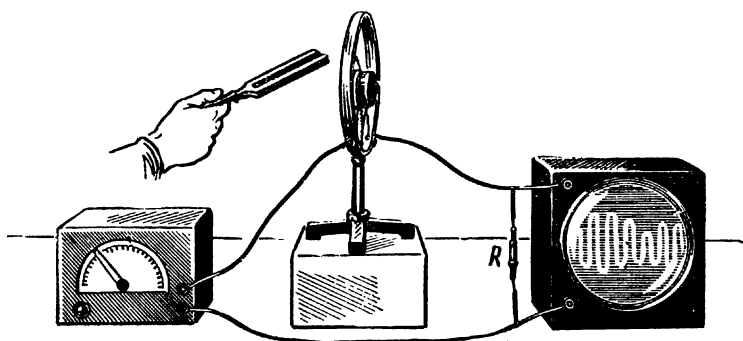


Рис. 254. Наблюдение осциллограмм модулированных колебаний



де колебания высокой (несущей) частоты. Объясняют, что изменением амплитуды несущей частоты вызывается тем, что сопротивление одного из участков цепи (микрофона) происходит со звуковой частотой. Следовательно, ток в цепи должен изменяться со звуковой частотой, что и наблюдается на опыте.

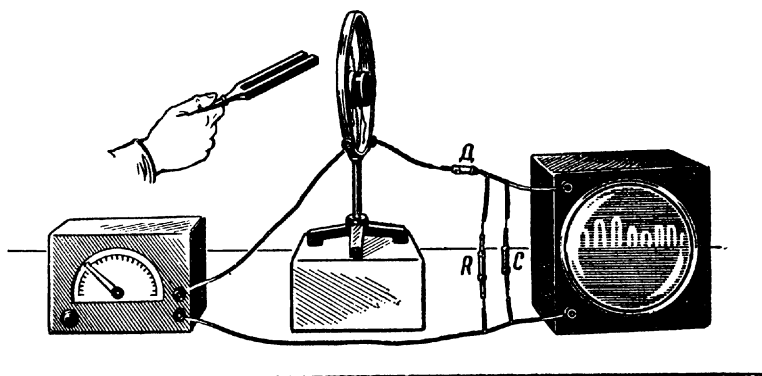


Рис. 255. Детектирование модулированных колебаний

4. Включив последовательно с осциллографом детектор типа ДГЦ, наблюдают демодуляцию колебаний (рис. 255). Качество демодуляции улучшается, если параллельно входу осциллографа подключить конденсатор на 200—400 пф.

#### О п ы т 199. Принцип передачи модулированных сигналов

**О б о р у д о в а н и е:** генератор УКВ с принадлежностями, проигрыватель патефонных пластинок, демонстрационный усилитель, динамик на подставке, патефонная пластинка, звуковой генератор, усилитель от киноустановки, кенотронный выпрямитель, детектор.

Цель демонстрации — показать принцип передачи модулированных сигналов. Собирают установку для демонстрации радиотелеграфа.

На сетку генератора УКВ подают сигналы от генератора звуковой частоты. Напряжение сигнала должно быть максимальным. Наблюдают мигание лампочки при подаче сигналов малой частоты. При увеличении частоты звуковых колебаний мигание лампочки становится незаметным.

Затем вместо лампочки включают динамик. Несмотря на то, что генератор работает, динамик не издает звука. Включают параллельно динамику детектор и слушают звучание динамика с частотой звукового генератора (рис. 256). Для того чтобы усилить звучание динамика, включают ламповый усилитель.

Заменяют звуковой генератор проигрывателем патефонных пластинок, включенным через усилитель к генератору УКВ (рис. 257). Пока игла звукоснимателя не опущена на пластинку, динамик не звучит. Опустив иглу звукоснимателя на пластинку, слушают звучание динамика, воспроизводящего запись пластинки.

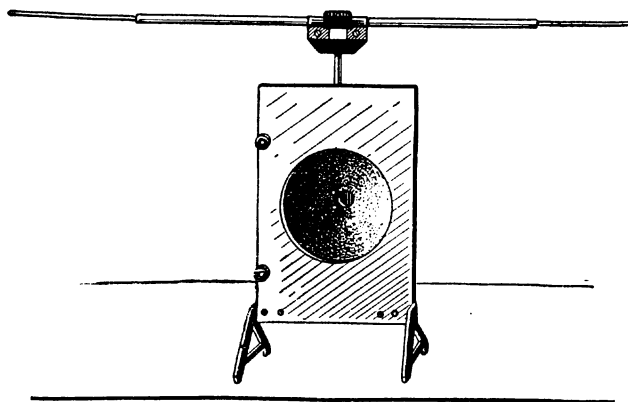


Рис. 256. Приемник модулированных сигналов

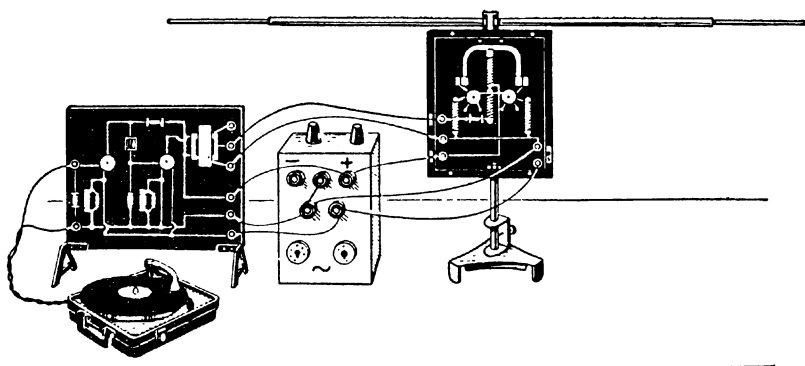


Рис. 257. Передатчик модулированных сигналов

### О п ы т 200. Генератор сантиметровых волн

Об о р у д о в а н и е: генератор СВЧ, усилитель, динамик, звуковой генератор, телеграфный ключ, телеграфный аппарат демонстрационный.

Цель описанных ниже опытов заключается в том, чтобы познать учащихся с генератором сантиметровых волн и повторить с его помощью ряд уже известных учащимся опытов. Изучение кон-

струкции генератора не обязательно, так как генератор является вспомогательным прибором. Однако ученикам следует рассказать, что как и в любом генераторе, в генераторе сантиметровых волн есть контур (объемный резонатор), источники питания, антенна и другие элементы, с которыми учащиеся познакомились при изучении более простых по конструкции генераторов.

### 1. Передача радиотелеграфных сигналов

Собирают установку, изображенную на рисунке 258. Обращают внимание учащихся на то, что индикатором приема в собранной установке является динамик. Включают генератор и, манипулируя

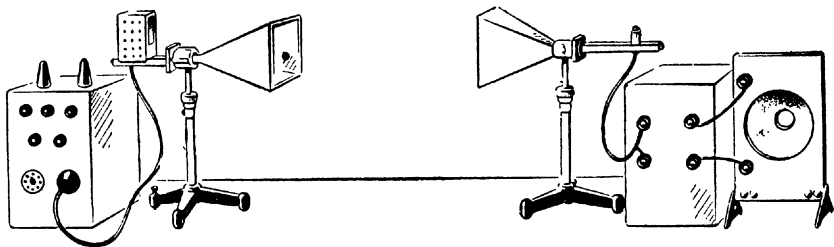


Рис. 258. Установка для передачи радиотелеграфных сигналов с помощью генератора сантиметровых волн

ключом, находящимся в цепи отражателя, слушают щелчки, издаваемые динамиком. Если позволяет время, то заменяют демонстрационный динамик моделью телеграфного аппарата и повторяют опыт, записывая посылаемые сигналы на ленту.

### 2. Передача модулированных сигналов

Подключают к генератору мультивибратор (или звуковой генератор), а к усилителю — динамик. Включают генератор и наблюдают передачу модулированных сигналов.

### 3. Направленное действие рупорной антенны

Рупорная антенна обладает резко выраженной направленностью излучения, что делает ее весьма удобной для демонстрации таких свойств электромагнитных волн, как отражение, преломление, интерференция и т. п.

Для демонстрации направленного действия рупорной антенны пользуются описанной выше установкой. Вращая антенну передатчика вокруг вертикальной оси, наблюдают сначала ослабление, а затем и полное исчезновение приема. Повторяют опыт и с антенной приемника.

## Опыт 201. Экранирующее действие проводников

**Оборудование:** генератор СВЧ с принадлежностями, усилитель, динамик или гальванометр.

Собирают установку, показанную на рисунке 259. Включив генератор, наблюдают отчетливый прием излучаемых им электромагнитных волн. Медленно вносят в пространство между генератором и приемником металлический экран и наблюдают постепенное из-

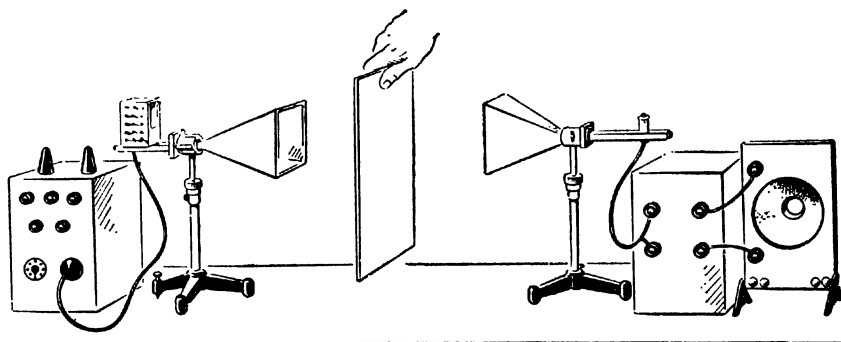


Рис. 259. Экранирующее действие проводников

менение громкости приема. Когда экран займет такое положение, при котором полностью закроет рупор генератора, приема не будет.

Повторяют опыт с экраном из изолирующего материала и убеждаются, что он не вызывает экранирующего действия.

## Опыт 202. Отражение электромагнитных волн

**Оборудование:** то же, что и в предыдущем опыте.

Цель опыта — показать, что электромагнитные волны хорошо отражаются от проводящих и хуже от изолирующих поверхностей.

Генератор и приемник сантиметровых волн устанавливают рядом друг с другом. Включив генератор, убеждаются в том, что электромагнитные волны, излучаемые генератором, не принимаются приемником.

На расстоянии 1—2 м от генератора ставят металлический экран (рис. 260, а) и наблюдают отчетливый прием отраженных волн.

Располагают генератор и приемник так, чтобы оси их волноводов пересекались на конце демонстрационного стола. Включив генератор, убеждаются в отсутствии приема. В точку пересечения осей волноводов ставят проводящий экран (рис. 260, б) и наблюдают отчетливый прием отраженных волн. Заменяют проводящий экран изолирующим и убеждаются, что отражение волн происходит хуже.

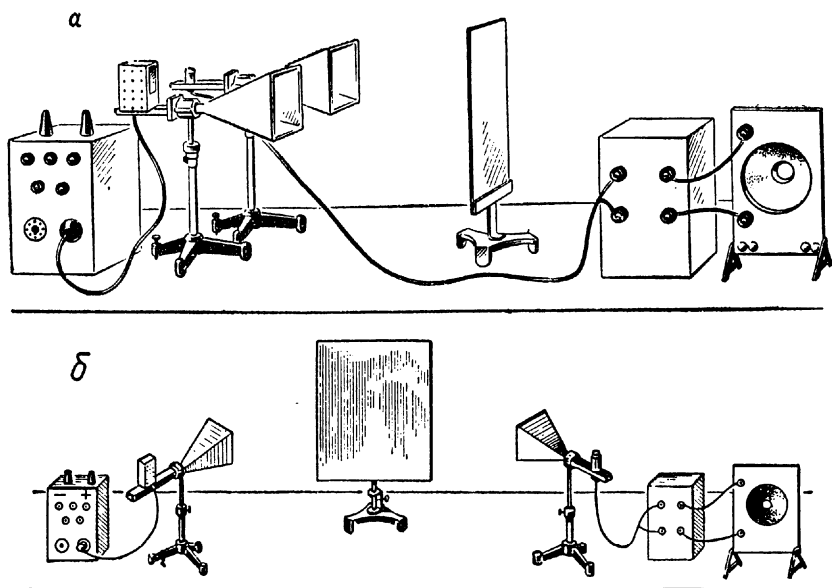


Рис. 260. Установка для демонстрации отражения электромагнитных волн:

а — 1-й вариант опыта; б — 2-й вариант опыта

### Опыт 203. Законы отражения электромагнитных волн

Оборудование: генератор СВЧ с принадлежностями, усилитель, динамик.

Собирают установку, изображенную на рисунке 261. Установив антенны генератора и приемника под углом  $30^\circ$  к горизонту, опу-

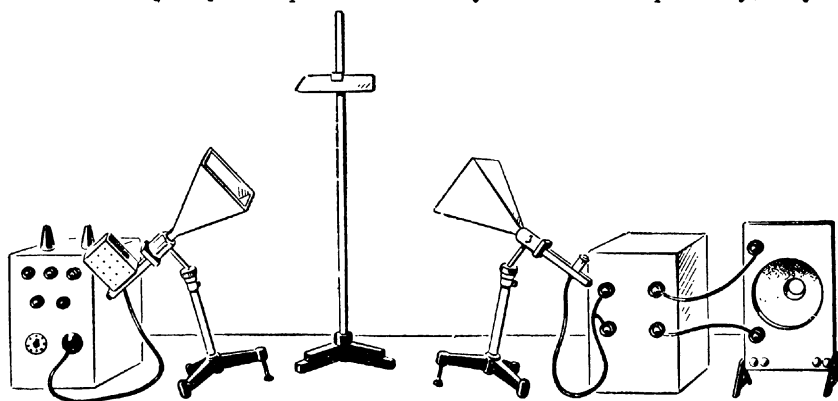


Рис. 261. Установка для демонстрации законов отражения электромагнитных волн

кают отражающую плоскость и наблюдают явление отражения электромагнитных волн. Изменив угол одной из антенн, убеждаются, что приема нет. Повторяют опыт при угле наклона антенны  $45^\circ$  и  $60^\circ$ .

На основании опыта делают вывод, что угол отражения электромагнитной волны равен углу падения.

Поворачивают приемную антенну так, чтобы ось волновода вышла из плоскости, в которой лежит ось волновода генератора и перпендикуляр, опущенный из точки падения волны. В этом положении прием нарушается. Делают вывод, что луч отраженный лежит в одной плоскости с лучом падающим и перпендикуляром, восстановленным в точку падения луча.

#### Опыт 204. Собирающее действие вогнутого зеркала

**Оборудование:** генератор СВЧ с принадлежностями, зеркало Пикте.

Приемник сантиметровых волн без рупора располагают на расстоянии 60—80 см от генератора. Включив генератор, наблюдают очень слабый прием посылаемых генератором колебаний. Ставят на расстоянии 20 см от приемника зеркало Пикте и, пододвигая его к приемнику, наблюдают усиление громкости принимаемого сигнала. Громкость достигает максимального звучания, когда приемник окажется в фокусе зеркала. При дальнейшем перемещении зеркала к приемнику громкость убывает.

Опыт свидетельствует о том, что электромагнитные волны, отражаясь от поверхности металлического зеркала, собираются в его фокусе.

#### Опыт 205. Преломление электромагнитных волн

**Оборудование:** генератор СВЧ с принадлежностями, аквариум из органического стекла, дистиллированная вода, динамик, усилитель.

Расположив генератор и приемник с разных сторон аквариума (рис. 262) так, чтобы оси их волноводов находились на одной пря-

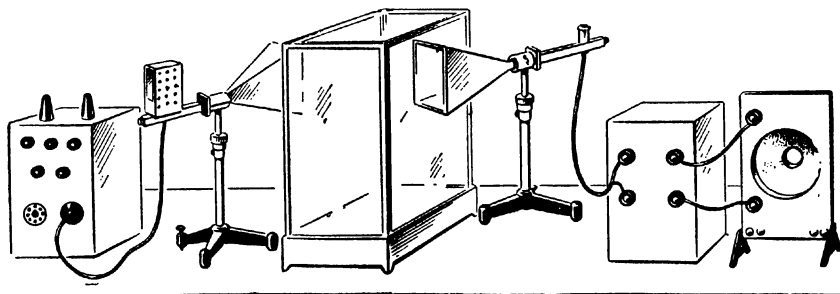


Рис. 262. Установка для демонстрации преломления электромагнитных волн

мой, включают генератор и наблюдают прием генерируемых передатчиков сигналов. Наполняют аквариум дистиллированной водой и отмечают исчезновение приема.

Перемещают приемник параллельно самому себе и наблюдают уверенный прием посылаемых сигналов. Чертят на доске ход электромагнитных волн через аквариум. Анализируя результаты опыта, приходят к выводу, что на границе двух диэлектриков электромагнитные волны преломляются.

Меняют угол падения электромагнитных волн и замечают соответственное изменение угла преломления. При перпендикулярном падении волн преломление не наблюдается.

Переместив приемник, убеждаются, что на границе двух диэлектриков происходит не только преломление электромагнитных волн, но и частичное отражение.

### О п ы т 206. Линзы для электромагнитных волн

**Оборудование:** генератор СВЧ с принадлежностями, две линзы из органического стекла, дистиллированная вода, динамик, усилитель.

Перед генератором на расстоянии 40—60 см устанавливают приемник без рупора и волновода. Включают генератор и наблюдают очень слабый прием излучаемых генератором электромагнитных волн. Перемещая приемник по столу, убеждаются, что громкость приема при этом не увеличивается. Установив приемник на прежнее место, вносят в пространство между генератором и приемником двояковыпуклую линзу (рис. 263). Замечают резкое увеличение

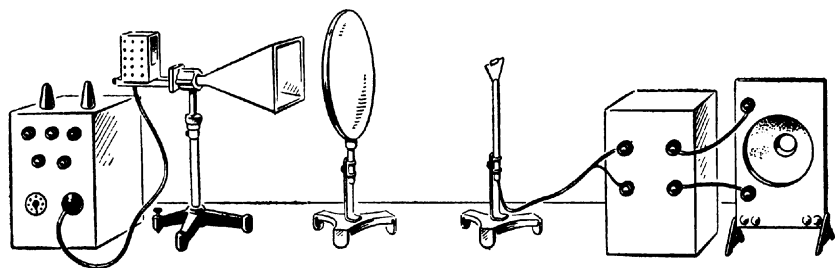


Рис. 263. Собирающее действие двояковыпуклой линзы

громкости. Передвигая линзу по столу, убеждаются, что есть одно положение, в котором громкость приема максимальная. Отодвигая приемник, убеждаются, что только в одном положении громкость приема максимальная, а в других положениях она меньше.

Заменяют двояковыпуклую линзу двояковогнутой и наблюдают уменьшение громкости.

Опыт свидетельствует о собирающем действии двояковыпуклой линзы и рассеивающем действии двояковогнутой.

Следует заметить, что опыт должен быть тщательно отработан до урока. Размещение приборов должно быть предварительно отмечено на демонстрационном столе.

### Опыт 207. Преломление электромагнитных волн в призме

**Оборудование:** генератор СВЧ с принадлежностями, призма, динамик, усилитель.

Пучок электромагнитных волн, излучаемых генератором, фокусируется с помощью линзы на приемный диполь. При включении генератора наблюдают громкий прием.

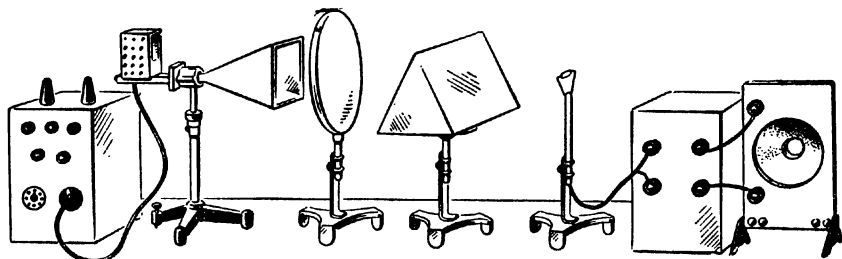


Рис. 264. Прохождение электромагнитных волн через призму из диэлектрика

Установив между приемным диполем и линзой призму (рис. 264), наполненную дистиллированной водой, наблюдают прекращение приема. Опустив приемный диполь на несколько сантиметров в сторону основания призмы, находят точку, в которой наблюдается уверенный прием.

Опыт свидетельствует о том, что электромагнитные волны, проходя через призму, преломляются, отклоняясь от первоначального направления в сторону основания.

### Опыт 208. Интерференция электромагнитных волн

**Оборудование:** генератор СВЧ с принадлежностями, две металлические ширмы.

Цель опыта — показать интерференцию электромагнитных волн в наиболее простом для понимания виде.

Две металлические плоские ширмы устанавливают на конце стола так, чтобы одна из них служила продолжением другой. На расстоянии 60—70 см от них устанавливают генератор так, чтобы геометрическая ось его волновода проходила через линию соприкосновения ширм, а угол между осью волновода и перпендикуляром к ширме был 20—30°. Аналогично располагают приемник (рис. 265). В ходе опыта приемник необходимо перемещать по дуге окружнос-



ти вокруг линии соприкосновения ширм. Поэтому он установлен не в штативе, а на стойке от штатива, которая служит радиусом вращения.

Собрав установку, включают генератор и наблюдают отчетливый прием отраженных от ширм волн. Сдвигают ширмы, чтобы они образовали угол, близкий к  $180^\circ$ . При этом слышимость сигналов не изменится.

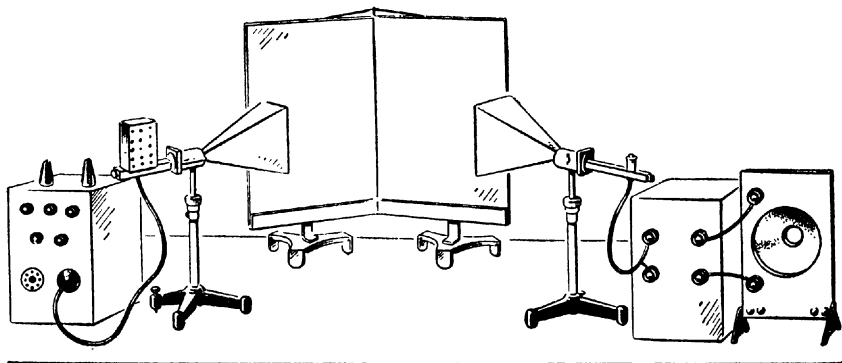


Рис. 265. Установка для интерференции электромагнитных волн

Медленно передвигая приемник по дуге постоянного радиуса, наблюдают зону интерференции, в которой участки с хорошей слышимостью принимаемого сигнала чередуются с участками, где слышимость сигнала падает почти до нуля.

Опыт свидетельствует об интерференции электромагнитных волн, отраженных от металлических ширм. Позже, при изучении оптики, аналогичный опыт будет показан со световыми волнами.

#### О п ы т 209. Стоячие электромагнитные волны

**Оборудование:** генератор СВЧ с принадлежностями, динамик, усилитель, металлическая ширма.

Перед генератором сверхвысокой частоты на расстоянии 1—1,5 м устанавливают металлическую плоскую ширму, а между ними — приемный диполь без рупора (рис. 266).

Включив генератор, медленно перемещают диполь по прямой линии до получения наибольшей слышимости передаваемого сигнала. Затем медленно перемещают ширму вперед и назад в пределах 3 см, добиваясь максимального звучания принимаемого сигнала.

После этого медленно перемещают приемный диполь по прямой линии и наблюдают зоны максимальной слышимости и зоны почти полного затухания. Отмечают точки с максимальной и минимальной слышимостью. Чертят график слышимости на доске и обращают внимание на то, что наблюдаемая картина имеет характер стоя-

чей волны, полученной в результате сложения падающей и отраженной волн.

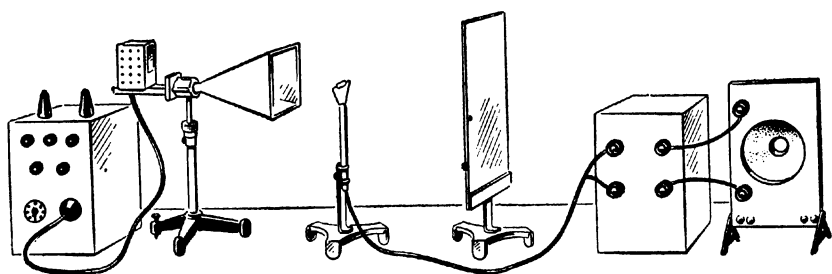


Рис. 266. Установка для демонстрации стоячих электромагнитных волн

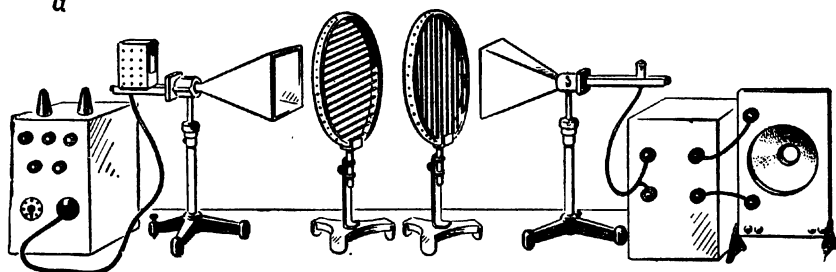
Демонстрация требует тщательной подготовки перед уроком. На уроке надо лишь по заранее найденным и отмеченным (незаметно для глаз учащихся) точкам повторить поставленный до урока опыт.

### Опыт 210. Поляризация электромагнитных волн

Оборудование: генератор СВЧ с принадлежностями.

Между генератором и приемником сантиметровых волн располагают поляризационные решетки таким образом, чтобы излучае-

а



б

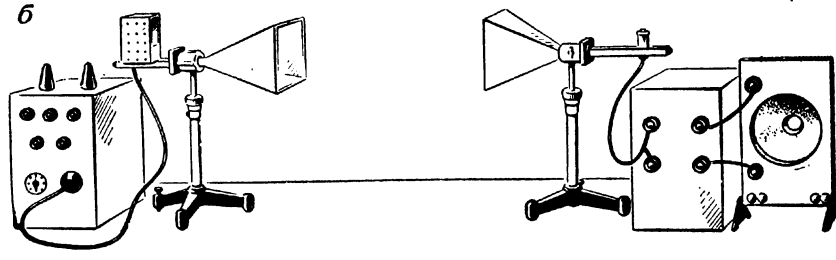


Рис. 267. Установка для поляризации электромагнитных волн:

а — 1-й опыт; б — 2-й опыт

мые генератором электромагнитные волны проходили через них, достигали приемника и принимались им (рис. 267, а). Затем одну из поляризационных решеток медленно вращают и наблюдают ослабление громкости принимаемого сигнала. При взаимно перпендикулярном положении решеток волны не проходят и сигнал не принимается.

Убирают одну из решеток и повторяют опыт. Убеждаются, что волны, излучаемые генератором, поляризованы. Это дает возможность поставить опыт по поляризации волн без применения поляризационных решеток. Для этого устанавливают приемник против генератора и наблюдают прием посылаемых генератором сигналов. Затем медленно поворачивают одну из антенн (безразлично какую) вокруг оси волновода (рис. 267, б) и отмечают уменьшение громкости принимаемого сигнала. При взаимно перпендикулярном расположении осей поляризации волноводов приема нет. Явление поляризации свидетельствует о поперечном характере электромагнитных волн.

### Опыт 211. Дифракция электромагнитных волн

**Оборудование:** генератор СВЧ с принадлежностями.

Описанные ниже опыты касаются наиболее сложного для понимания учащимися свойства электромагнитных волн. Поэтому целесообразно перед каждым из опытов продемонстрировать аналогичные опыты с помощью проекционной ванны. Постановка этих опытов общеизвестна, и они нами не описываются.

1. Между генератором и приемником, находящимися на расстоянии 1 м друг от друга, устанавливают металлическую ширму размером  $20 \times 30$  см (рис. 268, а) и наблюдают отсутствие приема за ширмой. Медленно перемещая приемник по дуге окружности вокруг ширмы, убеждаются, что тень, отбрасываемая ширмой, по размерам несколько больше самой ширмы.

Заменяют широкую ширму узкой, а приемник с рупором — приемником без рупора. Повторяя опыт, наблюдают прием сигналов за ширмой, что свидетельствует о «загибании» волн за края ширмы.

2. Пододвигают приемник к передатчику на расстояние 60—80 см и ставят между ними две металлические ширмы так, чтобы они образовали щель (рис. 268, б). Ширина щели должна быть равна длине волны (3 см). Включив генератор, слышат громкое звучание динамика в точке, расположенной против щели. Перемещая медленно приемник по дуге окружности вокруг щели, наблюдают уменьшение громкости принимаемого сигнала по мере удаления от средней точки. Опыт свидетельствует о загибании волн за края ширм.

3. В предыдущей установке раздвигают ширмы на 11—12 см и в получившийся промежуток устанавливают узкую ширму так, что образуются две одинаковые щели шириной, несколько больше,

чем длина волны (рис. 268, в). Медленно передвигая приемник по дуге окружности вокруг узкой ширмы, наблюдают три участка громкого приема, разделенные участками, где приема почти нет. На сред-

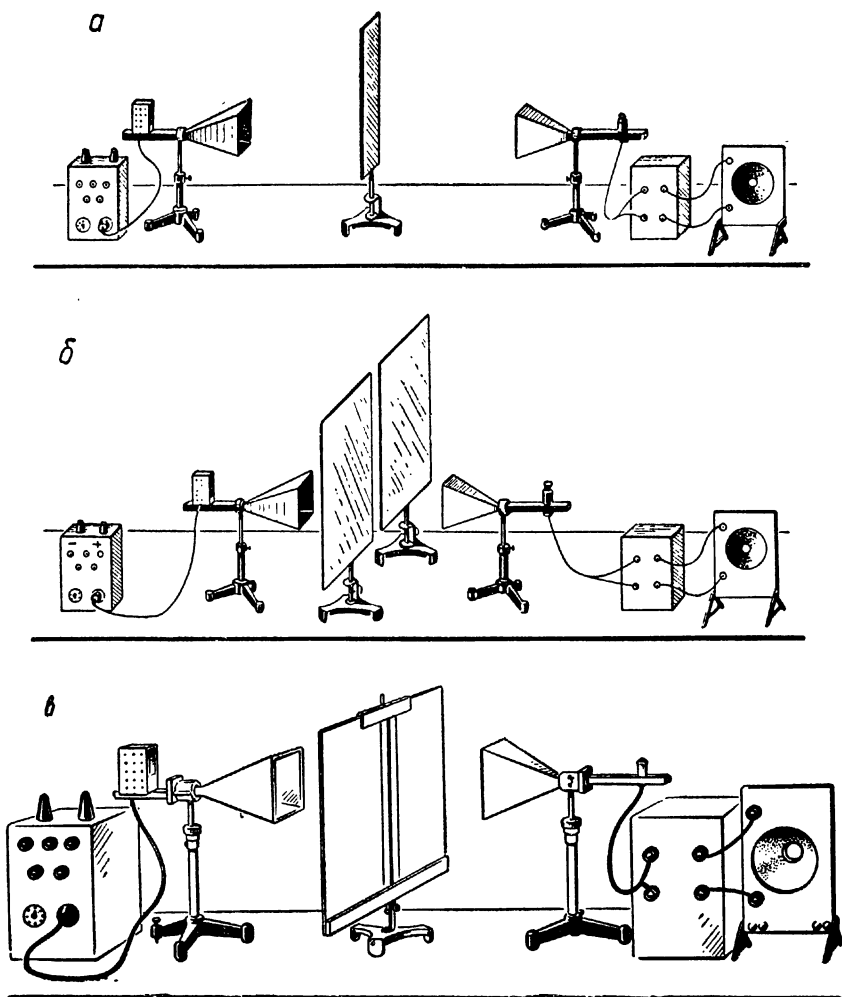


Рис. 268. Установка для дифракции электромагнитных волн:

а — от пластинки; б — от щели; в — от двух щелей

нем участке громкость приема несколько больше, чем на соседних. Обращают внимание учащихся на то, что ширина боковых участков громкого приема значительно больше ширины центральной полосы.

## ЛИТЕРАТУРА

1. В а к у ш и н с к и й В. Н., Анализ физических опытов и приборов. Известия АПН РСФСР, № 56, 1954.
2. Б а р а н о в с к и й В. И., Электронно-лучевые трубки, Госэнергоиздат, 1961.
3. Б е ж е н ц е в М. В., Техника и методика лекционного эксперимента по курсу физики, ОНТИ, 1938.
4. Б е л о в К. П., Упругие, тепловые и электрические явления в ферромагнетиках, ГИТТЛ, 1957.
5. Б е с с о н о в Л. А., Теоретические основы электротехники, Высшая школа, 1961.
6. Б р о н О. Б., Поле как вид материи, Госэнергоиздат, 1962.
7. Б у р о в В. А., Демонстрационный термометр сопротивления, «Физика в школе», 1961, № 2.
8. Б у р о в В. А., Комплект полупроводниковых приборов, «Физика в школе», 1951, № 6.
9. В а й н ш т е й н Л. А., Электромагнитные волны, «Советское радио», 1957.
10. В л а с о в А. А., Макроскопическая электродинамика, ГИТТЛ, 1955.
11. В и ш е н ч у к И. М. и др., Электронно-лучевой осциллограф и его применение в измерительной технике, ГИТТЛ, 1957.
12. Г а л а н и н Д. Д., Г о р я ч к и н Е. Н. и др., Физический эксперимент в школе, т. III и IV, Учпедгиз, 1951.
13. Г е р а с и м е н к о Т. Ф., Электрический ток в газах и вакууме, Учпедгиз, 1957.
14. Г о в о р к о в В. А., Электрические и магнитные поля, Госэнергоиздат, 1960.
15. Г о л ь д ш т е й н Л. Д., З е р н о в И. В., Электромагнитные поля и волны, ГИТТЛ, 1956.
16. Г р а б о в с к и й М. А., Магнетизм, лекционные демонстрации по курсу физики, ГИТТЛ, 1949.
17. Д о р ф м а н Я. Г., Беседы о магнетизме, АН СССР, 1950.
18. Д о р ф м а н Я. Г., Магнитные свойства и строение вещества, 1955.
19. Е л и з а р о в К. Н., Основы учения об электрическом поле, Учпедгиз, 1959.
20. Е л и з а р о в К. Н., Переменный ток в курсе физики средней школы, Учпедгиз, 1958.
21. Е л и з а р о в К. Н., Электромагнитные колебания и волны в курсе физики средней школы, Учпедгиз, 1954.
22. Ж е р е х о в Г. И., Демонстрация принципов действия технических установок, «Физика в школе», 1953, № 4.

23. З в о р ы к и н Б. С., Электромагнитные колебания и волны в курсе физики средней школы, АПН, 1955.
  24. З н а м е н с к и й П. А., Методика преподавания физики в средней школе, Учпедгиз, 1947.
  25. З о м м е р ф е л ь д А., Электродинамика, ИЛ, 1958.
  26. И в а н о в А. И., Изучение переменного тока, Учпедгиз, 1962.
  27. К а л а ш н и к о в С. Г., Электричество, ГИТТЛ, 1956.
  28. К а л а ш н и к о в А. М., Степук Я. В., Основы радиотехники, Воениздат, 1959.
  29. К а у ф м а н М. С. и Я н к и н Г. М., Электронные приборы, Госэнергоиздат, 1960.
  30. К и т а й г о р о д с к и й А. И., Введение в физику, Физматгиз, 1959.
  31. К и р е н с к и й Л. В., Ферромагнетизм и его применение, Учпедгиз, 1957.
  32. К у з ь м и н А. П., П о к р о в с к и й А. А., Опыты по физике с проекционной аппаратурой, Учпедгиз, 1962.
  33. М а л ы ш е в И. М., Изложение темы «Электромагнитная индукция», Учпедгиз, 1953.
  34. М а р т и н Т. Л., Физические основы электротехники, Госэнергоиздат, 1961.
  35. Н е й м а н Л. Р., К о л о н т а р о в П. Л., Теоретические основы электротехники, Госэнергоиздат, 1948.
  36. Н и к о л ь с к и й В. В., Теория электромагнитного поля, «Высшая школа», 1961.
  37. О р л о в П. П., Самодельная электронная аппаратура и опыты с ней, Учпедгиз, 1960.
  38. П и н с к и й, Изучение переменного тока в курсе физики средней школы, АПН, 1958.
  39. П р е с м а н А. С., Сантиметровые волны, Госэнергоиздат, 1954.
  40. П о к р о в с к и й А. А. и др., Демонстрационные опыты по физике в VI—VII классах средней школы, Учпедгиз, 1958.
  41. Р а б к и н Л. И., Высокочастотные ферромагнетики, Физматгиз, 1960.
  42. Р ы м к е в и ч П. А., К методике изложения законов тока, «Физика в школе», 1952, № 4.
  43. Р ы м к е в и ч П. А., Повторение курса физики в 10 классе, Учпедгиз, 1957.
  44. Р ы з а н о в Р. А., Лекционные опыты по теории электромагнитного поля, ГИТТЛ, 1952.
  45. Т а м м И. Е., Основы теории электричества, ГИТТЛ, 1957.
  46. Т е л е с н и н Р. В., Электричество, лекционные демонстрации по физике, ГИТТЛ, 1952.
  47. У ш а к о в М. А., К изучению законов электрического тока, Учпедгиз, 1953.
  48. У ш а к о в М. А., Изучение трехфазного тока в школе, Учпедгиз, 1955.
  49. Х а й к и н С. Э., Электромагнитные колебания и волны, Госэнергоиздат, 1959.
  50. Т а н е л л а М. А., Основы электромагнетизма и теория относительности, ИЛ, 1962.
  51. Ц а р е в Б. М., Контактная разность потенциалов, ГИТТЛ, 1955.
  52. Ш п р о к х о ф Г., Эксперимент по курсу элементарной физики, 4, Учпедгиз, 1960.
-

## ОГЛАВЛЕНИЕ

<i>Предисловие</i> . . . . .	3
------------------------------	---

### ГЛАВА I

#### Оборудование для демонстрационных опытов по электричеству

§ 1. Универсальный выпрямитель . . . . .	5
§ 2. Модели аналогии для объяснения сущности процессов, происходящих в электрической цепи . . . . .	8
§ 3. Комплект приборов для изучения магнитного поля . . . . .	14
§ 4. Демонстрационный осциллограф . . . . .	20
§ 5. Электронный переключатель к осциллографу . . . . .	24
§ 6. Демонстрационные амперметр, вольтметр и ваттметр . . . . .	26
§ 7. Комплект приборов для изучения свойств электромагнитных волн . . . . .	28

### ГЛАВА II

#### Электрические заряды. Электрическое поле

§ 1. Условия, обеспечивающие успешное проведение электростатических опытов . . . . .	39
§ 2. Электризация тел. Электрический заряд . . . . .	41
Опыт 1. Электризация тел . . . . .	—
Опыт 2. Притяжение наэлектризованным телом не наэлектризованных тел . . . . .	42
Опыт 3. Проводники и изоляторы . . . . .	45
Опыт 4. Взаимодействие наэлектризованных тел . . . . .	—
Опыт 5. Объяснение устройства и принципа действия электроскопа . . . . .	46
Опыт 6. Делимость электричества . . . . .	47
Опыт 7. Распределение зарядов на проводнике . . . . .	—
Опыт 8. Полная передача заряда проводником . . . . .	48
Опыт 9. Два рода электрических зарядов . . . . .	—
Опыт 10. Одновременная электризация двух соприкасающихся тел . . . . .	49
Опыт 11. Явление электростатической индукции . . . . .	50
Опыт 12. Пьезоэлектричество . . . . .	51
Опыт 13. Распределение зарядов на поверхности проводника . . . . .	52
Опыт 14. Заряды на остриях. Электрический ветер . . . . .	—
§ 3. Закон Кулона . . . . .	53
Опыт 15. Проверка закона Кулона . . . . .	54
§ 4. Электрическое поле . . . . .	56
Опыт 16. Проявления электрического поля . . . . .	—
Опыт 17. Напряженность электрического поля точечного заряда . . . . .	59
Опыт 18. Напряженность электрического поля между двумя длинными пластинами . . . . .	60

Опыт 19. Экранирующее действие проводников . . . . .	61
Опыт 20. Поляризация диэлектрика . . . . .	—
Опыт 21. Энергия электростатического поля . . . . .	62
Опыт 22. Измерение разности потенциалов . . . . .	64
Опыт 23. Потенциал заряженного проводника . . . . .	65
§ 5. Емкость . . . . .	66
Опыт 24. Измерение емкости . . . . .	67
Опыт 25. Емкость плоского конденсатора . . . . .	69
Опыт 26. Устройство конденсатора постоянной емкости . . . . .	70
Опыт 27. Устройство конденсатора переменной емкости . . . . .	71
Опыт 28. Параллельное соединение конденсаторов . . . . .	—
Опыт 29. Последовательное соединение конденсаторов . . . . .	73
Опыт 30. Энергия заряженного конденсатора . . . . .	74

### ГЛАВА III

#### Электрический ток в металлах. Законы постоянного тока

§ 1. Особенности эксперимента по законам постоянного тока. . . . .	76
§ 2. Условия существования электрического тока в цепи. Электронная проводимость металлов . . . . .	78
Опыт 31. Движение электрических зарядов . . . . .	79
Опыт 32. Условие, необходимое для существования постоянного тока в проводнике . . . . .	81
Опыт 33. Отличие электростатического поля от электрического поля в проводнике при протекании постоянного тока . . . . .	82
Опыт 34. Электронная проводимость металлов . . . . .	84
Опыт 35. Электрический ток в металлах . . . . .	86
§ 3. Электрическая цепь. Энергетические преобразования в электрической цепи постоянного тока . . . . .	—
Опыт 36. Электрическая цепь. Гидродинамическая аналогия электрической цепи . . . . .	87
Опыт 37. Механическая модель для объяснения процессов, происходящих в электрической цепи постоянного тока . . . . .	90
§ 4. Сопротивление проводников. Закон Ома для участка цепи . . . . .	92
Опыт 38. Зависимость сопротивления от материала, длины и сечения проводника . . . . .	—
Опыт 39. Закон Ома для участка цепи . . . . .	94
Опыт 40. Зависимость сопротивления металлических проводников от температуры . . . . .	99
§ 5. Соединения проводников . . . . .	101
Опыт 41. Последовательное и параллельное соединения проводников . . . . .	102
Опыт 42. Мостик Уитстона . . . . .	104
Опыт 43. Шунтирование амперметра . . . . .	107
Опыт 44. Добавочное сопротивление к вольтметру . . . . .	109
Опыт 45. Реостаты . . . . .	110
Опыт 46. Потенциометрическое включение реостата в цепь . . . . .	112
§ 6. Закон Ома для полной цепи . . . . .	113
Опыт 47. ЭДС и внутреннее сопротивление источника тока . . . . .	114
Опыт 48. Закон Ома для полной цепи . . . . .	115
Опыт 49. Различие между электродвижущей силой источника и напряжением . . . . .	118
Опыт 50. Соединение элементов в батареи . . . . .	120
§ 7. Работа и мощность электрического тока. Закон Джоуля-Ленца . . . . .	121
Опыт 51. Работа электрического тока . . . . .	124
Опыт 52. Мощность электрического тока . . . . .	125
Опыт 53. Измерение мощности тока. Ваттметр . . . . .	126
Опыт 54. Закон Джоуля-Ленца . . . . .	128



§ 8. Термоэлектричество . . . . .	130
Опыт 55. Термопара . . . . .	—
Опыт 56. Термостолбик . . . . .	131

## ГЛАВА IV

### Электронные явления в вакууме

§ 1. Некоторые методические замечания по теме «Электронные явления в вакууме» . . . . .	133
§ 2. Описание опытов . . . . .	134
Опыт 57. Явление термоэлектронной эмиссии . . . . .	—
Опыт 58. «Механизм» термоэлектронной эмиссии . . . . .	136
Опыт 59. Односторонняя проводимость диода . . . . .	—
Опыт 60. Ламповый выпрямитель . . . . .	138
Опыт 61. Кенотронный выпрямитель . . . . .	139
Опыт 62. Роль сетки в трехэлектродной лампе . . . . .	142
Опыт 63. Характеристика триода . . . . .	143
Опыт 64. Усилительные свойства электронной лампы. . . . .	145
Опыт 65. Применение трехэлектродных ламп в схемах усилителей . . . . .	148
Опыт 66. Электронный прожектор в электронно-лучевой трубке . . . . .	149
Опыт 67. Управление электронным пучком . . . . .	151
Опыт 68. Применение электронно-лучевой трубки. Осциллограф . . . . .	152

## ГЛАВА V

### Электрический ток в электролитах

§ 1. Ионная проводимость электролитов . . . . .	154
Опыт 69. Отсутствие тока в цепи, когда электроды опущены в сосуд с дистиллированной водой . . . . .	155
Опыт 70. Электропроводность раствора серной кислоты . . . . .	156
Опыт 71. Движение ионов в электрическом поле . . . . .	157
Опыт 72. Электролиз медного купороса . . . . .	158
Опыт 73. Изменение сопротивления электролитов при нагревании . . . . .	160
Опыт 74. Проводимость стекла при размягчении . . . . .	—
§ 2. Химические источники электрического тока. Технические применения электролиза . . . . .	161
Опыт 75. Различные элементы . . . . .	162
Опыт 76. Принцип действия аккумулятора . . . . .	164
Опыт 77. Применение электролиза в технике . . . . .	165

## ГЛАВА VI

### Электрический ток в газах

§ 1. Природа электрического тока в газах . . . . .	166
Опыт 78. Разряд электроскопа под действием внешнего ионизатора . . . . .	—
Опыт 79. Несамостоятельный и самостоятельный разряды в газах . . . . .	168
Опыт 80. Зависимость тока в газовом промежутке от напряжения . . . . .	170
§ 2. Различные виды электрических разрядов в газе при атмосферном давлении . . . . .	172
Опыт 81. Коронный разряд . . . . .	—
Опыт 82. Электрофилтр . . . . .	173
Опыт 83. Искровой разряд . . . . .	175
Опыт 84. Электроискровая обработка металлов . . . . .	—
Опыт 85. Дуговой разряд . . . . .	177
Опыт 86. Электросварка . . . . .	178
§ 3. Электрический разряд в газах при пониженном давлении. . . . .	179

Опыт 87. Прохождение электрического тока через воздух при постепенном его разрежении. Тлеющий разряд . . . . .	179
Опыт 88. Шкала пустот . . . . .	181
Опыт 89. Неоновая лампа и газосветные трубки . . . . .	182
Опыт 90. Прямолинейное распространение пучка электронов . . . . .	183
Опыт 91. Отклонение пучка электронов в магнитном и электрическом полях . . . . .	185
Опыт 92. Энергия пучка электронов . . . . .	186
Опыт 93. Люминесцентная лампа . . . . .	187

## ГЛАВА VII

### Основные свойства полупроводников

§ 1. Сопротивление полупроводников . . . . .	189
Опыт 94. Зависимость сопротивления полупроводника от температуры . . . . .	190
Опыт 95. Термосопротивления . . . . .	—
Опыт 96. Применение термосопротивлений . . . . .	192
Опыт 97. Изменение сопротивления полупроводника при его освещении . . . . .	194
Опыт 98. Устройство фотосопротивлений . . . . .	—
Опыт 99. Использование фотосопротивлений в технике . . . . .	195
Опыт 100. Электронное фотореле . . . . .	—
§ 2. Механизм электропроводности полупроводников . . . . .	196
Опыт 101. Демонстрация кинофрагмента «Собственная проводимость полупроводников» . . . . .	199
Опыт 102. Демонстрация кинофрагмента «Примесная проводимость полупроводников» . . . . .	200
§ 3. Полупроводниковые выпрямители. . . . .	—
Опыт 103. Демонстрация кинофрагмента «Механизм образования запирающего слоя» . . . . .	201
Опыт 104. Устройство полупроводниковых вентилялей . . . . .	—
Опыт 105. Однополупериодный выпрямитель . . . . .	202
Опыт 106. Двухполупериодный выпрямитель . . . . .	203
Опыт 107. Мостовая схема выпрямителя . . . . .	204
Опыт 108. Сглаживающий фильтр . . . . .	205
§ 4. Полупроводниковые усилители . . . . .	205
Опыт 109. Демонстрация кинофрагмента «Полупроводниковый триод» . . . . .	210
Опыт 110. Принцип работы транзистора . . . . .	—
Опыт 111. Простейший полупроводниковый усилитель . . . . .	211
Опыт 112. Усилитель с общим эмиттером . . . . .	212
Опыт 113. Усилитель к детекторному приемнику . . . . .	—
Опыт 114. Двухкаскадный усилитель . . . . .	213
§ 5. Полупроводниковый термоэлемент . . . . .	214
Опыт 115. Простейший термогенератор . . . . .	—
Опыт 116. Принцип работы полупроводникового холодильника . . . . .	215

## ГЛАВА VIII

### Магнитное поле

§ 1. Связь электрических и магнитных явлений . . . . .	217
§ 2. Вводные опыты . . . . .	219
Опыт 117. Одновременное существование электрического и магнитного полей постоянного тока . . . . .	—
Опыт 118. Магнитное поле постоянного тока . . . . .	220
Опыт 119. Магнитное поле постоянных магнитов . . . . .	221
Опыт 120. Магнитное поле конвекционных токов . . . . .	222

Опыт 121. Действие магнитного поля на электрические заряды	223
Опыт 122. Действие магнитного поля на железо . . . . .	224
Опыт 123. Картины магнитных полей . . . . .	225
§ 3. Взаимодействие параллельных токов . . . . .	—
Опыт 124. Установка для изучения взаимодействия параллельных токов . . . . .	226
§ 4. Индукция и напряженность магнитного поля . . . . .	229
Опыт 125. Введение понятия о магнитной индукции . . . . .	231
Опыт 126. Магнитное поле прямого тока . . . . .	—
Опыт 127. Магнитное поле катушки . . . . .	233
Опыт 128. Введение понятия о напряженности магнитного поля	235
Опыт 129. Соотношение между магнитной индукцией и напряженностью магнитного поля . . . . .	—
§ 5. Магнитные свойства веществ. . . . .	236
Опыт 130. Ферромагнетизм . . . . .	—
Опыт 131. Парамагнетизм . . . . .	237
Опыт 132. Диамагнетизм . . . . .	238
Опыт 133. Зависимость ферромагнитных свойств от температуры	—
Опыт 134. Нагревание ферромагнетика при циклическом намагничивании . . . . .	239
Опыт 135. Демонстрация петли гистерезиса . . . . .	240
Опыт 136. Эффект Боркгаузена . . . . .	241
Опыт 137. Процесс намагничивания ферромагнетика . . . . .	242
Опыт 138. Магнитная цепь . . . . .	244
Опыт 139. Магнитная экранировка . . . . .	245
Опыт 140. Демонстрация учебного кинофильма «Электромагниты и их применение» . . . . .	246
§ 6. Движение заряженных частиц в магнитном поле . . . . .	—
Опыт 141. Движение электронов в магнитном поле . . . . .	247
Опыт 142. Движение ионов в магнитном поле . . . . .	—
Опыт 143. Магнитная линза . . . . .	248
Опыт 144. Электронно-лучевая трубка с магнитным управлением луча . . . . .	—
Опыт 145. Демонстрация фрагмента из учебного кинофильма «Электронно-лучевая трубка» . . . . .	249

## ГЛАВА IX

### Явление электромагнитной индукции.

§ 1. Понятие об индуцированном электрическом поле . . . . .	250
§ 2. Вводные опыты . . . . .	251
Опыт 146. Получение индукционного тока при движении постоянного магнита относительно контура . . . . .	—
Опыт 147. Получение индукционного тока при изменении магнитной индукции . . . . .	—
Опыт 148. Получение индукционного тока при изменении площади контура, находящегося в постоянном магнитном поле	252
§ 3. Величина $\mathcal{E}$ , д. с. индуцированного электрического поля . . . . .	253
Опыт 149. Величина $\mathcal{E}$ , д. с. индуцированного поля . . . . .	—
§ 4. Закон Ленца . . . . .	254
Опыт 150. Демонстрации справедливости закона Ленца с помощью прибора Петровского . . . . .	—
Опыт 151. Демонстрация справедливости закона Ленца с помощью алюминиевого кольца и электромагнита . . . . .	255
Опыт 152. Демонстрация справедливости закона Ленца с помощью магнита, катушки и гальванометра . . . . .	256
§ 5. Явление самоиндукции . . . . .	257
Опыт 153. Самоиндукция при замыкании цепи . . . . .	—

Опыт 154.	Осциллограмма нарастания тока в цепи с катушкой	258
Опыт 155.	Самоиндукция при размыкании цепи	260
Опыт 156.	Осциллограмма э. д. с. самоиндукции при размыкании цепи	—
Опыт 157.	Явление самоиндукции при изменении тока в цепи	261
Опыт 158.	Величина э. д. с. самоиндукции	262
Опыт 159.	Энергия магнитного поля катушки	263
Опыт 160.	Искрогасящие устройства	265
§ 6.	Вихревой характер индуцированного электрического поля	266
Опыт 161.	Индукционные токи в массивных проводниках	—
Опыт 162.	Модель магнитного тахометра	267
Опыт 163.	Вихревой характер индуцированного электрического поля	268
Опыт 164.	Возникновение переменного магнитного поля при изменении электрического поля	269

## ГЛАВА X

### Переменный ток

§ 1.	Общие замечания	271
§ 2.	Основные свойства переменного тока	272
Опыт 165.	Индукционный генератор	—
§ 3.	Цепь переменного тока с активным сопротивлением	273
Опыт 166.	Введение понятия об активном сопротивлении	—
Опыт 167.	Ознакомление с принципом работы электронного переключателя	—
Опыт 168.	Фазовые соотношения в цепи с активным сопротивлением	274
§ 4.	Цепь переменного тока с емкостью	276
Опыт 169.	Емкостное сопротивление	—
Опыт 170.	Фазовые соотношения в цепи с емкостью	278
Опыт 171.	Закон Ома для цепи с емкостью	279
§ 5.	Цепь переменного тока с индуктивностью	—
Опыт 172.	Индуктивное сопротивление	—
Опыт 173.	Фазовые соотношения в цепи с индуктивностью	281
Опыт 174.	Закон Ома для цепи с индуктивностью	—
§ 6.	Цепь переменного тока со смешанным сопротивлением	282
Опыт 175.	Сопротивление цепи переменного тока со смешанной нагрузкой	—
Опыт 176.	Фазовые соотношения в цепи переменного тока со смешанной нагрузкой	283
Опыт 177.	Резонанс в последовательной цепи переменного тока	—
Опыт 178.	Резонанс в параллельной цепи переменного тока	285
Опыт 179.	Закон Ома для цепи переменного тока со смешанным сопротивлением	286
§ 7.	Мощность переменного тока	287
Опыт 180.	Мощность переменного тока	—
§ 8.	Использование переменного тока	289
Опыт 181.	Однофазный трансформатор	—
Опыт 182.	Вращающееся магнитное поле однофазного тока	290
Опыт 183.	Вращающееся магнитное поле трехфазного тока	—
Опыт 184.	Асинхронный двигатель	291
Опыт 185.	Повышение коэффициента мощности	—

## ГЛАВА XI

### Электромагнитные колебания и волны

§ 1.	О новом эксперименте в теме «Электромагнитные колебания и волны»	293
§ 2.	Электромагнитные колебания	294
Опыт 186.	Получение свободных электромагнитных колебаний	—

Опыт 187. Частота свободных электромагнитных колебаний . . .	295
Опыт 188. Ламповый генератор . . . . .	296
§ 3. Некоторые свойства токов высокой частоты . . . . .	297
Опыт 189. Поверхностный эффект . . . . .	—
Опыт 190. Высокочастотная сушка . . . . .	298
Опыт 191. Свечение безэлектродных газонаполненных трубок в электромагнитном поле высокой частоты . . . . .	299
§ 4. Электромагнитные волны в проводах . . . . .	—
Опыт 192. Короткая линия переменного тока . . . . .	—
Опыт 193. Длинная линия переменного тока . . . . .	300
§ 5. Свободные электромагнитные волны . . . . .	302
Опыт 194. Открытый колебательный контур. Излучающая и приемные антенны . . . . .	—
Опыт 195. Скорость распространения электромагнитного поля в дистиллированной воде . . . . .	304
Опыт 196. Принцип радиотелеграфной передачи . . . . .	—
Опыт 197. Принцип радиуправления . . . . .	—
Опыт 198. Принцип амплитудной модуляции . . . . .	305
Опыт 199. Принцип передачи модулированных сигналов . . . . .	307
Опыт 200. Генератор сантиметровых волн . . . . .	308
Опыт 201. Экранирующее действие проводников . . . . .	310
Опыт 202. Отражение электромагнитных волн . . . . .	—
Опыт 203. Законы отражения электромагнитных волн . . . . .	311
Опыт 204. Собирающее действие вогнутого зеркала . . . . .	312
Опыт 205. Преломление электромагнитных волн . . . . .	—
Опыт 206. Линзы для электромагнитных волн . . . . .	313
Опыт 207. Прохождение электромагнитных волн через призму . . . . .	314
Опыт 208. Интерференция электромагнитных волн . . . . .	—
Опыт 209. Стоячие электромагнитные волны . . . . .	315
Опыт 210. Поляризация электромагнитных волн . . . . .	316
Опыт 211. Дифракция электромагнитных волн . . . . .	317
Литература . . . . .	319

*Николай Михайлович Шахмаев*  
*Самуил Ефимович Каменецкий*

ДЕМОНСТРАЦИОННЫЕ ОПЫТЫ  
ПО ЭЛЕКТРИЧЕСТВУ

Редактор *Н. И. Сидоров*  
Обложка художника *Г. С. Богачева*  
Художественный редактор *В. В. Черепанов*  
Технический редактор *Т. Н. Зыкина*

---

Сдано в набор 16/II-1963 г. Подписано к печати 16/IX-1963 г. 60×90<sup>1/16</sup>. Печ. л. 20,5. Уч.-изд. л. 18,87. Тираж 17 тыс. экз. А06868.

Учпедгиз. Москва, 3-й проезд Марьиной  
рощи, 41.

Полиграфкомбинат Приволжского  
совнархоза,  
г. Саратов, ул. Чернышевского, 59.  
Заказ 310.

Цена без переплета 51 коп., переплет 15 коп.



667.