



Методика преподавания физики



М

етодика
преподавания
физики



**Методика
преподавания
физики
в средней школе**

**Молекулярная физика.
Основы электродинамики**

Пособие для учителей



МОСКВА «ПРОСВЕЩЕНИЕ» 1975

*Рекомендовано к изданию Главным управлением школ
Министерства просвещения СССР*

Авторский коллектив:

*Зворыкин Б. С., Коварский Ю. А., Куперман Г. Б., Резников Л. И.,
Шамаш С. Я., Щукин Е. Д., Эвенчик Э. Е.
под руководством С. Я. Шамаша.*

**М54 Методика преподавания физики в средней школе.
Молекулярная физика. Основы электродинамики. По-
сobie для учителей. М., «Просвещение», 1975.**

256 с. с ил. (Метод. б-ка школы).

На обороте тит. л. авт.: Зворыкин Б. С., Коварский Ю. А.,
Куперман Г. Б., Резников Л. И., Шамаш С. Я., Щукин Е. Д.,
Эвенчик Э. Е.

В книге изложены основные физические и методические идеи нового
содержания разделов «Молекулярная физика» и «Основы электродинамики»
(IX класс общеобразовательной школы), дана конкретная методика изложе-
ния основных вопросов этих разделов.

53(07)

М $\frac{60501-625}{103(03)-75}$ (подписное)

ПРЕДИСЛОВИЕ

Данное пособие представляет собой вторую книгу¹ по методике преподавания физики в средней школе, созданной коллективом сотрудников лаборатории обучения физике Научно-исследовательского института содержания и методов обучения Академии педагогических наук СССР. Эта книга посвящена преподаванию молекулярной физики и электродинамики.

В пособии рассмотрены физические и методические идеи изложения указанных разделов курса физики. Эти идеи рассмотрены в начале соответствующих частей книги — в главах I и VIII. В вводных параграфах к главам пособия дан анализ понятий, законов, а в ряде случаев и последовательность изложения темы.

Основное содержание книги составляет изложение конкретной методики изучения указанных разделов, решение и подбор типовых задач, указания к использованию учебных кинофильмов, а также описание демонстрационного эксперимента, на который опирается изложение учебного материала².

В настоящем пособии рассмотрены все основные вопросы курса физики IX класса. Трактовка понятий, законов, а также последовательность их изложения в основном совпадают с принятой в учебном пособии³.

¹ Первая книга: Резников Л. И., Шамаш С. Я. и Эвентик Э. Е. Методика преподавания физики в средней школе. Механика. М., 1974.

² В книге приведены ссылки на двухтомное пособие: Демонстрационный эксперимент по физике в старших классах средней школы, под ред. А. А. Покровского, т. I и II. М., 1971, 1972. Такие ссылки даны в сокращенном виде: в квадратных скобках указаны начальные буквы названия книги, номер тома и опыта. Например: [ДЭ, II, опыт 55].

³ См.: Буховцев Б. Б., Климонтович Ю. Л., Мякишев Г. Я. Физика, учебное пособие для девятого класса. Изд. 5-е, переработ. М., 1975. (Далее в книге это учебное пособие иногда будет называться «Физика, 9».)

Более подробно изложена методика тех тем и отдельных вопросов программы, которые ранее не излагались в средней школе или которые трактуются по-новому.

Коллектив авторов данной книги в течение ряда лет исследовал проблему эффективности изучения нового содержания разделов «Молекулярная физика» и «Основы электродинамики» в средней школе: проверял качество знаний учащихся, разрабатывал и проводил практическую проверку методики изучения ряда наиболее сложных вопросов. Эти исследования послужили экспериментальной основой создания методического пособия. В них принимали участие московские учителя: С. С. Анисимова, Л. И. Белова, В. И. Гершман, Н. П. Евстигнеева, З. Д. Мусакина, Л. Г. Муковозов, М. Ф. Луцкий, В. А. Орлов, И. Б. Селиванович, А. З. Синяков, С. И. Удальцова, Л. В. Шлякова, И. Я. Фогельфельд. Авторы приносят им искреннюю благодарность.

В книге использованы многие идеи, высказанные академиком И. К. Кикоиным. Авторы приносят ему глубокую благодарность.

Авторы искренне благодарят также рецензентов, сделавших ценные замечания по рукописи, в особенности профессора Б. М. Яворского, доцентов А. И. Бугаева и А. А. Пинского, кандидатов педагогических наук С. Л. Вольштейна и Д. Л. Малобродского.

Пособие написали: Зворыкин Б. С. — главу IX; Коварский Ю. А. — главу XVII (§ 78—82, 87); Куперман Г. Б. — главу VII; Резников Л. И. — главы I, II, III, V, XVI, XVIII; Шамаш С. Я. — главы IV, VI, VIII, X, XI, XII, XIII, XIV, XV, XVII (§ 83—86); Щукин Е. Д. — главу VII; Эвенчик Э. Е. — главы IV, VI, VIII, X, XI, XII, XIII, XIV, XV.

Работа над созданием книги велась под руководством С. Я. Шамаша.

Часть I

МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА

Глава I

ОСНОВЫ МОЛЕКУЛЯРНОЙ ФИЗИКИ И УЧЕНИЯ О ТЕПЛОТЕ

§ 1. Физические и педагогические принципы изучения молекулярной физики

Переход от изучения механики к молекулярной физике и теплоте представляет собой принципиально новый этап в познавательной деятельности учащихся, в формировании и развитии их физического миропонимания, научного мировоззрения. Новое качество тепловых явлений по сравнению с механическими объясняется двумя факторами — дискретной структурой вещества и огромным числом взаимодействующих частиц (молекул, атомов, ионов). Поэтому объяснение тепловых явлений требует введения новых физических понятий, и в первую очередь таких, как температура, внутренняя энергия, тепловое равновесие, квазистатический процесс, направленность тепловых процессов, и закона сохранения и превращения энергии.

По сравнению с первой ступенью курса физики, ставящей целью заложить основы атомно-молекулярных представлений, новый этап в изучении молекулярной физики и теплоты характеризуется тремя отличительными особенностями: более широким охватом научных понятий и явлений, данных в строгой логической связи; количественным их описанием, в том числе свойств молекул; разъяснением и применением таких физических методов, как термодинамический и статистический.

Теплоту и молекулярную физику в средней школе изучают параллельно. Это педагогически обосновано. В самом деле, молекулярная физика как раздел школьного курса изучает упругомеханические и тепловые свойства тел, а также фазовые (агрегатные) превращения веществ в зависимости от их строения и взаимодействия между частицами. При этом устанавливаются связи макроскопических свойств материальной системы (упругость, давление газов, температура, внутренняя энергия, поверхностное натяжение и др.) с параметрами атомов и молекул (скорость движения, их по-

тенциальная и кинетическая энергия, концентрация частиц, силы, действующие между ними и т. п.). Изученные макроявления и процессы сразу получают молекулярно-кинетическое истолкование. В результате такого изучения проблема ученических вопросов «почему» получает свое естественное разрешение. При этом показывается мощь физических методов в изучении микромира, возможность его познания, проникновения в глубь вещества, предупреждаются возможные проявления догматических утверждений в передаче знаний. Органическое сочетание феноменологии и анализа явлений на микрофизическом уровне представляет собой перспективное направление методики физики, которое занимает все большее место в преподавании.

Одна из основных задач изучения тепловых явлений и молекулярной физики в старших классах — разъяснение сущности термодинамического и статистического методов и показ их всеобщности для физики, а не только для анализа тепловых явлений. (Конкретные примеры их применений в обучении будут приведены в последующих главах.)

Применение этих методов имеет глубокое методологическое и педагогическое значение. На основе термодинамических принципов без анализа микрофизических процессов рассматривают все тепловые явления. На основе статистического метода, исходя из дискретной структуры вещества (атомного, молекулярного) и параметров частиц, выводят общие законы поведения макротел, имеющие статистический смысл. Применение в обоих случаях как дедуктивного, так и индуктивного метода в обучении физике дает возможность развивать у учащихся логическое мышление, два способа рассуждений и умозаключений, прививать умение пользоваться дедукцией и индукцией.

Развитие термодинамического и статистического методов составило в истории физики большой период ожесточенной борьбы между ними. В этой борьбе отстаивалась молекулярно-кинетическая теория, одними из создателей которой были австрийский физик Людвиг Больцман (1844—1906) и английский физик Джеймс Клерк Максвелл (1831—1879). По поводу воззрений Л. Больцмана В. И. Ленин писал: «... его теория познания по существу дела материалистическая, и выражает она... мнение большинства естествоиспытателей»¹.

В настоящее время как в науке, так и в обучении термодинамический и статистический методы применяют в синтезе.

Новым качественным скачком в познавательной деятельности учащихся старших классов является переход от усвоения динамических закономерностей (однозначных причинно-следственных связей явлений), какими, в частности, являются законы классической механики, к пониманию статистических закономерностей, частными случаями которых являются законы молеку-

¹ Ленин В. И. Полн. собр. соч. Изд. 5-е, т. 18, с. 304.

лярно-кинетической теории газов с их понятиями о средних значениях физических величин и понятием вероятности.

В связи с увеличением объема научной информации, который необходимо изучить в курсе физики средней школы, встала задача объединения учебного материала вокруг все более общих физических принципов и методов, нахождения путей укрупнения «единиц усвоения» знаний. Применение термодинамического и статистического методов способствует решению этой педагогической задачи. Однако это совсем не означает, что в IX классе надо изучать термодинамику и статистическую физику как самостоятельные области физики, даже в небольшом объеме. Речь идет об ознакомлении учащихся лишь со сведениями о применяемых в физике методах и об иллюстрации их использования в частных случаях, на конкретных примерах (термодинамическое равновесие и абсолютная температура, связь теплопередачи и работы, понятие о направленности тепловых процессов; основное уравнение кинетической теории газов, экспериментальное определение параметров молекул и др.).

§ 2. Содержание и последовательность изучения раздела «Молекулярная физика»

Молекулярная физика в IX классе как раздел школьного курса физики охватывает три большие группы вопросов.

1. Основные положения молекулярно-кинетической теории, физические величины, характеризующие атомы и молекулы, и их экспериментальное определение, атомное строение вещества и взаимодействие частиц, из которых они состоят, характер их теплового движения.

2. Свойства вещества в трех агрегатных состояниях и их взаимные превращения, молекулярно-кинетическое истолкование этих свойств и превращений.

3. Понятия и законы учения о теплоте, которые используют для рассмотрения физических основ работы тепловых двигателей.

При этом предполагается, что уже изученный в VII классе учебный материал в IX классе не изучают, его только повторяют и развивают на более высоком научном уровне.

Исходным в учебном материале молекулярной физики являются основные положения молекулярно-кинетической теории и их экспериментальное обоснование. Большую познавательную и воспитательную роль играют при этом классические фундаментальные эксперименты, изучению и разъяснению которых следует уделять особое внимание. К ним относятся опыты Рэлея по определению верхнего предела размеров молекул, Перрена — по броуновскому движению и распределению частиц по высоте в поле силы тяжести, Штерна — по определению скорости молекул. Эксперимент, наблюдения, модельные опыты, числовые примеры, простейшие расчеты, сравнение величин в микро- и макром мире, учебные кинофрагменты и кинофиль-

мы должны сопровождать все изучение молекулярной физики и тепловых явлений, чтобы создать правильные представления о них. Важно при этом добиться от школьников понимания средних значений величин, характеризующих частицы и системы частиц, и связи между этими средними значениями величин.

Эти связи выясняют при выводе основного уравнения кинетической теории газов. Центральным пунктом при изучении этого уравнения является не только вывод, но и достаточно подробный анализ его и тех следствий, которые из него вытекают. Очень важно здесь установление связи между абсолютной температурой (термодинамическое понятие) и средней кинетической энергией поступательного движения атома или молекулы (статистическое понятие), которая выражается через постоянную Больцмана. Это один из основных вопросов молекулярно-кинетической теории газов.

Знания учащихся по теплоте, полученные на первой ступени обучения, развивают и доводят до довольно широких научных обобщений. Углубляют понятия о внутренней энергии, о количестве теплоты, изучают различные изопроцессы. Весь учебный материал объединен вокруг одного из основных законов физики — первого закона термодинамики.

При изучении свойств твердых тел и жидкостей центральными вопросами являются анизотропия кристаллов, поверхностная энергия (твердых тел и жидкостей), понятие о минимуме потенциальной энергии.

Остановимся кратко на некоторых физических понятиях и законах.

Закон сохранения и превращения энергии. Законы сохранения отражают всеобщий закон природы о несотворимости и неуничтожимости материи и ее движения. Закон сохранения энергии приобретает всеобщий естественнонаучный смысл (как одна из форм выражения неуничтожимости движения), если указывается также качественная особенность энергии — возможность ее превращения из одного вида (или одной формы) в другие. Количественная и качественная стороны этого закона взаимосвязаны, неразрывны. Ф. Энгельс писал: «Количественное постоянство движения было высказано уже Декартом и почти в тех же выражениях, что и теперь (Клаузиусом, Робертом Майером?). Зато превращение *формы* движения открыто только в 1842 г., и это, а не закон количественного постоянства, есть новое»¹.

При изучении тепловых явлений впервые в курсе физики возникает возможность раскрыть содержание закона сохранения энергии в виде первого закона термодинамики.

При изменении температуры тела увеличивается или уменьшается его внутренняя энергия. Согласно закону взаимосвязи массы и энергии $\mathcal{E} = mc^2$ изменяется при этом и масса тела $\Delta m = \frac{\Delta \mathcal{E}}{c^2}$.

¹ Э н г е л ь с Ф. Диалектика природы. М., 1969, с. 245.

Однако в тепловых процессах при обычных («земных») температурах изменение массы составляет ничтожный процент. Так, например, при нагревании 1 кг воды на 100 °С увеличение массы воды:

$$\Delta m = \frac{1 \text{ кг} \cdot 4,2 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \cdot 100 \text{ К}}{\left(3 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}}\right)^2} \approx \approx 4,7 \cdot 10^{-12} \text{ кг}.$$

Это очень малая величина, которая в расчетах тепловых процессов не учитывается.

Равновесие и процессы. Эти понятия играют важную роль в физике, в том числе в термодинамике. В термодинамике рассматривают главным образом равновесные состояния, т. е. состояния системы, во всех частях которой ее параметры (например, температура и давление, температура и объем) не изменяются во времени. Важно разъяснить и в ряде случаев напомнить и подчеркнуть, что уравнение состояния идеального газа Менделеева — Клапейрона $pV = \nu RT$ и следствия из него справедливы только для равновесных состояний систем.

Зная два параметра системы в равновесном состоянии (p , V , p , T или V , T), можно вычислить третий. Если же система, например идеальный газ, выведена из равновесного состояния и переход в новое равновесное состояние еще не закончился, то к ней уравнение состояния неприменимо.

Рассмотрим примеры.

1. Идеальный газ находится в равновесном состоянии в сосуде с подвижным поршнем. Если поршень переместить вправо в течение промежутка времени t , то перед ним образуется область повышенного давления газа (рис. 1, а) и эта область сжатия распространится вдоль цилиндра со скоростью звука v (рис. 1, б). Пусть давление газа выравнивается по всему объему за время τ (время релаксации). При условии $t \gg \tau$ выравнивание давления происходит гораздо быстрее, чем перемещение поршня. Такой процесс называют квазистатическим¹ (почти статическим). К нему применимы законы термодинамики, в том числе уравнение Менделеева — Клапейрона.

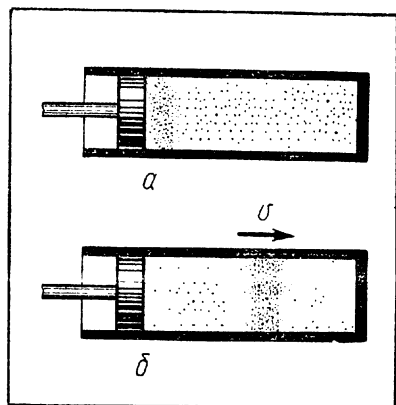


Рис. 1.

¹ См.: Спасский Б. И., Коварский Ю. А. Квазистатические процессы в термодинамике. (Анализ роли и места в курсе физики средней школы.) — «Физика в школе», 1972, № 5, с. 66—69.

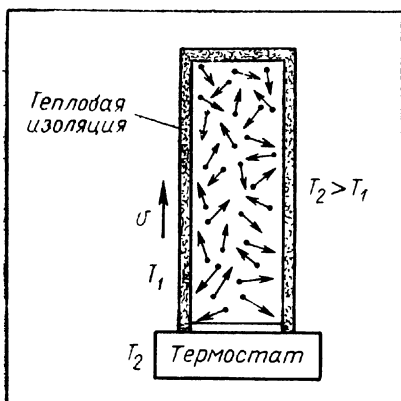


Рис. 2.

2. Идеальный газ находится в цилиндре постоянного объема в равновесном состоянии при температуре T_1 . Цилиндр поставлен на термостат, температура которого $T_2 > T_1$ (рис. 2). Если между ними стенка теплопроводящая, то вблизи нее молекулы газа начнут двигаться быстрее, следовательно, температура газа повысится. Начнется процесс передачи энергии к соседним слоям газа, пока температура не выровняется по всему его объему. Если промежуток времени t , в течение которого энергия передается

через стенки, больше промежутка времени τ , за которое температура газа выравнивается по всему объему, то такой процесс тоже квазистатический.

Когда говорят, что процесс квазистатический, то имеют в виду, что параметры системы меняются медленно, но «медленно» — понятие относительное. Для рассматриваемых случаев $t \gg \tau$.

Для протекания квазистатического адиабатного процесса необходимо, чтобы он шел медленно по отношению ко времени релаксации (условие квазистатичности) и достаточно быстро по сравнению со скоростью теплообмена (условие адиабатности).

Системы частиц. Свойства одной частицы отличны от свойств системы частиц (молекул, атомов, электронов). В учении о теплоте рассматривают тепловые свойства газа, жидкостей и твердых тел. Газ — простейшая из них физическая система. С чего же начинать изучение кинетической теории газов — с системы атомов или молекул? На первой ступени курса физики (VI класс), до изучения курса химии, рассмотрение системы частиц начинают с совокупности молекул. Но молекулы бывают одноатомные. Атомы движутся только поступательно. Законы взаимодействия между ними проще, чем для молекул. Поэтому в IX классе правомерно и логично начинать изучение молекулярно-кинетической теории с системы атомов (газа), как частиц, структурно более простых, чем молекулы.

В молекулярно-кинетической теории, даже зная начальные координаты и импульсы каждой частицы (атома, иона, молекулы), невозможно рассчитать их поведение в последующие промежутки времени. Слишком велико число уравнений и сложны взаимодействия частиц. В связи с созданием электронно-вычислительных машин (ЭВМ) имеется возможность решить эту задачу, однако только для небольшого ансамбля частиц.

Картины расположения частиц газа через ряд последовательных, равных интервалов времени, найденные с помощью ЭВМ, мож-

но нанести на кадры киноплёнки, а затем рассмотреть их в динамике, пользуясь проектором. Таким образом, получается непрерывная картина беспорядочного движения небольшого числа атомов или молекул. Для систем же, состоящих из огромного числа частиц, например, равного числу Авогадро, так применить ЭВМ невозможно. Возрастание числа частиц приводит к новому качеству — к явлениям, описание которых требует применения нового метода (статистического).

О втором законе термодинамики. Учебная программа не предусматривает изучение этого закона. Однако идея о направленности тепловых процессов и статистическом его истолковании может и должна быть разъяснена учащимся. На конкретных примерах можно также показать, что при работе тепловых двигателей энергия, заимствованная от нагревателя, лишь частично идет на полезную работу, а другая часть передается холодильнику. Эта часть энергии считается потерянной для данного двигателя, но без нее не может быть работы двигателя.

Изучение молекулярной физики и теплоты дает широкий выход в технику. Представляется важным разъяснение различных применений свойств газов в технике. Понимание физических принципов работы тепловых двигателей и их использование, рассмотрение фазовых переходов в природе и технике и охрана окружающей среды составляют важные элементы политехнического обучения.

Глава II

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ОСНОВЫ МОЛЕКУЛЯРНО-КИНЕТИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ

§ 3. Введение

Опыт работы средней общеобразовательной школы показал, что изучение тепловых явлений в IX классе целесообразно проводить на основе положений молекулярно-кинетической теории. Для этого имеются большие предпосылки. Уже в VI и VII классах курс физики излагают с широким привлечением молекулярных и электронных представлений. Атомные и молекулярные представления расширяют и пополняют в VII и VIII классах по курсу химии. Преимущество в преподавании на обеих ступенях курса физики и осуществление связи курсов физики и химии требуют того, чтобы в старших классах ранее полученные учащимися первоначальные сведения об атомах и молекулах и их движении были использованы и углублены, чтобы свойства отдельных атомов и молекул, а также систем частиц оценивались количественно. Тогда анализ тепловых явлений получит сразу же, непосредственно молекулярно-кинетическое объяснение.

В данной главе изложена методика изучения основных химических фундаментальных физических экспериментов, не только подтверждающих существование молекул и атомов и их движение, но и позволяющих определить физические величины, характеризующие атомы и молекулы: их размеры, массу, скорость и концентрацию молекул. Здесь приведены подобранные для учебных целей числовые примеры, которые могут помочь учащимся представить себе порядок физических величин, характеризующих молекулярный мир, делают эти величины более «ощутимыми» и наглядными. Все это способствует формированию у учащихся убеждений в реальности микромира и возможности его познания.

В начале изучения молекулярной физики на основе знаний физики и химии повторяют сведения об атомном строении вещества. При повторении полезно воспользоваться законом кратных отношений, открытым Джоном Далтоном (1766—1844). Для этого удобно использовать следующую таблицу.

Вещество	Химическая формула	Масса, %		Отношение массы кислорода к массе азота	
		азот	кислород	в единицах массы	в условных единицах
Закись азота	N_2O	63,7	36,3	0,57	1
Окись азота	NO	46,7	53,3	1,14	2
Азотистый ангидрид	N_2O_3	36,8	63,2	1,71	3
Двуокись азота	N_2O_4	30,4	69,6	2,28	4
Азотный ангидрид	N_2O_5	25,9	74,1	2,85	5

Из таблицы видно, что кислород входит в окислы азота в кратных отношениях 1 : 2 : 3 : 4 : 5. Закон кратных отношений справедлив для всех химических соединений. Следовательно, вещество имеет дискретную структуру. Единицей этой структуры является атом.

Атом — это наименьшая частица химического элемента, т. е. наименьшая частица вещества, не делящаяся при химических реакциях и являющаяся носителем химических свойств элемента.

Молекула состоит из однородных или разнородных атомов. Молекула — это наименьшая устойчивая частица простого или сложного вещества, обладающая основными химическими свойствами этого вещества.

На уроке можно привести примеры различных молекул, в том числе многоатомных: аналгин (38 атомов), белки (более тысячи атомов), полимеры (до многих десятков тысяч атомов), каучуки (до полумиллиона атомов). Обращают внимание учащихся на то, что ряд веществ, например некоторые газы (гелий — He, аргон — Ar) и кристаллы (графит, алюминий, медь и др.), состоит из одноатомных молекул.

Физические свойства вещества зависят не только от его состава, но и от структуры — взаимного расположения атомов и молекул. А это расположение обусловлено величиной межатомных и молекулярных взаимодействий (сил). Наконец, свойства вещества определяются характером движения атомов и молекул.

Подчеркивают, что существование атомов и молекул, их движение и взаимодействие, взаимное расположение этих частиц в веществе в настоящее время являются не гипотезами, а достоверными фактами, подтвержденными экспериментально и практической деятельностью людей (получение и проектирование материалов с заданными физическими и химическими свойствами). Перед учащимися ставят учебную проблему — изучить эти факты, в том числе имеющимися в школе экспериментальными средствами.

Свойства вещества изучают в связи с его строением в такой последовательности: атом, молекула, вещество, материал.

§ 4. Метод обнаружения молекул и их движения

При анализе тепловых явлений учащиеся встречаются с качественно новой формой движения материи, принципиально отличной от механического движения макротел. Это движение непрерывающееся и беспорядочное. Оно является всеобщим и потому фундаментальным физическим фактом.

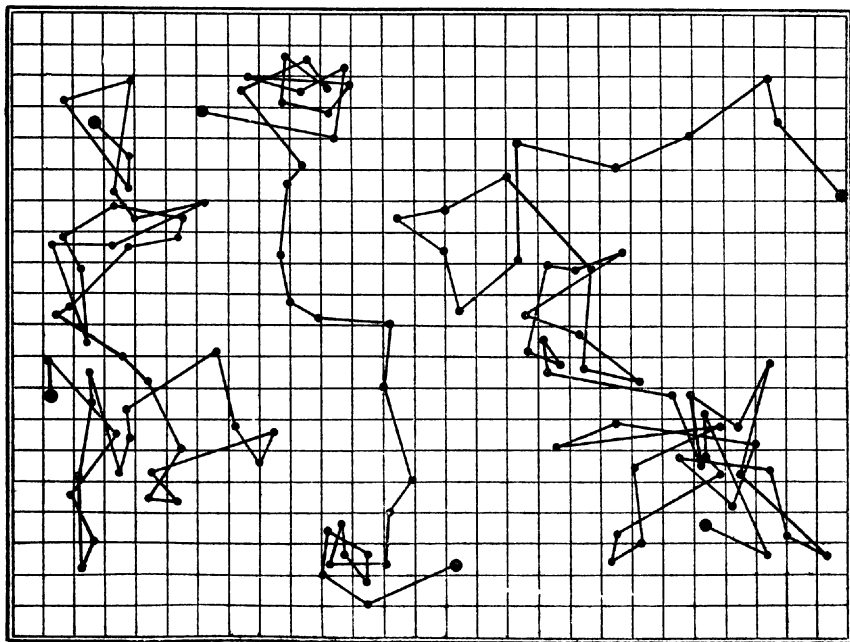


Рис. 3.

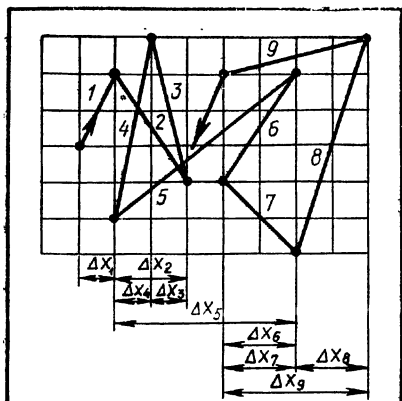


Рис. 4.

На уроке учитель описывает характер броуновского движения по опытам Жана Батиста Перрена (1870—1942), а затем анализирует запись броуновского движения одной из трех частиц (рис. 3), сделанную Перреном с помощью микроскопа, окуляр которого был снабжен координатной сеткой. При этом обращают внимание учащихся на следующее.

1. Броуновское движение непрерывно во времени и беспорядочно по направлению и величине перемещения. Оно обусловлено свойствами самого вещества в

жидком и газообразном состояниях. Характер броуновского движения не зависит от физических воздействий на него и вещества самой броуновской частицы.

2. Это движение вызвано нескомпенсированными импульсами, которые испытывает броуновская частица со стороны окружающих ее молекул. Нескомпенсированность импульсов проявляется в большей мере при малых размерах броуновской частицы — порядка 1 мкм и меньше. При больших ее размерах импульсы со стороны молекул из-за усреднения ударов взаимно компенсируются, и тогда частица не движется.

3. По движению броуновских частиц можно судить о характере движения молекул среды. Броуновское движение представляет собой как бы копию молекулярного движения. Однако следует предупредить возможную склонность учащихся отождествлять эти движения. В опытах Перрена броуновская частица состояла из сотен миллиардов молекул. Броуновская частица — это взвешенная частица в жидкости или газе. Она видна в микроскоп, в то время как молекулы среды не видны.

Делают вывод о том, что броуновское движение доказывает существование молекул и их движение.

4. Учащимся известно, что при равномерном движении перемещение x пропорционально времени t , т. е. $x \sim t$, а при равнопеременном движении $x \sim t^2$. В случае же броуновского движения смещение броуновской частицы описывается новым для учащихся законом, открытым Альбертом Эйнштейном (1879—1955) и Марианом Смолуховским (1872—1917). Этот закон можно изложить на уроке в следующем объеме.

Смещения броуновской частицы за равные промежутки времени неодинаковы (рис. 4). Если эти смещения спроецировать на одну из координатных осей, например на ось X , каждое смещение Δx возвести в квадрат $(\Delta x)^2$ и вычислить среднее значение квадра-

тов. смещений $\overline{(\Delta x)^2}$, то в соответствии с законом Эйнштейна и Смолуховского

$$\overline{(\Delta x)^2} \sim t,$$

или

$$V \sqrt{\overline{(\Delta x)^2}} \sim \sqrt{t}.$$

Далее делают вывод: *движение броуновской частицы беспорядочное, столкновения случайные, а перемещение частицы происходит по определенному закону.*

Законы, описывающие поведение и результаты взаимодействия огромного числа частиц, называют статистическими. Они отличны от динамических законов классической механики.

На примере броуновского движения иллюстрируют принципиальное различие этих законов.

Здесь полезно показать модельный опыт с доской Гальтона. В верхней части вертикально поставленной доски в шахматном порядке расположены штыри, а в нижней части на равных расстояниях друг от друга вертикально размещены планки. Все это устройство закрыто стеклом.

При высыпании дробинок или горошин в воронку они распределяются по вертикальным желобам в определенном порядке. Опыт повторяют 2—3 раза. Разъясняют, что попадание каждой дробины в тот или иной желоб представляет собой случайное событие. В этом можно убедиться, если при постановке опыта использовать дробины, из которых одна окрашена, например, в белый цвет. Однако относительное распределение всех дробинок по желобам закономерное.

5. Было доказано, что величина $\overline{(\Delta x)^2}$ пропорциональна не только времени t , но и абсолютной температуре T , т. е.

$$\overline{(\Delta x)^2} \sim T.$$

Действительно, при нагревании среды интенсивность броуновского движения увеличивается. Этот экспериментальный факт очень важен для молекулярно-кинетической теории.

6. Учащимся сообщают, что теория броуновского движения разработана А. Эйнштейном и М. Смолуховским. Советские ученые С. И. Вавилов и Е. М. Брумберг предложили новый метод изучения этого движения (1932), применив микрофотографию броуновских частиц.

Изучение броуновского движения в школе сопровождают наблюдениями этого движения для случая жидкости и газа при помощи микроскопа с увеличением 200. Для наблюдения броуновского движения в жидкости препарат изготавливают из смеси двух растворов, по 5 см³ каждого: один из них 1%-ный водный раствор серной кислоты, а другой — 2%-ный водный раствор гипосульфита. В результате химической реакции выпадают частицы серы, которые в смеси

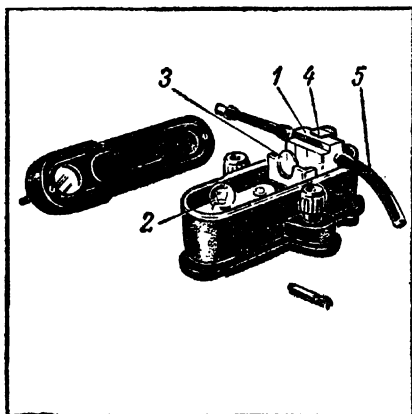


Рис. 5.

полняют специальную камеру 1 (рис. 5) школьного прибора. В установке применяют лампу 2 и линзу 3. Наблюдение ведут при помощи микроскопа через окно 4 на крышке камеры. Окно закрыто стеклом. Наполнение и продувку камеры производят через боковые трубки 5.

Для демонстрации модели броуновского движения используют также школьный прибор. Между двумя стеклами прибора помещают 10—15 стальных шариков (модели молекул) и кусок пробки или резины (модель броуновской частицы). Колеблущееся кольцо приводит в беспорядочное движение шарики, а они в свою очередь — пробку или резинку. Наблюдения ведут в проекции на вертикальный экран.

Если вместо кусочка пробки поместить больший кусок дерева, то он двигаться не будет (отсюда следует, что броуновские частицы должны быть небольшими). При большей частоте вращения ручки прибора пробка движется интенсивнее (значит, при нагревании интенсивность броуновского движения и движения молекул возрастает).

Из учебного кинофильма «Молекулы и молекулярное движение» целесообразно в этом месте курса продемонстрировать фрагмент «Броуновское движение».

При изучении атомно-молекулярного строения вещества и броуновского движения рекомендуется на уроках прочитать отрывки из сочинений Лукреция (99—55 гг. до н. э.) «О природе вещей» (Изд-во АН СССР, 1958, стр. 29, 32, 33, 34, 62), М. В. Ломоносова «Элементы математической химии», «Опыт теории о нечувствительных частицах тел и вообще о причинах частичных качеств», «Размышления о причинах теплоты и холода», «Опыт теории упругости воздуха» (Полн. собр. соч., тт. I, II, III. М.—Л., Изд-во АН СССР, 1950—1952) и Ж. Перрена «Атомы» (Госиздат, 1924, § 50).

находятся во взвешенном состоянии. Они-то и служат в качестве броуновских частиц. Две капли полученной смеси помещают на предметное стекло с углублением. Такой препарат устанавливают на столик микроскопа.

Препарат можно изготовить также из сильно разбавленного раствора молока в воде (эмульсия) или из раствора акварельной краски в воде (суспензия).

В качестве броуновских частиц в газе используют частицы папиросного дыма, которым на-

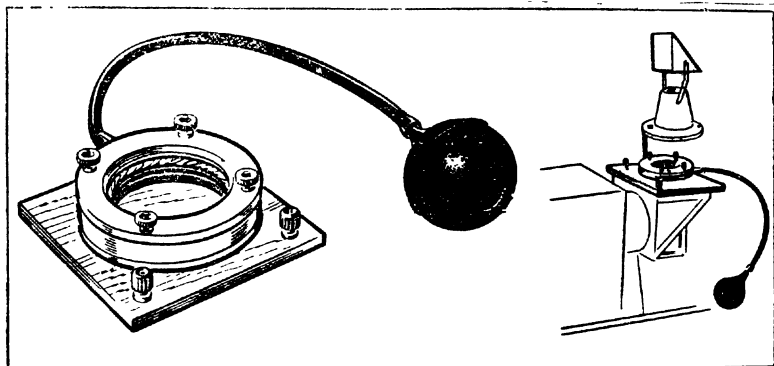


Рис. 6.

Существование ядер атомов может быть доказано с помощью современных средств — камеры Вильсона, пузырьковой камеры, ядерной фотоэмульсии и др. На уроке с помощью проекции на экран можно демонстрировать следы ядер атомов гелия в школьной камере Вильсона (рис. 6). При этом полезно кратко сообщить следующее.

В опытах с броуновским движением «индикатором» существования и движения молекул и атомов была броуновская частица, а в опыте с камерой Вильсона таким «индикатором» служит узкая полоска тумана, состоящая из капелек жидкости (например, спирта). Эти капельки образуются из паров спирта по пути движения заряженных частиц — ядер атомов гелия (об этих частицах учащимся известно из курса химии).

§ 5. Величины, характеризующие молекулы

При изучении молекулярно-кинетической теории надо познакомить учащихся с экспериментальными методами определения величин, характеризующих молекулы: линейных размеров, массы, скорости, числа молекул в единице объема и в моле вещества, длины свободного пробега.

Размеры молекул. Представления о порядке линейных размеров молекул можно дать в IX классе на основе рассмотрения эксперимента или простейшего расчета.

Опыт. Рекомендуется рассмотреть эксперимент, разъясняющий метод Рэлея. Капельку оливкового масла опускают на поверхность воды. Масло, растекаясь, образует тонкую пленку — мономолекулярный слой. Толщина этого слоя равна верхнему пределу линейных размеров молекул оливкового масла.

Числовой пример. Масса капельки масла $m = 0,8 \text{ мг} = 8 \cdot 10^{-7} \text{ кг}$. Плотность масла $\rho = 900 \text{ кг/м}^3$. Следовательно, объем капельки

$$V = \frac{m}{\rho};$$

$$V = \frac{8 \cdot 10^{-7} \text{ кг}}{900 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}} \approx 0,89 \cdot 10^{-9} \text{ м}^3.$$

Так как в этом опыте площадь пленки масла $S = 0,55 \text{ м}^2$, то верхний предел линейных размеров молекул масла

$$d = \frac{V}{S};$$

$$d = \frac{0,89 \cdot 10^{-9} \text{ м}^3}{0,55 \text{ м}^2} \approx 1,6 \cdot 10^{-9} \text{ м} = 1,6 \cdot 10^{-7} \text{ см}.$$

Линейные размеры многих молекул порядка 10^{-8} см , а объем их порядка 10^{-23} см^3 . Размеры молекул высокомолекулярных соединений значительно больше. Например, длина молекулы каучука 0,02 мм.

В школе можно поставить опыт, аналогичный описанному выше, с олеиновой кислотой или скипидаром. Для эксперимента с оливковым маслом предварительно готовят очень разбавленный раствор его в бензине, а затем опускают одну капельку раствора на поверхность воды. После испарения бензина остается мономолекулярный слой чистого масла.

Вычислительный прием. Любой газ при определенных условиях можно перевести в жидкость. Учащимся известно, что жидкость малосжимаема. Делают два допущения: жидкость несжимаема (молекулы плотно упакованы) и каждая молекула в ней занимает объем в виде куба, ребро которого равно линейному размеру молекулы.

Так как плотность воды $\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$, 1 кг воды занимает объем 10^{-3} м^3 . Из курса химии известно, что 1 моль воды имеет массу $m = 0,018 \text{ кг}$. Поэтому ее объем $V = 18 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3$. Но учащиеся знают из того же курса, что 1 моль вещества, а значит, и воды содержит $N_A = 6,02 \cdot 10^{23}$ молекул (число Авогадро). Следовательно, каждая молекула занимает объем

$$V_1 = \frac{V}{N_A};$$

$$V_1 = \frac{18 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3}{6,02 \cdot 10^{23}} \approx 3 \cdot 10^{-29} \text{ м}^3.$$

Если молекулы в жидкости плотно упакованы и каждая из них занимает объем куба с ребром d , то

$$d = \sqrt[3]{3 \cdot 10^{-29} \text{ м}^3} \approx 3 \cdot 10^{-10} \text{ м} \text{ или } d \approx 10^{-8} \text{ см}.$$

Таков порядок диаметра молекулы.

Учащимся можно дать индивидуальные задания: определить порядок размеров молекул различных жидкостей (спирта, керосина, скипидара, глицерина, ртути и др.) по их плотности и числу Аво-

гадро, а затем результаты вычислений сопоставить между собой.

Следует сообщить на уроке, что массу одного моля вещества называют молярной массой (M), а объем одного моля вещества — молярным объемом (V_m). Молярная масса это масса вещества, деленная на число молей в нем: $M = \frac{m}{\nu}$, ее измеряют в килограммах на моль (кг/моль), а молярный объем это объем вещества, деленный на количество вещества (на число молей в нем): $V_m = \frac{V}{\nu}$, его измеряют в кубических метрах на моль (м³/моль).

Масса молекул. Можно рассмотреть один из методов определения массы молекул, основанный на опыте Перрена. Рассматривают идею эксперимента. Перрен исходил из того, что молекулы «постороннего» вещества в очень разбавленных растворах ведут себя в соответствии с газовыми законами. На основании этого он предположил, что газовые законы справедливы и для частиц, состоящих из многих молекул, т. е. для броуновских частиц. Перрен писал: «... разве нельзя предположить, что законы газов применимы также и к эмульсиям, состоящим из видимых частиц?» Это предположение послужило основанием для того, чтобы проверить, распределяются ли по высоте частицы эмульсии в столбе жидкости так же, как и молекулы какого-либо газа в атмосфере.

Разъясняют картину распределения молекул газа в атмосфере. Объясняют, что это распределение обусловлено двумя причинами: силой тяготения, в результате действия которой все молекулы должны были бы упасть на Землю, и хаотическим движением, оказывающим разбрасывающее действие молекул от Земли. В результате этих двух противоположных процессов образуется устойчивое распределение молекул газа по высоте атмосферы.

Приводят график или таблицу, иллюстрирующие закон изменения плотности кислорода (или другого газа) в атмосфере с высотой (см. левую часть таблицы, данной ниже).

Кислород		Частицы эмульсии	
высота	уменьшение плотности	высота	уменьшение числа частиц
1×5,5 м	в 2 раза	1×30 мкм	в 2 раза
2×5,5 м	в 2 ² = 4 раза	2×30 мкм	в 4 раза
3×5,5 м	в 2 ³ = 8 раз	3×30 мкм	в 8 раз
4×5,5 м	в 2 ⁴ = 16 раз		

Следовательно, при увеличении высоты в арифметической прогрессии (1 : 2 : 3 : 4 ...) плотность газа и его парциальное давление уменьшаются в геометрической прогрессии (2¹ : 2² : 2³ : 2⁴ ...)¹.

Приводят описание опыта Перрена, доказавшего, что и частицы эмульсии распределяются по высоте жидкости по такому же зако-

¹ Плотность водорода в атмосфере уменьшается вдвое при подъеме на каждые 16 км.

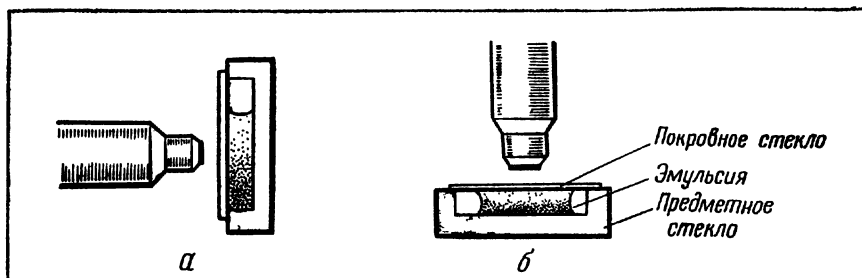


Рис. 7.

ну. Каплю эмульсии гуммигута в воде помещали в кювету высотой 0,1 мм. С помощью микроскопа подсчитывали число частиц эмульсии в различных сечениях по высоте кюветы. При этом частицы считали и при вертикальном (рис. 7, а), и при горизонтальном (рис. 7, б) расположении кюветы. В последнем случае при подъеме тубуса микроскопа на каждые 30 мкм число частиц эмульсии изменялось так, как показано на рисунке 8 в соответствии с правой частью таблицы (стр. 19). Предположения Перрена оправдались.

При рассмотрении опытов Перрена необходимо обратить внимание учащихся на трудоемкость его опытов, которая заключалась в приготовлении одинаковых частиц эмульсии (например, 0,212 мкм!) и подсчете большого числа частиц (до 17 тысяч!)

Очевидно, что чем меньше масса частиц, тем на большей высоте их концентрация убывает вдвое. Поэтому можно записать;

$$\frac{M}{m} = \frac{H}{h},$$

где M — масса частицы гуммигута, m — масса молекулы кислорода, а h и H — соответствующие высоты.

Отсюда

$$m = M \cdot \frac{h}{H}.$$

Для вычисления массы молекулы кислорода нужно знать массу M частицы гуммигута и высоту h , при подъеме на кото-

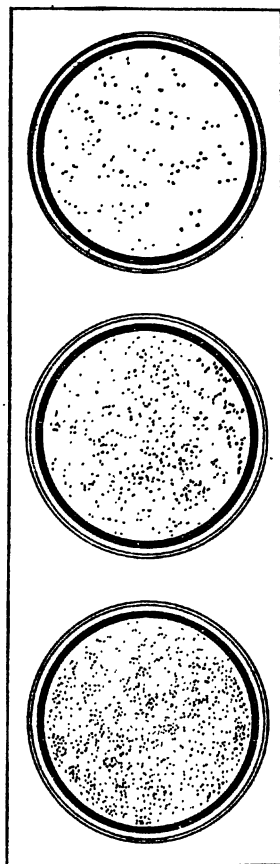


Рис. 8.

рую число этих частиц в поле зрения микроскопа уменьшает-ся вдвое. На опыте измерили диаметр частицы гуммигута, по нему вычислили ее объем, а по объему и плотности гуммигута — массу M частицы. Высоту подъема h определяли с помощью микроскопа. Высота H известна, она равна 5,5 км.

Массу молекулы кислорода теперь принимают равной $5,312 \cdot 10^{-26}$ кг.

Желательно показать школьникам, как можно вычислить массу молекулы любого вещества. Для этого нужно предварительно ввести понятие об атомной единице массы в углеродной шкале, выраженной в килограммах:

$$\frac{m_c}{12} = 1,67 \cdot 10^{-27} \text{ кг.}$$

Зная эту массу и относительную молекулярную массу M_r , можно вычислить массу одной молекулы любого вещества в килограммах по формуле:

$$m = 1,67 \cdot 10^{-27} M_r.$$

Относительной молекулярной массой вещества называют «отношение средней массы молекулы природной смеси изотопов вещества к $1/12$ массы атома нуклида ^{12}C »¹.

Скорости молекул. Из анализа броуновского движения следует, что молекулы среды, обладая импульсом, обладают и скоростями.

Ставят учебную проблему: как измерить скорости молекул? Поясняют, что измерения производили для атомов газа (одноатомных молекул). Разъясняют опыт Отто Штерна (1920 г.), который, кроме своего прямого назначения, заложил основы нового экспериментального метода в физике — метода молекулярных пучков.

Наибольшие методические трудности здесь вызывают два момента: объяснение смещения полосы напыленных атомов на внешнем цилиндре от места против щели на внутреннем цилиндре и разъяснение неодинаковой толщины этой полосы в разных местах. Здесь возможны такие методические приемы.

1. Приводят и рассматривают следующую аналогию изучаемому явлению. Пусть автоматчик, «находясь» на оси прибора, стреляет через щель A внутреннего цилиндра (рис. 9). При неподвижных

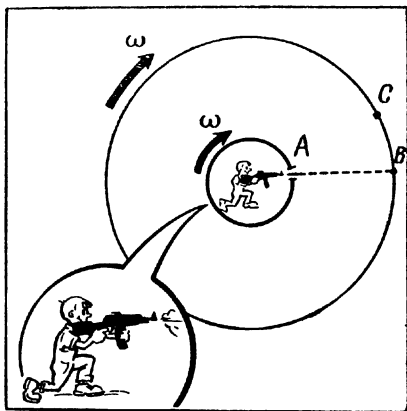


Рис. 9.

¹ Стоцкий Л. Р. Единицы физических величин — паскаль, сименс и моль. — «Физика в школе», 1973, № 2, с. 99.

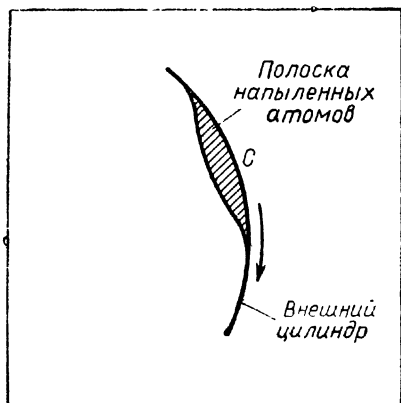


Рис. 10.

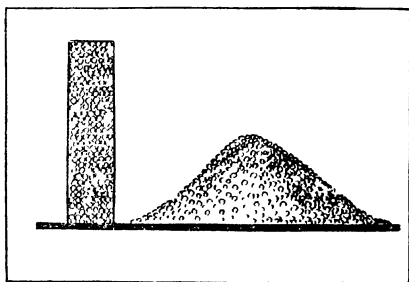


Рис. 11.

цилиндрах пули ложатся в точку *B* внешнего цилиндра точно против щели *A*. Если же оба цилиндра движутся с одинаковой скоростью, то пули дойдут до внутренней поверхности второго цилиндра в тот момент, когда точка *B* сместится в сторону. Следовательно, пули будут ложиться в другую точку — в точку *C* — хотя стрелок и в этом случае все время видит перед собой точку *B*.

2. Демонстрируют учебный кинофрагмент «Опыт Штерна».

3. Для конкретизации учебного материала (но не для запоминания) сообщают данные из опыта Штерна: радиусы цилиндров 0,1 мм и 10 см, давление воздуха порядка 10^{-4} Па, число оборотов цилиндра до 45 с^{-1} , температура проволоки 900°C , смещение полоски 0,63 мм и меньше, скорость атомов серебра в газообразном состоянии 600 м/с.

4. Внимание учащихся обращают на два факта. В этом опыте скорость атомов в лабораторной системе отсчета не явля-

ется единственной. Об этом свидетельствует ширина самой полоски напыленных атомов — осадка (рис. 10).

Существует вполне определенное распределение молекул (атомов) по скоростям. Это подтверждается всегда одинаковой относительной плотностью осадка по ширине.

Полезно показать схематическое изображение напыленных полосок на внутренней поверхности большого цилиндра (рис. 11): слева — при неподвижных цилиндрах, справа — при вращающихся цилиндрах с постоянной угловой скоростью. Молекулы, двигающиеся с большей скоростью, оседают ближе к месту против щели. Наиболее вероятной (наивероятнейшей) скорости молекул соответствует наибольшая часть всех молекул, осажженных на внешнем цилиндре. Большие и меньшие скорости имеет меньшая часть всех молекул.

Наивероятнейшая скорость меньше средней арифметической и еще меньше средней квадратичной (эти скорости относятся как 1,41 : 1,60 : 1,73). В опыте Штерна определяют наивероятнейшую скорость, а затем вычисляют среднюю квадратичную скорость,

Результаты, полученные из этого опыта, полностью подтверждают-ся расчетами, сделанными на основе молекулярно-кинетической теории газов.

Сообщают, что закон распределения молекул по скоростям (по их модулям) открыл теоретически Максвелл.

Концентрация молекул. Число Авогадро. Существует много способов определения числа Авогадро (по броуновскому движению, по распределению частиц в поле силы тяжести и др.). Однако соответствующие закономерности учащимся еще неизвестны. Поэтому на данном этапе обучения можно использовать следующие способы.

Из опыта с мономолекулярным слоем жидкости определяют верхний предел линейных размеров молекулы:

$$d = \frac{V}{S},$$

где V — объем капли, а S — площадь слоя. Тогда объем молекулы

$$V_1 = d^3 = \frac{V^3}{S^3},$$

а объем и масса моля вещества соответственно:

$$V_m = N_A \frac{V^3}{S^3}$$

и

$$M = \rho V_m = \rho N_A \frac{V^3}{S^3}.$$

Здесь ρ — плотность жидкости, а N_A — число Авогадро. Отсюда определяют число Авогадро:

$$N_A = \frac{M S^3}{\rho V^3}.$$

Числовой пример. Из опыта с растеканием олеиновой кислоты по поверхности воды (стр. 18) получили: объем капли этой кислоты $V = 3 \cdot 10^{-5} \text{ см}^3$, площадь мономолекулярного слоя $S = 150 \text{ см}^2$. Плотность олеиновой кислоты $\rho = 0,9 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$, ее относительная молекулярная масса $M_r = 282$.

Относительная молекулярная масса M_r и молярная масса M связаны соотношением $M = 10^{-3} M_r$. Поэтому молярная масса олеиновой кислоты $M = 0,282 \text{ кг/моль}$. Подставляя эти данные в формулу для числа Авогадро, получили:

* В приведенном расчете принято, что молекула жидкости при плотной упаковке занимает объем куба с длиной ребра d . Если считать, что молекула жидкости имеет форму шара с диаметром d , то при определении числа Авогадро полученное выражение надо умножить на $6/\pi \approx 2$. Такой школьный опыт описан в книге: А н ц и ф е р о в Л. И. Физический практикум. Факультативный курс. М., 1972, с. 41.

$$N_A = \frac{0,282 \frac{\text{кг}}{\text{моль}} \cdot (150 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2)^3}{900 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \cdot (3 \cdot 10^{-5} \cdot 10^{-6} \text{ м}^3)^3} \approx 10^{23} \text{ моль}^{-1}.$$

Вычислительный прием. Масса моля вещества (молярная масса M) в любом агрегатном состоянии равна произведению массы m одной молекулы этого вещества на число Авогадро N_A , т. е.

$$M = mN_A.$$

Отсюда вычисляют N_A .

Числовой пример. Из опыта Перрена определили массу молекулы кислорода: $m = 5,4 \cdot 10^{-26}$ кг. Относительная молекулярная масса кислорода (O_2) $M_r = 32$. Значит, молярная масса $M = 0,032$ кг/моль. Поэтому число Авогадро:

$$N_A = \frac{0,032 \text{ кг} \cdot \text{моль}^{-1}}{5,4 \cdot 10^{-26} \text{ кг}} \approx 6 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}.$$

По современным данным,

$$N_A = 6,022169 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1} \text{ или } N_A = 6,022169 \cdot 10^{26} \text{ кмоль}^{-1}.$$

Учащимся предлагают определить число Авогадро по данным таблицы:

Вещество	Химическая формула	Относительная молекулярная (атомная) масса (округленно)
Водород	H_2	2
Гелий	He	4
Углекислый газ	CO_2	44
Оксид углерода	CO	28
Аммиак	NH_3	17
Аргон	Ar	40
Сернистый газ	SO_2	64

При этом каждый ученик получает одно задание. Для выполнения задания сначала определяют массу одной молекулы по формуле $m = 1,67 \cdot 10^{-27} M_r$, а затем и число Авогадро.

По плотности ρ любого газа и массе m одной молекулы можно определить число молекул газа в единице его объема при нормальных условиях:

$$L = \frac{\rho}{m}.$$

Это число носит имя ученого **Йозефа Ломмита** (1821—1895).

Числовой пример. Взяв необходимые для водорода данные, получают:

$$L = \frac{9 \cdot 10^{-2} \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}}{3,3 \cdot 10^{-27} \text{ кг}} \approx 2,7 \cdot 10^{25} \text{ м}^{-3}.$$

Учащимся можно дать определить число Лошмидта на примере нескольких газов и этим самым показать, что во всех случаях результат вычислений получится одинаковым.

По современным данным, $L = 2,68799 \cdot 10^{25} \text{ м}^{-3}$.

Глава III

МОЛЕКУЛЯРНО-КИНЕТИЧЕСКАЯ ТЕОРИЯ ГАЗОВ

§ 6. Введение

В курсе физики средней школы при изучении газовых законов возможны два методических пути: индуктивный и дедуктивный. В первом случае последовательно изучают законы Бойля — Мариотта, Гей-Люссака, Шарля, затем их обобщают и получают уравнение Менделеева — Клапейрона. Этим законам дают качественное молекулярно-кинетическое истолкование. Далее независимо от изучения этих вопросов выводят основное уравнение кинетической теории газов для давления и из него устанавливают связь между абсолютной температурой и средней кинетической энергией хаотического поступательного движения молекулы — связь, которая выражается через постоянную Больцмана. Все газовые законы при этом изучают на опытной основе. Такая последовательность принята в учебном пособии «Физика, 9».

При другом пути — дедуктивном — на основе положений молекулярно-кинетической теории, изученных на классических опытах, сразу выводят основное уравнение кинетической теории газов для давления (уравнение Клаузиуса). При этом используют физическую модель идеального газа. Из этого уравнения получают как частные случаи все законы для идеальных газов, в том числе и закон Менделеева — Клапейрона. Правильность этих выводов в каждом случае также иллюстрируют опытом. В остальном порядок расположения учебного материала при обоих путях изложения, как правило, совпадает.

Таким образом, при первом пути изложения исходными являются иллюстрации газовых законов на опытах, а при втором — теоретический вывод тех же законов, опытные иллюстрации которых являются подтверждением правильности как самой теории, так и исходных ее положений, а также и самих законов.

Так как первый путь изложения учебного материала, принятый в учебном пособии «Физика, 9», достаточно хорошо разработан в методическом отношении и широко известен учителям, авторы данной книги сочли возможным не повторять его, а показать здесь методику изучения этого материала по второму пути. Если учитель сочтет для себя удобным изложение газовых законов вести по первому пути, то и в этом случае фактический материал и методические рекомендации, приведенные в данной книге, он также сможет ис-

пользовать при изучении молекулярно-кинетической теории газов.

При этом имеется в виду следующее.

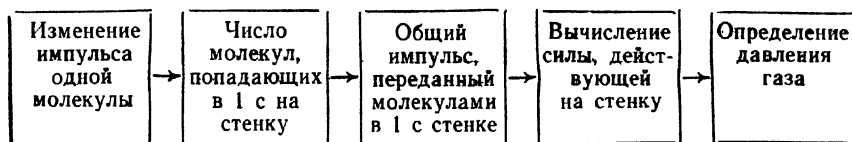
1. В предлагаемой методике приведен доступный для учащихся IX класса вывод основного уравнения кинетической теории газов. Это подтверждается педагогическим экспериментом, проведенным в ряде школ.

2. Здесь даны числовые примеры по расчету кинетической энергии хаотического поступательного движения молекул газа в заданном объеме, по определению средней квадратичной скорости молекул газа при определенной температуре; изложены два способа перехода к тепловому равновесию — термодинамический и молекулярно-кинетический, показана связь абсолютной температуры со средней кинетической энергией хаотического поступательного движения молекул газа; дан вывод уравнения Менделеева — Клапейрона из основного уравнения кинетической теории газов и др.

§ 7. Основное уравнение кинетической теории газов

Вывод основного уравнения кинетической теории газов состоит из ряда логических звеньев. Вся цепь рассуждений должна быть разъяснена и представлена в наглядной форме в самом начале изложения, до математических выкладок.

Давление газа на стенку определяется теми силами, которые испытывает стенка при упругом столкновении с ней молекул газа. При столкновении происходит изменение импульса каждой молекулы, а следовательно, и стенки. Изменение же импульса всех молекул в единицу времени по абсолютной величине равно силе, с которой газ давит на стенку. Наконец, сила, отнесенная к единице площади стенки, равна давлению. Полезно привести план этого вывода в виде такой схемы:



В различных учебниках, учебных пособиях и методических руководствах вывод основного уравнения кинетической теории газов приводится по-разному. Здесь приведен один из возможных в средней школе выводов основного уравнения кинетической теории газов для давления.

Исходные положения. Рассматривают молекулярное движение в идеальном газе, не ограниченном стенками сосуда (рис. 12). Движение молекул хаотическое, все направления движения равно-

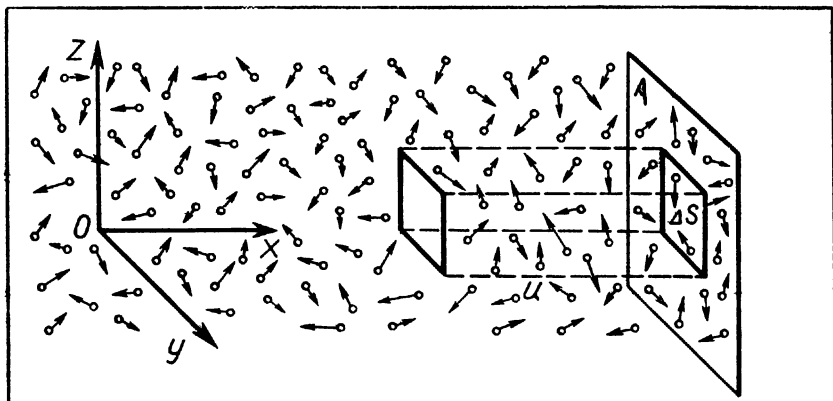


Рис. 12.

сероятны, скорости молекул различные. Силы тяжести, действующие на молекулы, не учитывают.

Для упрощения вывода допускают сначала, что скорости молекул одинаковы. В газе выделяют прямоугольную систему координат XYZ . Предполагают, что в газе находится пластина A большой массы, плоскость которой перпендикулярна оси X . Очевидно, что на площадку ΔS попадают каждую секунду лишь те молекулы, которые находятся в мысленно выделенном прямоугольном параллелепипеде и обладают скоростью u . Длина параллелепипеда численно равна этой скорости. Молекулы могут попасть в него через его боковую поверхность. Ввиду хаотичности движения ежесекундный приток и убыль молекул взаимно компенсируются. В параллелепипеде остается в среднем одинаковое число молекул. Наконец, возможны столкновения между молекулами. В одних случаях они препятствуют движению соседей к площадке ΔS , а в других — ускоряют их (при движении под углом «вдогонку»). Из-за хаотичности движения эти противоположные процессы (количественно) также в среднем уравниваются.

Изменение импульса одной молекулы. Молекула подходит к площадке со скоростью (по модулю) u (рис. 13, а), после столкновения она отскакивает от площадки в противоположную сторону со скоростью $-u$ (рис. 13, б). При столкновении скорость молекулы

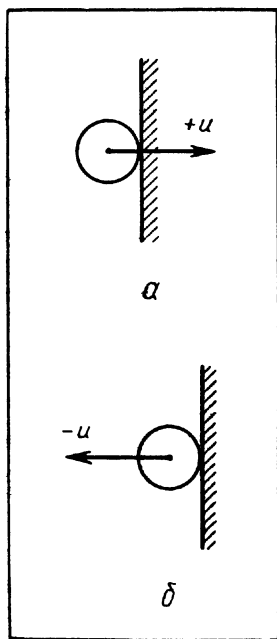


Рис. 13.

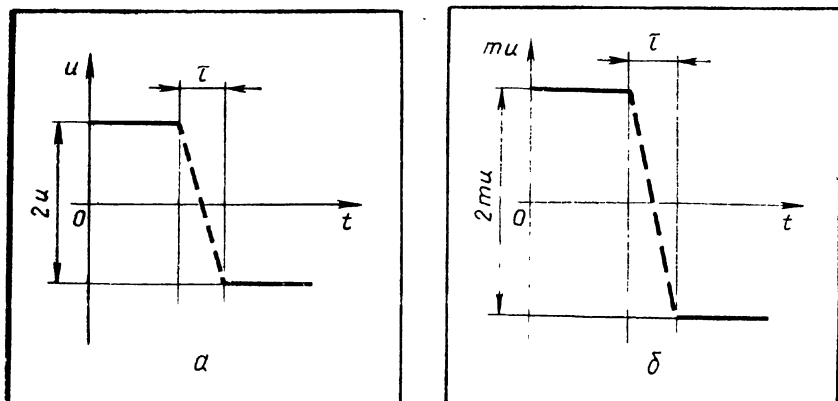


Рис. 14.

изменяется от $+u$ до $-u$ не мгновенно, а в течение очень малого промежутка времени τ (рис. 14, а), а импульс молекулы изменяется соответственно от $+mu$ до $-mu$ (рис. 14, б), где m — масса молекулы. Поэтому изменение импульса молекулы

$$\bar{f} \tau = -mu - (+mu) = -2mu.$$

Здесь \bar{f} — средняя сила, испытываемая молекулой во время столкновения с пластиной. Последняя получит импульс такой же по величине, но противоположный по знаку, т. е.

$$\bar{f} \tau = 2mu,$$

где \bar{f} — средняя сила, испытываемая пластиной со стороны молекулы при столкновении.

Для определения силы, с которой газ действует на площадку ΔS , надо подсчитать общий импульс, который молекулы передают ей каждую секунду. Но для этого нужно знать число молекул, попадающих за это же время на площадку.

Число молекул, попадающих каждую секунду на площадку ΔS . Для определения этого числа используют такой прием. В мысленно выделенном объеме параллелепипеда все N молекул разделяют на три равные группы, каждая из которых движется вдоль одной из координатных осей. Это возможно, так как все направления движения равновероятны. По этой же причине можно предположить, что из каждой $\frac{1}{3} N$ молекул обе ее равные части движутся в противоположных направлениях. Следовательно, к площадке ΔS движется $\frac{1}{6} N$ молекул.

Так как объем параллелепипеда

$$V = u\Delta S$$

и число молекул в единице объема в среднем равно n , то число молекул, заключенных в этом параллелепипеде,

$$N = nu\Delta S,$$

а число молекул, движущихся к выбранной площадке ΔS , т. е. в одном направлении, и падающих на нее ежесекундно

$$z = \frac{1}{6}N = \frac{nu\Delta S}{6}.$$

Обращают внимание на то, что возможны прилипания отдельных молекул к пластине. Но с такой же вероятностью прилипшие молекулы могут покинуть ее. Противоположные процессы равновероятны, и потому в среднем их число одинаково. Передача импульсов такими молекулами происходит в два этапа, разделенные во времени. Поэтому результаты их действия на пластину будут такими же, как в случае упругого столкновения. Столкновения таких молекул с пластиной статистически упруги.

Общий импульс, передаваемый молекулами ежесекундно. Каждая молекула передает площадке ΔS импульс $2mu$. Поэтому от z молекул за 1с площадка получит импульс, численно равный средней силе:

$$\bar{F} = \bar{F}z = 2mu \cdot \frac{nu\Delta S}{6} = \frac{1}{3}ntu^2\Delta S.$$

Беспорядочная и непрерывная бомбардировка молекулами площадки ΔS сливается в общую среднюю силу F_c . Здесь желательно иллюстрировать этот про-

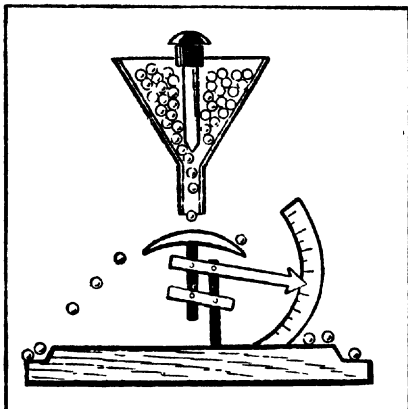


Рис. 15.

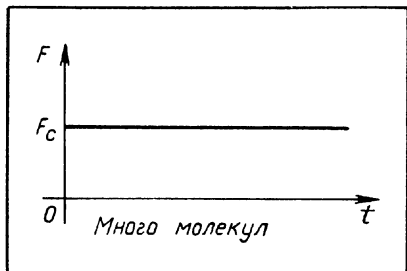


Рис. 16.

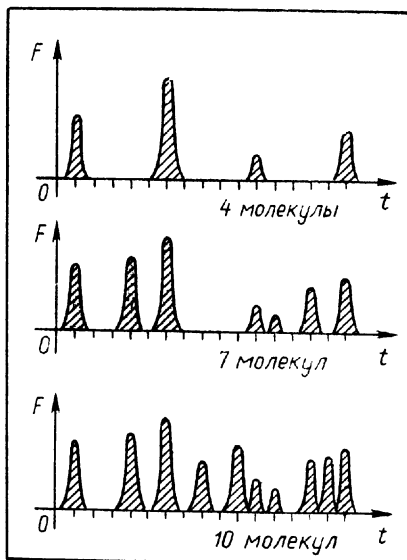


Рис. 17.

цесс моделью (рис. 15) и графиком (рис. 16). Действие модели ясно из рисунка. Моделью молекул служат стальные шарики. Их число регулируют положением цилиндрического стержня.

Так как в действительности скорости молекул, а также импульсы различны, то последние можно изобразить так, как показано на рисунке 17 (импульсы изображены заштрихованными площадками).

Разъясняют, что когда большое число молекул бомбардирует пластину, то силы ударов отдельных молекул «сливаются» в общую среднюю силу F_c . Так как пластина упругая и обладает значительно большей массой, чем молекула, то она как бы «сглаживает» отдельные элементарные силы в общую среднюю силу.

Определение давления газа. Средняя сила, отнесенная к единице площади, равна давлению газа:

$$p = \frac{1}{3} n m u^2.$$

Эту формулу следует уточнить. Так как молекулы обладают разными скоростями — от нуля до очень больших скоростей, то величину u^2 следует заменить средним значением квадратов скоростей всех молекул, т. е. величиной $\overline{u^2}$. Тогда

$$p = \frac{1}{3} n m \overline{u^2}.$$

Это и есть основное уравнение кинетической теории газов. Оно было названо уравнением Клаузиуса, по имени ученого Р у д о л ь ф а К л а у з и у с а (1822—1888).

§ 8. Анализ основного уравнения кинетической теории газов

При анализе полученного уравнения обращают внимание на следующее.

1. Вычисленное давление газа на внесенную в него пластину одинаково с обеих ее сторон (согласно закону Паскаля). Такое же давление испытывают стенки сосуда, в котором находится газ.

2. Полученное уравнение устанавливает существующую в природе связь давления газа p с величинами, характеризующими молекулы газа: массой m молекулы, средней квадратичной скоростью молекул $\sqrt{\overline{u^2}}$ и концентрацией молекул n . Давление p — это п а р а м е т р г а з а в ц е л о м. Для отдельной молекулы он смысла не имеет. Подчеркивают, что анализируемое уравнение имеет статистический смысл. Оно выражает объективно существующую статистическую закономерность.

3. При умножении числителя и знаменателя правой части уравнения на 2 получают:

$$p = \frac{2}{3} n m \frac{\overline{u^2}}{2}.$$

Величина $\frac{m\bar{u}^2}{2}$ — средняя кинетическая энергия молекулы.

Поэтому

$$p = \frac{2}{3} n \bar{E}.$$

Но $n\bar{E}$ — кинетическая энергия молекул в единице объема газа. Делают вывод о том, что давление газа равно $\frac{2}{3}$ кинетической энергии хаотического поступательного движения всех молекул в единице его объема.

4. Уравнение кинетической теории газов для давления следует иллюстрировать числовыми примерами.

1-й пример. Определите концентрацию молекул гелия в электровакуумном приборе при давлении газа в нем $5 \cdot 10^3$ Па. Скорость молекул 500 м/с.

Решение. Из уравнения для давления газа $p = \frac{1}{3} n m \bar{u}^2$ определяют концентрацию молекул:

$$n = \frac{3p}{m\bar{u}^2}.$$

Масса молекулы гелия

$$m = \frac{m_c}{12} M_r,$$

где $\frac{m_c}{12}$ — атомная единица массы ($1,67 \cdot 10^{-27}$ кг) и M_r — относительная молекулярная масса гелия, равная 4. Следовательно,

$$n = \frac{3 \cdot 5 \cdot 10^3 \text{ Па}}{1,67 \cdot 10^{-27} \text{ кг} \cdot 4 \cdot 500^2 \frac{\text{м}^2}{\text{с}^2}} \approx 10^{25} \text{ м}^{-3}.$$

5. Можно показать, что произведение давления на объем газа измеряется в единицах энергии, и вычислить скорость молекул по «макроскопическим» параметрам газа — давлению и плотности газа.

В уравнении

$$p = \frac{2}{3} n \frac{m\bar{u}^2}{2}$$

концентрация молекул $n = \frac{N}{V}$, где N — число молекул во всем объеме газа V . Поэтому

$$p = \frac{2}{3} \frac{N}{V} \frac{m\bar{u}^2}{2},$$

откуда

$$pV = \frac{2}{3} N \frac{m\bar{u}^2}{2}.$$

Произведение $N \frac{m \overline{u^2}}{2}$ равно кинетической энергии всех молекул газа. Значит, *произведение давления газа на его объем равно $\frac{2}{3}$ кинетической энергии хаотического поступательного движения всех молекул газа.*

2-й п р и м е р. Определите кинетическую энергию хаотического поступательного движения всех молекул любого газа в баллоне емкостью 10 л и давлении 0,4 МПа.

Решение. Искомую энергию определяют из уравнения

$$pV = \frac{2}{3} E_k,$$

откуда

$$E_k = \frac{3}{2} pV.$$

$$E_k = \frac{3}{2} 0,4 \text{ МПа} \cdot 10^{-2} \text{ м}^3 = 6 \text{ кДж}.$$

Такую энергию выделяет при сгорании 0,2 г спирта.

6. Так как произведение nm — плотность газа ρ , то основное уравнение кинетической теории газов можно выразить через плотность, т. е.

$$p = \frac{1}{3} \rho \overline{u^2}.$$

Отсюда можно определить среднюю квадратичную скорость молекулы:

$$\sqrt{\overline{u^2}} = \sqrt{\frac{3p}{\rho}}.$$

3-й п р и м е р. Определите среднюю квадратичную скорость молекул азота при 0° С и нормальном давлении.

Решение. При давлении 101 325 Па и температуре $t = 0^\circ\text{C}$ плотность азота $\rho = 1,25049 \text{ кг/м}^3$. Поэтому

$$\sqrt{\overline{u^2}} = \sqrt{\frac{3 \cdot 101325 \text{ Па}}{1,25049 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}}} \approx 490 \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

Обращают внимание учащихся на следующий интересный факт: скорость молекул не зависит от давления газа. Данный вывод следует из того, что плотность газа прямо пропорциональна давлению. Поэтому отношение $\frac{p}{\rho}$ в формуле для скорости молекул остается постоянным при неизменной температуре.

§ 9. Методика введения понятия об абсолютной температуре

Для дальнейшего изучения молекулярно-кинетической теории необходимо ввести одно из основных понятий физики — понятие температуры. Оно является одним из фундаментальных в термодинамике. Наличие температуры у всех тел при тепловом равновесии (обусловленной молекулярным движением) возведено в термодинамике в ранг принципов, который называют *нулевым принципом термодинамики*. В классической механике понятия температуры нет. Все это предполагает методически последовательное и весьма тщательное введение в школьный курс понятия температуры.

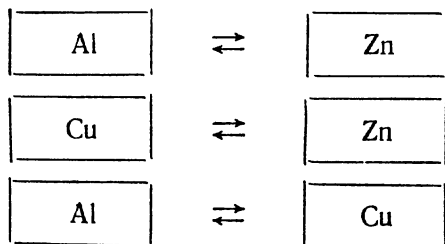
Понятие температуры в курс физики вводится термодинамически, а истолковывают статистически.

Формирование и развитие понятия температуры проходит несколько этапов.

1. Вначале рассматривают переход двух тел к состоянию теплового равновесия («Физика, 9», § 11). О том теле, которое отдает некоторое количество теплоты путем теплопередачи другому телу, находящемуся с первым в контакте, говорят, что его температура выше, а о втором теле, приобретающем это количество теплоты, — что его температура ниже. Выражением «степень нагретости тела» пользоваться не рекомендуется. «Температура определяется как величина, позволяющая описывать тепловое равновесие между телами, находящимися в тепловом контакте»¹.

Как видно из предыдущего, температуру вводят независимо от других величин (и это нужно подчеркнуть на уроке). В Международной системе единиц температура выбрана в качестве одной из основных величин. Она характеризует внутреннее свойство тел или системы и является их *параметром*.

2. Далее рассматривают принцип измерения температуры, который следует из приведенного определения. Разъясняют следующий пример. Если алюминиевый брусок и цинковая пластина и отдельно медный брусок и та же пластина находятся в тепловом равновесии (см. схему), то оба бруска, приведенные в тепловой контакт, находятся в тепловом равновесии:



¹ К у б о Р. Термодинамика. М., 1970, с. 21.

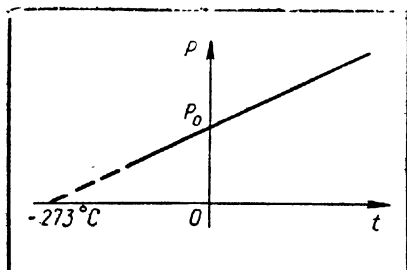


Рис. 18.

Из этого факта делают очень важный вывод: для того чтобы утверждать, что два тела имеют одинаковые температуры, совсем необязательно приводить их в тепловой контакт. Для этой цели можно воспользоваться третьим телом, которое называют термометрическим. В приведенном примере им служит цинковая пластина.

При этом следует рассказать учащимся о выборе термометрического тела (ртуть, спирт, газ) и термометрических шкал.

3. Учитывая, что учащиеся уже знают, как вычислить давление идеального газа, методически целесообразно изучить здесь зависимость давления газа от температуры (закон Шарля) и при анализе этого закона ввести понятие об абсолютной температуре.

А. Эйнштейн писал: «В учении о теплоте абсолютная температура T проще всего (подчеркнуто мною. — Л. Р.) определяется как величина, пропорциональная давлению газа при постоянном объеме»¹.

Демонстрируют опыт с металлическим цилиндром (внутри которого находится воздух), соединенным с манометром. Цилиндр помещают в подогреваемую кипяtilьником воду, температуру которой измеряют термометром, соединенной с демонстрационным гальванометром, градуированным на температуру в градусах Цельсия [ДЭ, I, опыт 135]. Объем цилиндра поддерживают постоянным.

Исходным для опыта является состояние воздуха в цилиндре при 0°C (в воде находятся кусочки льда) и давлении $p_0 \approx 0,1$ МПа. Затем нагревают воду, а следовательно, и воздух. В процессе опыта несколько раз измеряют температуру и соответствующие ей давления. По полученным данным строят график зависимости давления неизменной массы и постоянного объема газа от температуры (рис. 18). Из графика устанавливают, что давление данной массы газа при постоянном объеме является л и н е й н о й функцией температуры (по шкале Цельсия).

Затем вводят понятие о термическом коэффициенте давления:

$$\beta = \frac{p_t - p_0}{p_0 t} = \frac{\Delta p}{p_0 t}$$

и по опытным данным вычисляют его значение в различных интервалах температур. Оно оказывается постоянным, что видно из графика. Формулируют закон Шарля: *для всех газов при неизменной*

¹ Эйнштейн А. Собрание научных трудов, т. III. М., 1966, с. 341.

массе и постоянном объеме термический коэффициент давления одинаков и равен $\frac{1}{273} \text{ K}^{-1} = 0,00366 \text{ K}^{-1}$. Этот закон открыл Жак Александр Сезар Шарль (1746—1823). По известной методике разъясняют смысл этого коэффициента.

Подчеркивают, что изменение давления газа пропорционально не только температуре t , но и первоначальному давлению p_0 , т. е.

$$\Delta p = p_t - p_0 = \beta p_0 t,$$

откуда

$$p_t = p_0 (1 + \beta t).$$

Величину, обратную термическому коэффициенту давления, принимают за 273°C , а температуру -273°C (точнее, $-273,15^\circ\text{C}$)¹ — за абсолютный нуль температуры. Затем вводят абсолютную шкалу температур.

Обращают внимание учащихся на следующее.

1. Величина градуса по шкале Кельвина и по шкале Цельсия одинакова, поэтому существует простая связь:

$$T = t + 273.$$

2. Абсолютный нуль температуры путем отнятия всей энергии теплового движения системы недостижим². В настоящее время достигнута наинизшая температура $1,2 \cdot 10^{-6} \text{ K}$.

3. Температура — это «макроскопический» параметр тела в целом. Для отдельной молекулы он смысла не имеет. Действительно, абсолютная температура характеризуется средней кинетической энергией поступательного движения молекулы, но понятие среднего относится к ансамблю частиц, т. е. к телу в целом.

4. Температура — величина не аддитивная. При тепловом равновесии она постоянна во всех частях термодинамической системы.

5. Уменьшение давления газа при охлаждении согласуется с опытным фактом о зависимости интенсивности броуновского движения от абсолютной температуры газа. С понижением температуры уменьшается средняя скорость беспорядочного движения молекул, а в соответствии с основным уравнением кинетической теории газов уменьшается и давление газа.

6. Закон Шарля можно выразить через абсолютную температуру. Для этого в формуле $p = f(t)$ надо положить $\beta = \frac{1}{273} \text{ K}^{-1}$.

¹ Температура таяния льда при нормальном давлении равна $273,15 \text{ K}$, а температура тройной точки воды в абсолютной шкале Международной системы единиц равна $273,16 \text{ K}$, которая является единственной реперной точкой в этой шкале.

² Вопросы, связанные с возможностью существования отрицательных абсолютных температур, обсуждаются в книге: Б а з а р о в И. П. Термодинамика. М., 1961, гл. X.

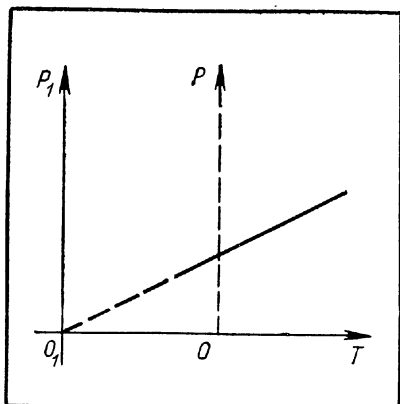


Рис. 19.

Тогда давление газа

$$p_t = p_0 \frac{T}{273}.$$

Так как

$$\frac{p_0}{273} = b = \text{const},$$

то

$$p_t = bT,$$

т. е. давление газа прямо пропорционально абсолютной температуре (рис. 19, сравнить с рисунком 18). Обращают внимание учащихся на штриховой участок графика. Он обозначает, что при низких температурах

прямой пропорциональности между p и T нет. (О границах применимости газовых законов, в том числе закона Шарля, а также о вырождении газов при очень низких температурах см. стр. 46.)

Строгое введение абсолютной шкалы температур возможно на основе второго закона термодинамики, например, с применением цикла Карно. Это можно сделать в школах и классах с углубленным изучением физики и прикладных предметов и на факультативных занятиях в средней школе.

§ 10. Два способа описания перехода к тепловому равновесию. Постоянная Больцмана

Для установления связи между термодинамическим понятием абсолютной температуры и средней кинетической энергией молекул следует дать два описания одного и того же процесса перехода идеальных газов, находящихся в соприкосновении, к тепловому равновесию¹.

Возможна следующая последовательность рассмотрения этого вопроса.

1. Учащимся уже известно, что при тепловом контакте двух тел, имеющих разные температуры, происходит передача энергии (количества теплоты) от более нагретого тела к менее нагретому. Температуры обоих тел выравниваются и при тепловом равновесии становятся одинаковыми.

2. Этот процесс на основе молекулярно-кинетических представлений объясняют тем, что при беспорядочном движении молекулы, обладающие большей кинетической энергией, отдают свою энергию молекулам с меньшей кинетической энергией. При тепловом равновесии их средние кинетические энергии одинаковы.

¹ См.: Кикоин И. К., Кикоин А. К. Молекулярная физика. М., 1963, с. 25—27.

Отсюда следует, что абсолютная температура T и средняя кинетическая энергия молекул $\frac{m\bar{u}^2}{2}$ — это две физические величины, одинаково характеризующие процесс теплообмена и переход к тепловому (температурному) равновесию, первая величина макроскопическая (термодинамическая), вторая — микроскопическая (статистическая). Они эквивалентны в том смысле, что одинаково описывают состояние газа.

Ставят учебную проблему: определить количественную связь между абсолютной температурой и средней кинетической энергией молекул.

Для решения поставленной проблемы записывают два уравнения для давления идеального газа:

$$p = bT$$

и

$$p = \frac{2}{3} n \frac{m\bar{u}^2}{2},$$

откуда получают:

$$\frac{m\bar{u}^2}{2} = \frac{3}{2} \cdot \frac{b}{n} T,$$

Здесь $\frac{b}{n}$ — величина постоянная. Ее обозначают буквой k и по имени ученого Л. Больцмана называют постоянной Больцмана. Предыдущее уравнение можно записать так:

$$\frac{m\bar{u}^2}{2} = \frac{3}{2} kT.$$

При анализе полученного уравнения обращают внимание учащихся на следующее:

1. Здесь речь идет о поступательном движении отдельных молекул идеального газа.

2. Средняя кинетическая энергия хаотического поступательного движения молекул прямо пропорциональна абсолютной температуре (рис. 20, а).

3. Абсолютная температура

$$T = \frac{2}{3k} \cdot \frac{m\bar{u}^2}{2},$$

т. е. абсолютная температура прямо пропорциональна средней кинетической энергии молекулы идеального газа и потому является мерой этой энергии (рис. 20, б)¹.

¹ Надо напомнить учащимся, что еще в VI классе было сказано, что температура зависит от скорости молекул тела. Теперь же, в IX классе, показано, как именно зависит температура газа от скорости его молекул:

$$T \sim \bar{u}^2.$$

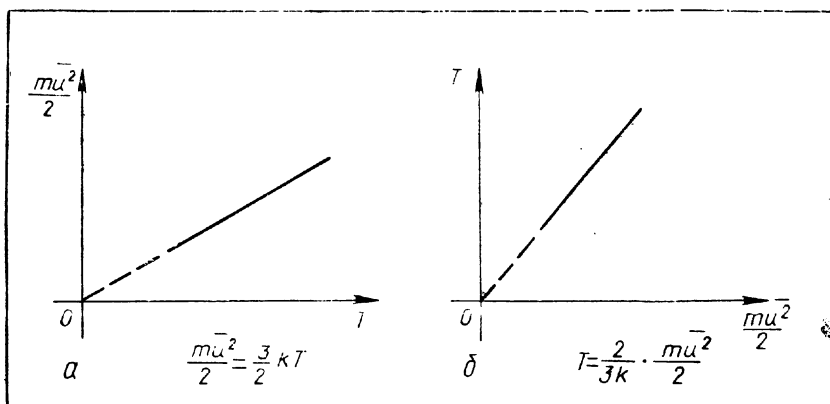


Рис. 20.

Из этого следует, что если система состоит из смеси разных газов, то в равновесном состоянии средние кинетические энергии молекул этих газов одинаковы:

$$\frac{m_1 \bar{u}_1^2}{2} = \frac{m_2 \bar{u}_2^2}{2}.$$

4. Из выражения для внутренней энергии идеального газа:

$$U = E_k = \frac{3}{2} kTN$$

следует, что энергия идеального газа зависит от абсолютной температуры.

5. Вычисляют постоянную Больцмана:

$$k = \frac{b}{n} = \frac{p_0}{273n};$$

$$k = \frac{101325 \text{ Па}}{273 \text{ К} \cdot 2,7 \cdot 10^{26} \text{ м}^{-3}} \approx 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К}.$$

Разъясняют смысл этой постоянной. Если газ нагревается (или охлаждается) на 1К, то это значит, что средняя кинетическая энергия поступательного движения молекулы газа увеличивается (или уменьшается) на $3/2 \cdot 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж}$.

6. Из уравнения $\frac{mu^2}{2} = \frac{3}{2} kT$ можно определить среднюю квадратичную скорость молекулы газа:

$$V_{u^2} = \sqrt{\frac{3kT}{m}}.$$

7. Выразив значение $\frac{m\overline{u^2}}{2}$ через $\frac{3}{2} kT$ и подставив его в основное уравнение кинетической теории газов для давления, получают:

$$p = \frac{2}{3} n \frac{m\overline{u^2}}{2} = \frac{2}{3} n \frac{3}{2} kT = nkT.$$

Разъясняют, что давление газа зависит от двух независимых друг от друга величин n и T и не зависит от химического состава молекул.

§ 11. Уравнение состояния газа Менделеева — Клапейрона

Уравнение состояния газа может быть получено на основе обобщения опытных данных — газовых законов или из основного уравнения кинетической теории газов, причем также с учетом опытного закона Шарля. Независимо от избранного методического пути вначале необходимо дать понятие о состоянии системы. В связи с этим следует ввести термин «параметр» как физическую величину, характеризующую состояние тела или системы. Поясняют, что параметрами состояния системы являются объем, давление и температура, и определяют их для равновесного состояния системы, в том числе для идеального газа (простейшая молекулярная система). Равновесное состояние газа и его изменение необходимо иллюстрировать на опытах с воздухом.

Сквозь пробку в горле толстостенной бутыли (рис. 21) пропу-

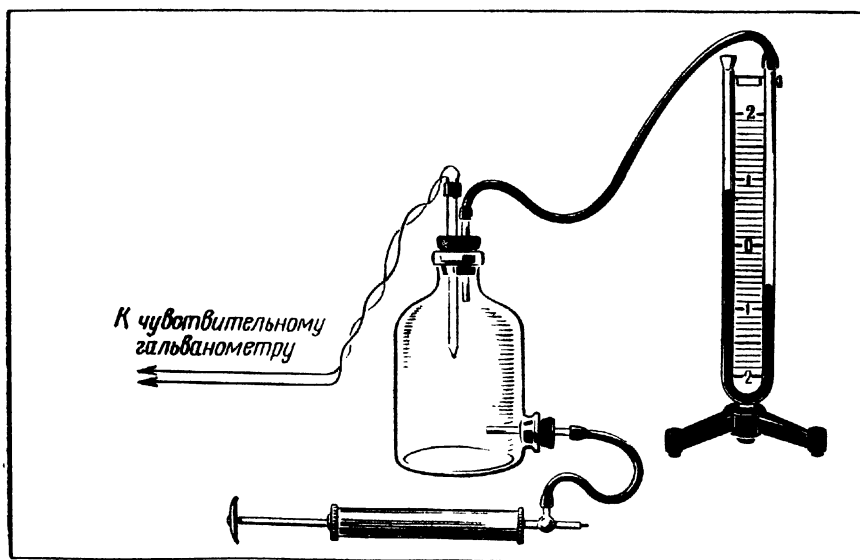


Рис. 21.

скают трубку, соединенную с манометром, и проводники от термопары, подключенные к демонстрационному или проекционному гальванометру. Через другую пробку в бутылки проходит трубка, конец которой присоединяют к воздушному насосу.

При небольшом нагнетании воздуха его давление и температура в бутылки повышаются, что видно по показаниям измерительных приборов. Обращают внимание учащихся на то, что равновесное состояние воздуха наступает не сразу. Спустя некоторое время показания приборов перестанут изменяться. Наступит тепловое равновесие между частями объема газа в бутылки и всего газа в нем с окружающей средой. Равновесное состояние газа характеризуется его объемом V (равным объему сосуда), давлением p и температурой T . Опыт желательно повторить несколько раз (нагнетая воздух или нагревая его от постороннего источника тепла).

Ставят задачу: определить связь между тремя параметрами газа. Связь между двумя параметрами p и T учащимся уже известна:

$$p = nkT.$$

Для того чтобы ввести в это уравнение объем газа V , надо выразить концентрацию молекул n через этот объем:

$$n = \frac{N}{V},$$

где N — общее число молекул газа в объеме V . Поэтому

$$p = \frac{N}{V} kT.$$

Методически целесообразно вывести уравнение состояния сразу для любой массы газа, измеренной в молях. Тогда не придется пользоваться удельной газовой постоянной, которая для килограмма газа различного химического состава имеет неодинаковые значения.

Общее число молекул N равно произведению числа Авогадро N_A на число молей ν :

$$N = N_A \nu.$$

Подставив значение N в уравнение для давления, получают:

$$p = \frac{N_A \nu}{V} kT,$$

или

$$pV = N_A \nu kT.$$

Произведение двух постоянных N_A и k также равно постоянной величине

$$N_A k = R.$$

Поэтому окончательно уравнение можно записать так:

$$pV = \nu RT.$$

Число молей

$$\nu = \frac{m}{M},$$

где m — масса газа в килограммах, а M — молярная масса газа в килограммах на моль. Поэтому предыдущее уравнение примет вид:

$$pV = \frac{m}{M} RT.$$

Это уравнение состояния идеального газа в честь ученых Д м и т р и я И в а н о в и ч а М е н д е л е е в а (1834—1907) и Б е н у а К л а п е й р о н а (1799—1864) называют уравнением Менделеева—Клапейрона. Величина R является постоянной для одного моля любого газа независимо от его химического состава, поэтому ее называют молярной (универсальной) газовой постоянной. Постоянная $R = 8,31 \text{ Дж}/(\text{моль} \cdot \text{К})$. Вычисление молярной газовой постоянной дано в учебном пособии («Физика, 9», § 17).

При решении задач с применением уравнения состояния идеального газа следует учитывать соотношение $M = 10^{-3} M_r$.

Надо экспериментально подтвердить правильность уравнения, связывающего величины p , V и T .

Берут цилиндр переменного объема (сильфон) 1 (рис. 22), в котором находится воздух при нормальном давлении, и соединяют его с манометром 2. Температуру окружающего воздуха, равную температуре воздуха в цилиндре при тепловом равновесии, определяют с помощью термопары 3, включенной в цепь чувствительного демонстрационного (или проекционного) гальванометра 4. Объем

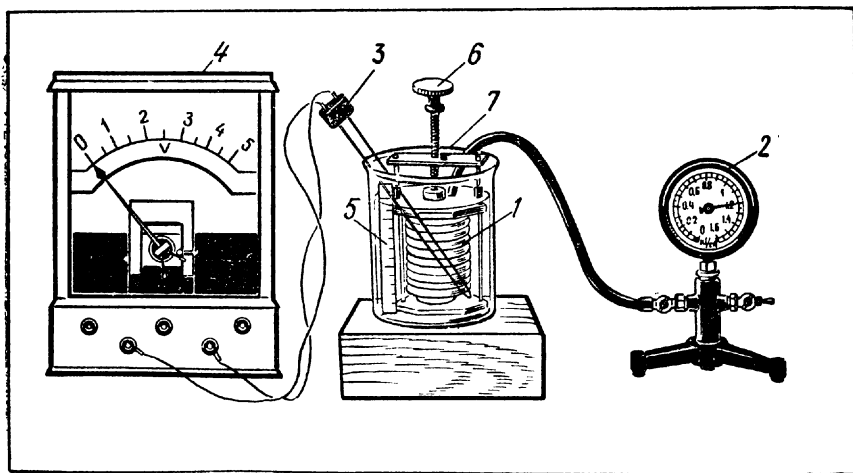


Рис. 22.

воздуха в цилиндре, прямо пропорциональный высоте цилиндра, измеряют в условных единицах по линейке 5 с делениями.

В начале опыта объем цилиндра с помощью винта 6 устанавливают таким, чтобы давление воздуха было равно 0,1 МПа. Объем, давление и температуру измеряют три раза: при комнатной температуре, при температуре холодной воды, налитой в сосуд 7, и при температуре нагретой воды. Все измерения делают только при тепловом равновесии.

Так как число молей воздуха в данном опыте неизвестно, то по измерениям можно вычислить только, чему равно $\frac{pV}{T}$, и убедиться в том, что во всех трех случаях результаты вычислений будут одинаковыми в пределах точности измерений [ДЭ, I, опыт 136], т. е. что

$$\frac{pV}{T} = \text{const.}$$

Действительно, из уравнения Менделеева — Клапейрона следует, что $\frac{pV}{T} = \nu R$. Величина R — молярная газовая постоянная. В опыте число молей газа ν и его состав также не изменялись. Следовательно, произведение νR тоже величина постоянная. Поэтому

$$\frac{pV}{T} = \nu R = \text{const.},$$

что и было определено на опыте¹.

При изучении уравнения состояния идеального газа необходимо обратить внимание на разъяснение следующих вопросов:

1. Так как уравнение Менделеева — Клапейрона подтверждается опытом, а само оно было выведено из основного уравнения кинетической теории газов, то исходные положения вывода этого последнего уравнения (модель идеального газа, упругие столкновения молекул со стенками сосуда) и сам вывод правильны. Следует подчеркнуть, что выводы законов дедуктивным методом с помощью исходной физической модели явления, подтвержденные на практике, также правомерны, как и экспериментальные открытия. Такое заключение имеет методологический смысл, понимание которого способствует развитию научного мышления и мировоззрения учащихся.

2. Существуют различные определения идеального газа, по своему содержанию равнозначные. Например, газ называют идеальным, если для него справедливо уравнение Менделеева — Клапейрона (или следствия из него — газовые законы), или если в нем существует максвелловское распределение молекул по скоростям (по модулю).

¹ Лабораторную работу для проверки постоянства отношения $\frac{pV}{T}$ можно поставить с помощью простых средств. См.: Кошелев А. Н. Работа практикума «Проверка газовых законов». — «Физика в школе», 1968, № 5, с. 76—78.

Такого рода определения, вообще говоря, формальны. Когда их используют, то предполагается понимание физической модели идеального газа. Но эти формальные определения заменяют многословные качественные описания, и поэтому они все же необходимы в школьном преподавании.

3. В реальных газах при больших разрежениях молекулярные взаимодействия не проявляются и общий объем молекул значительно меньше объема, занимаемого всем газом. Такой газ можно считать идеальным. К нему также применимо уравнение Менделеева — Клапейрона.

4. Уравнение Менделеева — Клапейрона характеризует состояние идеального газа при тепловом равновесии, а не процесс. Переход от одного состояния в другое сопровождается изменением объема, давления и температуры. При быстром изменении одного из его параметров (например, объема) изменяются и два других параметра газа (давление и температура). При этом в разных частях объема газа один и тот же параметр будет неодинаковым.

5. Уравнение состояния идеального газа применимо не только к газам, но и к парам (до насыщения).

6. Постоянная Больцмана может быть истолкована двояко: как числовой эквивалент, связывающий абсолютную температуру, измеренную в единицах энергии и в градусах, и как величина молярной газовой постоянной, отнесенной к одной молекуле любого газа.

§ 12. Методика изучения газовых законов. О решении задач

При дедуктивном методе изучения этой темы газовые законы можно получить или как следствия основного уравнения кинетической теории газов, или из уравнения состояния идеального газа. Оба пути равноправны, так как второе уравнение вытекает из первого. Далее приведен материал с использованием обоих уравнений.

Закон Бойля — Мариотта. Из уравнения состояния идеального газа $pV = RT$ следует, что при постоянной температуре

$$pV = \text{const.}$$

Этот закон носит имя ученых Роберта Бойля (1627—1691) и Эдма Мариотта (1620—1684). Его можно записать в виде пропорции. С этой целью закон Бойля—Мариотта записывают для двух состояний неизменной массы газа:

$$p_1V_1 = \text{const.},$$

$$p_2V_2 = \text{const.}$$

В обоих случаях произведения объема на давление газа одинаковы. Поэтому

$$p_1V_1 = p_2V_2,$$

откуда

$$\frac{p_1}{p_2} = \frac{V_2}{V_1}.$$

Закон Гей-Люссака. Из уравнения состояния идеального газа определяют его объем:

$$V = \frac{R}{p} T.$$

При постоянном давлении p газа отношение

$$\frac{R}{p} = a = \text{const.}$$

Поэтому

$$V = aT.$$

Этот закон открыт ученым Ж о з е ф о м Л у и Г е й-Л ю с с а к о м (1778—1850).

Для двух состояний газа:

$$V_1 = aT_1;$$

$$V_2 = aT_2.$$

Следовательно,

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{T_1}{T_2}.$$

Закон Шарля. Для двух состояний газа (см. стр. 36):

$$p_1 = bT_1;$$

$$p_2 = bT_2,$$

откуда

$$\frac{p_1}{p_2} = \frac{T_1}{T_2}.$$

Формулируют каждый из этих законов. Дают также формулировки законов, выраженные в виде пропорций. Приводят графики, в соответствующих координатных осях, с указанием, какие параметры являются постоянными. Дают понятие об изотермическом, изохорном и изобарном процессах. Вычерчивают семейство кривых для каждого процесса (рис. 23, $a—e$). (На рисунке 23, b объемы и на рисунке 23, g давления прямо пропорциональны котангенсам соответствующих углов.) Каждый из газовых законов демонстрируют на опыте.

Закон Авогадро. Для вывода закона пользуются основным уравнением кинетической теории газов для давления в виде $p = nkT$. Здесь $n = \frac{N}{V}$, где N — число молекул (атомов) в объеме газа V .

Уравнение записывают для двух различных газов:

$$p_1 V_1 = N_1 k T_1;$$

$$p_2 V_2 = N_2 k T_2.$$

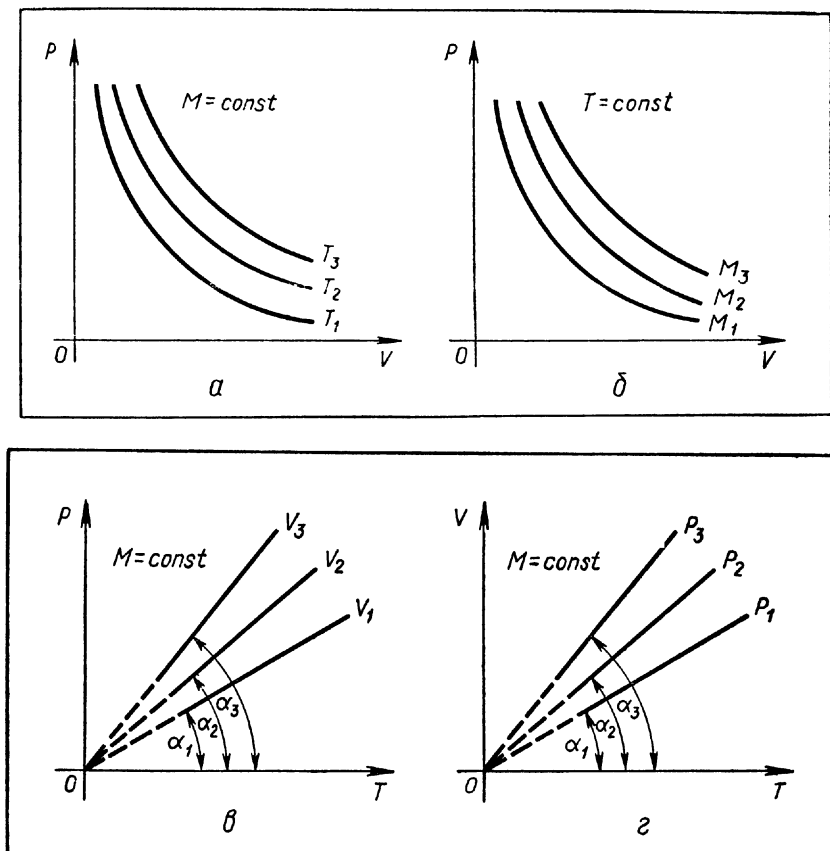


Рис. 23.

Если равны их объемы ($V_1 = V_2$), давления ($p_1 = p_2$) и абсолютные температуры ($T_1 = T_2$), то число молекул в обоих газах одинаково, т. е.

$$N_1 = N_2.$$

Делают вывод о том, что в равных объемах газов при одинаковых условиях (давлениях и температурах) содержится одинаковое число молекул или атомов (закон Авогадро).

В таких случаях число молей ν у обоих газов одинаково. Поэтому

$$\frac{N_1}{\nu_1} = \frac{N_2}{\nu_2} = N_A,$$

где N_A — число Авогадро. Следовательно, закон Авогадро справедлив и для того частного случая, когда количество вещества каждого из двух газов равно по одному молю.

Очень важно разъяснить учащимся, что существуют границы применимости газовых законов. При больших давлениях начинают проявляться молекулярные взаимодействия и относительно большой объем, занимаемый молекулами газа; при низких температурах имеются отступления от газовых законов (как и в законе Шарля; см. стр. 36); при температурах, близких к абсолютному нулю, газы сжижаются, а потому понятие о газе в этих условиях теряет смысл.

В практике преподавания возникают вопросы: какие, сколько и по какой методике надо решать задачи по молекулярно-кинетической теории газов? На эти вопросы можно дать следующий ответ.

В процессе изучения темы достаточно иллюстрировать изложение конкретными числовыми примерами. Это может быть простая подстановка числовых данных в полученную формулу, например в основное уравнение кинетической теории газов для давления в виде $p = \frac{2}{3} n \frac{m\bar{u}^2}{2}$ и $p = nkT$, в формулы для кинетической энергии хаотического поступательного движения молекул одноатомного газа: $E_k = \frac{3}{2} pV$ и $\frac{m\bar{u}^2}{2} = \frac{3}{2} kT$, средней квадратичной скорости молекул идеального газа: $\sqrt{\bar{u}^2} = \sqrt{\frac{3p}{\rho}}$, $\sqrt{\bar{u}^2} = \sqrt{\frac{3kT}{m}}$ и $\sqrt{\bar{u}^2} = \sqrt{\frac{3RT}{M}}$, а также вычисление числа Авогадро, постоянной Больцмана и молярной газовой постоянной. Такие примеры дают учащимся возможность «прочувствовать» порядок полученной физической величины и прививают умение проверять решение задач по единицам физических величин. Решать сложные задачи по этим вопросам нет необходимости.

Большую практическую ценность имеют задачи на газовые законы. Эти задачи надо решать на основе одного уравнения Менделеева — Клапейрона в виде $pV = \frac{m}{M} RT$. Задачи должны требовать определения одного из неизвестных параметров состояния газа в этом уравнении (при постоянной массе и неизменном химическом составе газа таких параметров три). Если же параметры газа изменяются от некоторых начальных до конечных значений, то для нахождения какого-либо из параметров газа в одном из двух его состояний необходимо воспользоваться двумя уравнениями, соответствующими этим состояниям газа. Возможны также более сложные задачи: когда изменяется масса газа (например, часть газа из сосуда вытекла или использована для технологических процессов), когда нужно определить плотность газа и др. Использование одного общего уравнения значительно облегчает учащимся решение задач и убеждает их в том, что общих законов физики не так уж много и все они имеют широкую область применения.

Большую методическую ценность имеют графические задачи. Это в значительной степени относится и к изучению тепловых явле-

ний. Ведь в термодинамике графический метод занимает важное место.

Рекомендуется решать задачи с применением изображений изопроцессов (изотермический, изобарный, изохорный) в различных координатных осях pV , pT и VT ; анализировать явления, изображаемые замкнутыми циклами, состоящими из перечисленных изопроцессов; изображать на координатной плоскости семейство кривых одних и тех же процессов газа и анализировать условия перехода газа из одного равновесного состояния в другое, соответствующие разным кривым.

Ценность экспериментальных задач общеизвестна.

Тексты физических задач по молекулярно-кинетической теории газов имеются во многих учебных пособиях.

По теме рекомендуется демонстрировать учебный кинофильм «Получение и применение сжатого воздуха» (1 ч.).

Глава IV

ТЕПЛОВЫЕ ЯВЛЕНИЯ

§ 13. Введение

В главе рассмотрен круг вопросов, который составляет термодинамическую часть раздела «Молекулярная физика», изучаемую в IX классе. При этом большое внимание уделено рассмотрению физических основ работы тепловых двигателей и особенно обоснованию необходимости для работы периодически действующей машины нагревателя, рабочего тела и холодильника.

Изучению физических основ работы тепловых двигателей предшествует повторение и углубление знаний о внутренней энергии, количестве теплоты и работе.

Внутренняя энергия. Всякая энергия является функцией состояния тела или системы тел. Механическая энергия (кинетическая и потенциальная) — это функция скоростей системы и ее координат, т. е. внешних параметров.

Совокупность всех видов энергии, заключенных в рассматриваемой системе, за исключением кинетической и потенциальной энергии ее как целого¹, называют внутренней энергией.

Внутренняя энергия представляет собой функцию температуры, давления и других параметров системы, т. е. величин, определяющих ее внутреннее состояние.

В каждом состоянии тело обладает одним определенным значением энергии, т. е. энергия является однозначной функцией состояния. Это непосредственно следует из закона сохранения энергии. Действительно, если бы тело в данном состоянии обладало, напри-

¹ Эти виды энергии остаются постоянными при изменениях состояния системы, рассматриваемых в термодинамике.

мер, внутренней энергией U и в том же состоянии могло бы обладать внутренней энергией U_1 , то от тела можно было бы отнять энергию $\Delta U = U - U_1$ и состояние его при этом не изменилось. Такое тело могло бы служить источником энергии, не испытывая при этом никаких изменений, что противоречит закону сохранения энергии. А это и значит, что энергия есть однозначная функция состояния:

Не может быть такого вида энергии, который бы не являлся однозначной функцией состояния. Тот факт, что изменение энергии не зависит от процесса перехода тела из одного состояния в другое, а определяется начальным и конечным состоянием тела, есть обязательный признак, присущий любому виду энергии.

Отсюда вытекает важная задача методики изучения понятия энергии: объяснить учащимся, что при воздействии на тело меняется его состояние, а следовательно, меняется его энергия, причем прирост и убыль энергии связаны с изменением состояния так, что при возвращении тела в исходное состояние его энергия принимает первоначальное значение. В этом и состоит понимание энергии как однозначной функции состояния.

Кроме указанной выше чисто термодинамической трактовки внутренней энергии, необходимо дать еще и ее молекулярно-кинетическую интерпретацию.

В настоящее время в понятие внутренней энергии включают: кинетическую энергию поступательного и вращательного движения молекул; потенциальную энергию их взаимодействия; энергию колебательного движения атомов; энергию электронных оболочек атома; внутриядерную энергию; энергию электромагнитного излучения, заполняющего с некоторой плотностью пространство, занятое телом.

Может возникнуть опасение, что в связи с такой сложностью понятия внутренней энергии ее невозможно вводить в курс физики средней школы, так как, раскрывая в элементарном курсе понятие внутренней энергии как энергии движения и взаимодействия молекул, допускают вульгаризацию этого понятия. Однако это не так.

Внутреннюю энергию, как и другие виды энергии, всегда рассматривают относительно какого-то ее значения, условно принимаемого за нулевое. Имеет смысл говорить не о полном запасе внутренней энергии, а лишь об ее изменении при переходе тела из одного состояния в другое. В тепловых явлениях, протекающих при температурах среднего интервала (до нескольких тысяч градусов), изменение внутренней энергии связано с изменением лишь кинетической и потенциальной энергии молекул. Все остальные составляющие внутренней энергии при этом не изменяются.

Если внутреннюю энергию обозначить через U , кинетическую и потенциальную энергию молекул через E_k и E_n , а все остальные виды энергии — через E , то для двух каких-либо состояний можно записать:

$$U' = E'_k + E'_n + E'; U'' = E''_k + E''_n + E,$$

откуда

$$\Delta U = U'' - U' = \Delta E_{\kappa} + \Delta E_{\pi}.$$

Поэтому, раскрывая молекулярный смысл внутренней энергии при изучении тепловых явлений в курсе физики средней школы, можно, не делая ошибок и не допуская вульгаризации, связывать внутреннюю энергию только с кинетической энергией движения и потенциальной энергией взаимодействия молекул.

Количество теплоты. Понятие «количество теплоты» также входит в выражение первого закона термодинамики: $dU = \delta Q + \delta A$.

В отличие от внутренней энергии, количество теплоты, как и работа, не является функцией состояния; оно характеризует процесс изменения состояния и определяется заданием процесса перехода из одного состояния в другое.

Так как изменение энергии полностью определяется начальным и конечным состояниями, то количество теплоты, которое по первому закону термодинамики определяется изменением внутренней энергии тела и совершенной телом работой, тоже, как и работа, зависит от процесса перехода тела из одного состояния в другое.

При переходе из состояния A в состояние B тело может получить различные количества теплоты. Следовательно, бессмысленно говорить о том, каким количеством теплоты обладает тело в состоянии B или вообще в каком-либо другом состоянии. Можно говорить лишь о внутренней энергии, содержащейся в теле, так как в каждом состоянии тело обладает лишь одним определенным значением энергии. Утверждение, что «тело содержит некоторое количество теплоты», так же бессмысленно, как и выражение: «Тело содержит некоторое количество работы». Количество теплоты не является функцией состояния, а зависит от процесса перехода тела из одного состояния в другое. Математически это значит, что элементарное количество теплоты и элементарная работа в отличие от внутренней энергии, не являются полными дифференциалами (для их обозначения применяют символ δ в отличие от d для полных дифференциалов).

Изменение внутренней энергии может происходить двумя единственно возможными способами: при совершении работы и при теплопередаче. Работа представляет собой макрофизический процесс изменения энергии. При этом процессе всегда происходит макроскопическое перемещение тела под действием приложенных сил.

Как и работа, теплопередача — это форма изменения энергии. Однако теплопередача осуществляется без каких-либо макрофизических перемещений и возникает в результате элементарных процессов, происходящих в молекулярном и атомном мире. Такие микропроцессы всегда совершаются в большом количестве во всяком веществе. Теплопередача представляет собой микрофизическую форму изменения энергии.

Теплопередача по существу также является работой. Но эта сумма большого числа «микроработ», которые совершаются над

отдельными молекулами. Например, при непосредственном соприкосновении горячего и холодного тел быстро движущиеся молекулы одного тела соударяются с медленно движущимися молекулами другого. При этом совершается работа, в результате которой кинетическая энергия молекул первого тела убывает, а второго возрастает. Следовательно, теплопередача — это понятие, близкое к работе.

Зависимость теплопередачи и работы от процесса — основное их свойство. Нужно отметить, однако, что слово «теплота», оставшееся нам в наследство от теплородной гипотезы, мало приспособлено для выражения процесса. Оно значительно лучше выражало субстанциальный характер теплоты, теплорода, содержащегося в теле.

Этим в известной мере объясняется трудность, возникающая в практике преподавания при переходе к трактовке теплопередачи как формы изменения энергии.

Количественной характеристикой макрофизического процесса изменения энергии является величина работы, а количественной характеристикой микрофизического процесса изменения энергии (теплопередачи) — количество теплоты.

Следует отметить, что термин «количество теплоты» тоже «теплородный», однако если его истолковать правильно, то им можно пользоваться и в современном изложении тепловых явлений.

Количество теплоты в соответствии с изложенным выше мы должны понимать как величину, аналогичную величине работы, т. е. как меру изменения внутренней энергии тела в тепловом процессе. Это необходимо раскрыть в преподавании тепловых явлений, четко разграничив понятие энергии, с одной стороны, и понятия работы и количества теплоты, с другой.

§ 14. Формирование понятия внутренней энергии

Понятие о внутренней энергии учащимся известно еще из курса физики VII класса. Однако, в связи с тем что на первой ступени обучения молекулярную теорию изучали лишь качественно, формирование понятия о внутренней энергии в IX классе должно быть продолжено.

После изучения основ молекулярно-кинетической теории появляется возможность оценить количественно внутреннюю энергию идеального газа, используя при этом выражение для средней кинетической энергии молекулы ($\frac{m\bar{u}^2}{2} = \frac{3}{2} kT$).

В связи с тем что внутренняя энергия тела состоит не только из кинетической энергии молекул, но и из потенциальной энергии их взаимодействия, оценить значение этой энергии для твердых тел и жидкостей трудно. Это можно сделать лишь для идеальных газов и с достаточной точностью для реальных газов, так как в этом случае можно пренебречь потенциальной энергией взаимодействия молекул.

Внутренняя энергия некоторой массы газа, например одного моля, равна

$$U = \frac{3}{2} N_A k T, \quad (1)$$

где N_A — число Авогадро.

Для закрепления знаний о внутренней энергии учащимся полезно выполнить некоторые упражнения. Например:

а) подсчитать изменение внутренней энергии 0,3 кг кислорода, находящегося в закрытом сосуде, при его охлаждении на 10°C ;

б) определить изменение внутренней энергии воздуха в камере волейбольного мяча, внесенного с улицы ($t_1 = -10^\circ\text{C}$) в помещение ($t_2 = 20^\circ\text{C}$), если масса воздуха в нем 10 г.

Нетрудно, пользуясь формулой (1), показать учащимся, каким огромным запасом внутренней энергии обладает земная атмосфера ($m = 10^{18}$ кг). Можно также оценить приблизительно (без учета потенциальной энергии молекул) энергию морей и океанов ($m = 10^{21}$ кг).

Однако, как известно, эти колоссальные запасы энергии не могут быть причислены к энергетическим ресурсам, так как возможности использования внутренней энергии существенно отличаются от использования механической энергии. И эти особенности использования внутренней энергии должны быть предметом изучения в данной теме, что послужит дальнейшему углублению знаний учащихся о внутренней энергии — основном виде энергии, используемом в настоящее время на земном шаре. Как известно, на современном этапе развития энергетики до 80% всех действующих в мире электростанций составляют тепловые, использующие внутреннюю энергию различных видов топлива (в том числе и ядерного).

Возникает проблема, которую следует поставить перед учащимися: выяснить, как наиболее эффективно может быть использована внутренняя энергия тел.

Для решения поставленной задачи следует прежде всего напомнить учащимся о том, что существует два способа, которыми можно уменьшить энергию одного тела и передать ее другому телу: теплопередача и работа (это известно из курса физики VII класса).

Примеры изменения внутренней энергии путем теплопередачи (без совершения работы) могут привести сами учащиеся: утюг остывает, а окружающие предметы нагреваются; горячее тело, опущенное в холодную жидкость, остывает, его внутренняя энергия уменьшается, а жидкость нагревается, и ее внутренняя энергия увеличивается.

Нетрудно привести примеры изменения внутренней энергии и при совершении работы: нагревание металлических предметов при их механической обработке и т. д. Желательно также показать на опыте изменение внутренней энергии при совершении работы. Такие опыты описаны в пособии по демонстрационному эксперименту [ДЭ, I]. Это опыты по нагреванию свинца ударами молотка

(опыт 128); по нагреванию металлической трубки трением (опыт 129); по нагреванию стержня при его растяжении (опыт 130). Особенно интересен опыт по изменению температуры воздуха при его сжатии и расширении (опыт 131). Вторая часть этого опыта позволяет показать, что тела, совершающие работу, охлаждаются, т. е. их внутренняя энергия уменьшается.

Для решения поставленной выше проблемы о нахождении наиболее эффективного способа использования внутренней энергии необходимо еще остановиться на вопросе о существовании эквивалентных соотношений между обоими способами изменения внутренней энергии — теплопередачей и работой. Это позволит довести знания учащихся о законе превращения и сохранения энергии в механических и тепловых процессах (VII класс) до его формулировки в виде первого закона термодинамики.

§ 15. Закон сохранения энергии в механических и тепловых процессах (первый закон термодинамики)

Приступая к изучению первого закона термодинамики, прежде всего необходимо разъяснить учащимся, что известные им способы изменения внутренней энергии — теплопередача и работа — эквивалентны. Это значит, что если над телом будет совершена некоторая работа, например в 1 Дж, то его внутренняя энергия изменится точно так же, как и при передаче ему количества теплоты, равного 1 Дж. И наоборот, если тело совершает работу в 1 Дж, то его внутренняя энергия изменяется настолько же, как и при передаче им другому телу количества теплоты, равного 1 Дж.

Это позволит распространить закон сохранения энергии, известный учащимся для механических процессов (VIII класс), и на тепловые процессы.

В том случае, когда единственным процессом изменения внутренней энергии является теплопередача, на основании закона сохранения энергии можно утверждать, что количество теплоты Q , поглощенное или выделенное в этом процессе, равно изменению внутренней энергии тела:

$$Q = \Delta U.$$

Величину Q берут с определенным знаком, который указывает направление теплопередачи. Если тело получает некоторое количество теплоты, то изменение его внутренней энергии положительно ($\Delta U > 0$). В этом случае количество теплоты также величина положительная. Отданное же телом количество теплоты — величина отрицательная.

Если изменение внутренней энергии тела происходит только за счет совершения работы, то величина этой работы A тоже равна изменению его внутренней энергии ΔU .

Работа также может быть величиной положительной или отрицательной в соответствии с ее определением, известным учащимся

из механики. Если, например, направление силы, действующей на газ, совпадает с направлением движения поршня (сжатие газа), то работа этой силы положительна. При расширении газа работа внешней силы отрицательна. В первом случае внутренняя энергия газа увеличивается, а во втором уменьшается.

Из закона сохранения энергии следует, что полное изменение внутренней энергии ΔU для случая, когда и совершается работа, и происходит теплопередача, складывается из изменения внутренней энергии ΔU_1 и ΔU_2 для каждого из этих процессов в отдельности, т. е.

$$\Delta U = \Delta U_1 + \Delta U_2.$$

Но

$$\Delta U_1 = A, \text{ а } \Delta U_2 = Q.$$

Следовательно,

$$\Delta U = Q + A.$$

Если рассчитывают работу силы, с которой газ действует на внешние тела, то при расширении газа она будет положительной (а при сжатии — отрицательной). Следовательно, работу силы, с которой газ при изменении объема действует на внешние тела (A_r), следует в уравнении (2) писать со знаком минус:

$$\Delta U = Q - A_r, \text{ или } Q = \Delta U + A_r \quad (2)$$

Уравнение (2) представляет собой выражение закона сохранения энергии для механических и тепловых процессов. Его называют первым законом термодинамики. Этот закон носит всеобщий характер и применим к любым без исключения явлениям природы.

Какие бы явления ни рассматривали — движения тел, связанные с трением, прохождение электрического тока по проводам, световые явления и т. д., — все они сопровождаются совершением работы или теплопередачей, и к ним применим первый закон термодинамики.

§ 16. Использование внутренней энергии

В начале изучения темы перед учащимися была поставлена проблема: найти наиболее эффективные способы использования внутренней энергии. В предыдущих параграфах было показано, на какие знания учащихся необходимо опираться для решения этой задачи.

В соответствии с известными уже учащимся двумя способами изменения энергии существует и два принципиально различных способа ее использования:

1. Внутреннюю энергию используют в ряде технологических процессов, связанных с нагреванием тел (плавка и другие виды горячей обработки металлов, пластмасс, стекла), а также для обогрева помещений при помощи горячего пара или воды.

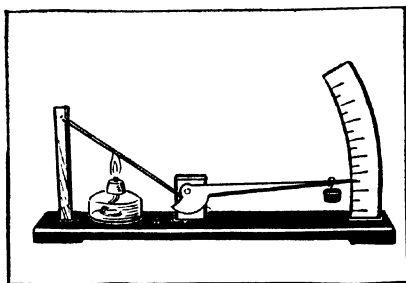


Рис 24

2. Второй способ использования внутренней энергии — для совершения работы за счет нее, например за счет энергии сжигаемого топлива, имеет наибольшее народнохозяйственное значение.

Поэтому поставленная проблема поиска наиболее эффективных путей использования внутренней энергии будет относиться именно к нахождению условий, при которых за счет

внутренней энергии может быть совершена максимальная работа.

Учащиеся знают, что работа может быть совершена лишь в случае перемещения тел под действием силы. Нагретые тела расширяются, что неизбежно связано с движением одних частей тела относительно других. Следовательно, расширяющиеся тела способны совершить работу. Это желательно продемонстрировать на каком-либо опыте, например на опыте с расширяющимся стержнем, действующим на стрелку (рис. 24).

Необходимо разъяснить, почему именно газы или пары применяют в качестве тела, совершающего работу при расширении. Очевидно, что объясняется это большим коэффициентом расширения газов: в десятки и сотни раз большим, чем у твердых и жидких тел.

Итак, учащиеся усваивают, что именно газы целесообразно использовать в качестве рабочего тела при совершении работы за счет внутренней энергии.

Возникает методическая проблема: на какие из процессов расширения газов следует обратить особое внимание школьников.

Обычно в средней школе изучали одинаково подробно четыре процесса: изотермический, изобарный, изохорный и адиабатный. Но какие из них действительно необходимы для решения поставленной проблемы — получения максимальной работы за счет данного количества внутренней энергии?

Очевидно, максимальная работа будет совершаться при таких процессах, в которых исключен контакт горячего тела с холодным, так как при таком контакте происходит теплопередача без совершения работы. Такими процессами могут быть изотермический и адиабатный. В первом процессе расширение газа происходит при постоянной температуре, а во втором — газ расширяется, будучи теплоизолированным от окружающих тел. Как известно, именно поэтому цикл Карно, дающий максимальный коэффициент полезного действия, состоит из этих двух процессов. Следовательно, работу газа в этих процессах желательно изучать более подробно.

Как можно подготовить учащихся к пониманию того, что именно эти процессы позволяют решить поставленную перед ними проблему?

Следует напомнить им, что теплопередача происходит тогда, когда соприкасаются тела, имеющие различную температуру. Контакт расширяющегося газа с более холодным телом тотчас же привел бы к передаче этому телу некоторого количества теплоты, т. е. к уменьшению внутренней энергии без совершения работы. Учащимся следует разъяснить, что контакт расширяющегося газа с более холодными телами может быть исключен, если газ расширяется при указанных выше условиях.

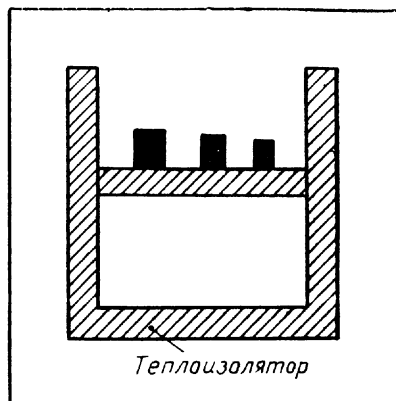


Рис. 25.

После такого разъяснения приступают к изучению этих процессов.

Адиабатный процесс. Прежде всего следует рассмотреть, как можно осуществить такой процесс. Очевидно, для этого цилиндр, в котором расширяется газ, и поршень должны быть сделаны из теплоизолирующего материала. Давление газа в цилиндре будет уравниваться весом самого поршня и груза, находящегося на нем (рис. 25). При постепенном снятии грузов с поршня газ будет расширяться (равновесно) и совершать работу без теплообмена с окружающей средой ($Q = 0$).

Далее дают определение адиабатного процесса как такого, при котором исключен теплообмен с окружающей средой.

Применяя к этому процессу первый закон термодинамики (2), получают $\Delta U = -A_p$. Следовательно, в адиабатном процессе изменение внутренней энергии равно работе газа, взятой с противоположным знаком. При этом адиабатное расширение газа приводит к понижению его температуры, а адиабатное сжатие — к повышению ее. Необходимо указать учащимся, что практически адиабатный процесс осуществляется главным образом не за счет теплоизоляции, а за счет скорости протекания процесса. Если процесс протекает очень быстро (см. стр. 10), то теплопередача практически не происходит.

Можно напомнить школьникам опыт с воздушным огнем и сослаться на опыты, которые были показаны при введении понятия внутренней энергии в VII классе.

Целесообразно обратить внимание учащихся на адиабатное охлаждение воздуха в атмосфере. Нагретый у поверхности Земли воздух при быстром подъеме в верхние слои атмосферы расширяется почти адиабатно и при этом охлаждается. Водяные пары в нем конденсируются в мелкие капли и кристаллики, образуя облака.

Изотермический процесс. Выясняют с учащимися, как можно осуществить такой процесс. Пусть сжатый газ находится в цилинд-

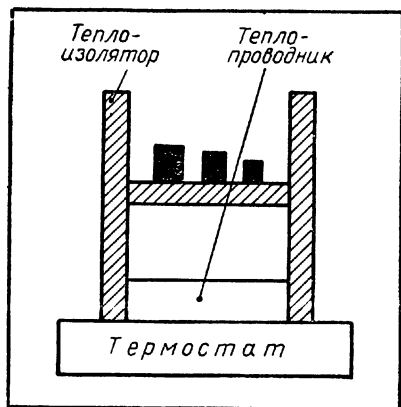


Рис. 26.

ре под нагруженным поршнем, который уравнивает давление газа (рис. 26). Дно цилиндра, соприкасающееся с нагревателем, изготовлено из материала, обладающего очень высокой теплопроводностью. Благодаря этому газ в цилиндре будет иметь температуру нагревателя. Если теперь постепенно (очень медленно) снимать нагрузку с поршня, газ начнет расширяться и, поднимая поршень, совершать работу. При этом внутренняя энергия газа уменьшится и его температура понизится. При малейшем понижении темпера-

туры газа тотчас же начнется переход к нему такого количества теплоты от нагревателя, которое снова выровняет их температуры. Вследствие этого температура газа в процессе такого медленного (равновесного) расширения останется неизменной. Отдавать же какое-либо количество теплоты другим телам газ не может, так как не соприкасается с телами, имеющими более низкую температуру.

Учащимся напоминают, что такой процесс расширения газа — изотермический — они уже рассматривали, когда изучали закон Бойля — Мариотта. Следует объяснить, что для реализации этого процесса необходимо, чтобы при получении газом некоторого количества теплоты от нагревателя температура последнего не менялась. Это может быть достигнуто в том случае, если теплоемкость нагревателя очень велика. Тело, имеющее настолько большую теплоемкость, что отдача или получение им некоторого количества теплоты не ведет практически к изменению его температуры, называют термостатом. Таким термостатом является, например, паровой котел.

Применение первого начала термодинамики к изотермическому процессу ($t = \text{const}$ и $\Delta U = 0$) показывает, что

$$A_r = Q,$$

т. е. работа газа равна полученному им в этом процессе количеству теплоты.

Таким образом, была разрешена поставленная перед учащимися проблема нахождения процессов, с помощью которых может быть совершена максимальная работа за счет внутренней энергии.

После этого возникает новая задача: рассчитать величину работы при расширении газа в этих процессах.

Опираясь на знания учащихся о механической работе, получают формулу для работы газа A_r при расширении от объема V_1 до объема V_2 (рис. 27):

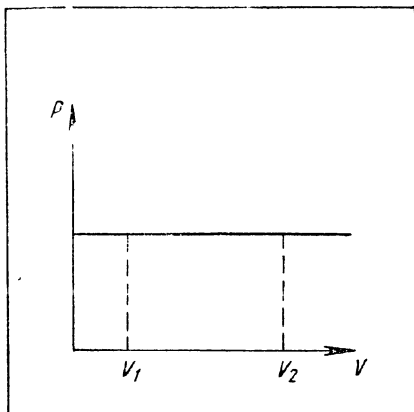


Рис. 27.

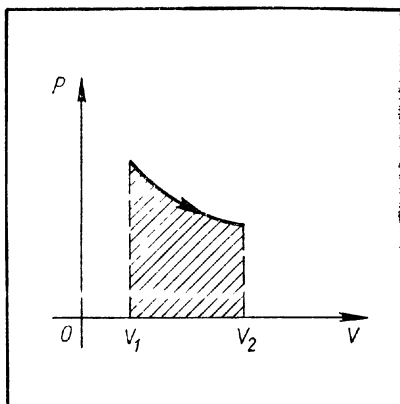


Рис. 28.

$$A_r = p(V_2 - V_1) \quad (3)$$

Эта формула справедлива для случаев, когда давление остается постоянным. Но и в изотермическом и адиабатном процессах давление меняется. Для этих процессов формулой (3) можно пользоваться только при вычислении элементарной работы, т. е. при расширении газа на малый элемент объема ΔV , при котором давление можно считать постоянным.

Для расчета же полной работы в этих процессах пользуются графическим методом (рис. 28), как это делали в механике при расчете работы переменной силы (например, силы упругости).

§ 17. Особенности использования внутренней энергии для совершения работы

Как уже было выяснено, оба рассмотренных процесса позволяют полностью использовать внутреннюю энергию для совершения механической работы: в адиабатном процессе за счет внутренней энергии самого газа, а в изотермическом — за счет внутренней энергии другого тела (нагревателя).

Такое полное использование внутренней энергии для совершения работы возможно лишь при однократном расширении газа, которое прекратится, как только давление газа станет равным внешнему давлению. Для того чтобы вновь могла быть совершена работа расширения газа, поршень должен быть приведен в исходное положение.

Таковыми рассуждениями обосновывают необходимость циклического процесса для непрерывного совершения работы за счет внутренней энергии. Небезынтересно отметить, что существуют двигатели однократного действия, не требующие циклического процесса.

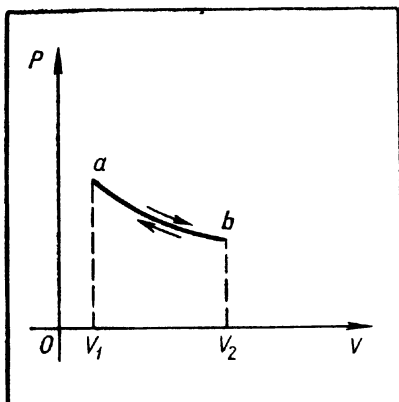


Рис. 29.

Таково использование внутренней энергии, например, в любом огнестрельном оружии.

Для возвращения поршня в исходное положение газ необходимо сжать до первоначального объема. При этом внешняя сила должна совершить работу сжатия. Но если сжатие будет происходить при той же температуре (т. е. по той же изотерме, рис. 29), то работа внешней силы окажется равной работе расширения газа, а полезная работа за цикл — равной нулю.

Отсюда учащиеся легко подведут к выводу о том, что

сжатие должно происходить при более низкой температуре.

Возникает новая задача: как же понизить температуру газа перед его сжатием, не допуская при этом передачи от него какого-либо количества теплоты телам, имеющим более низкую температуру? Ведь именно это было условием получения максимальной работы.

Можно надеяться, что учащиеся, подготовленные предварительным изучением адиабатного процесса, смогут догадаться, что именно этот процесс может быть использован для понижения температуры газа без передачи некоторого количества теплоты от него телу более низкой температуры.

Таким образом, становится ясным, из каких процессов должен состоять цикл тепловой машины, дающий возможность использования внутренней энергии для совершения максимальной работы.

После изотермического расширения при температуре нагрева-

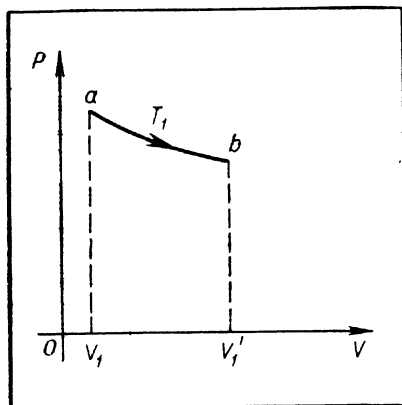


Рис. 30.

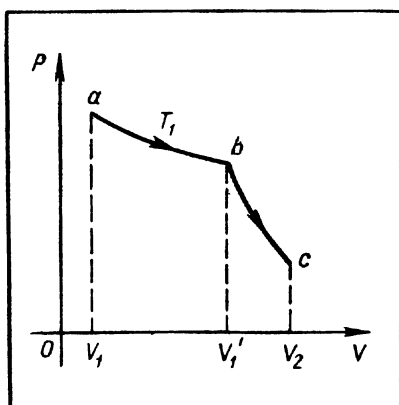


Рис. 31.

теля T_1 (рис. 30) газ продолжает расширяться адиабатически (рис. 31) до температуры T_2 . После этого должна быть совершена работа сжатия. Так как это сжатие будет происходить по изотерме при более низкой температуре (рис. 32), работа этого сжатия будет меньше, чем работа газа при его расширении.

Но для изотермического сжатия при более низкой температуре необходим термостат, имеющий температуру T_2 . Им может быть окружающая среда или специальное устройство — холодильник.

Таким образом, обосновывают необходимость не только нагревателя, но и холодильника для работы циклической тепловой машины.

Газ нельзя сжимать изотермически до первоначального объема, так как в этом случае он не вернется в исходное состояние с температурой T_1 . Но нагревать газ до первоначальной температуры, приведя его в контакт с нагревателем, тоже нельзя. Такой процесс был бы непроизводительным, так как в этом случае газ получил бы теплоту без совершения им работы. Поэтому изотермическое сжатие доводят до некоторого промежуточного объема V'_2 . При этом газ отдает холодному телу некоторое количество теплоты Q_2 , равное совершаемой над ним работе сжатия. После этого газ сжимают адиабатически до начального объема так, чтобы его температура вновь повысилась до T_1 . Теперь газ полностью вернулся в перво-

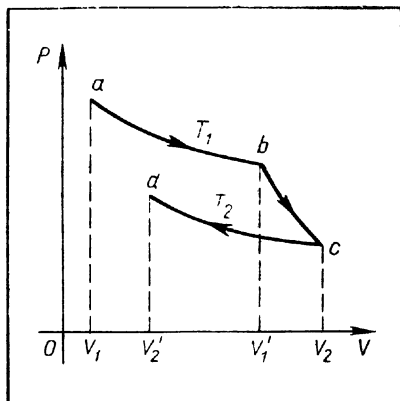


Рис. 32.

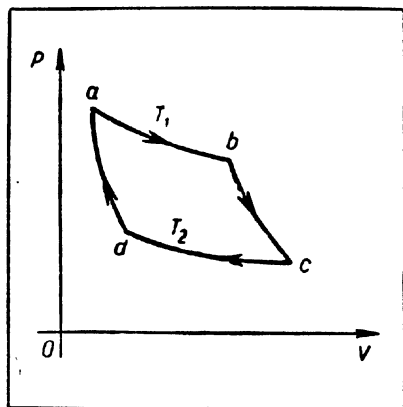


Рис. 33.

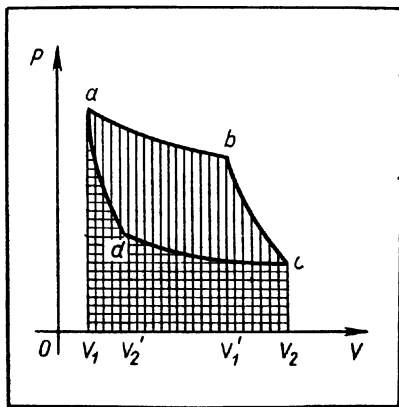


Рис. 34.

начальное состояние (точка a рис. 33), при котором объем его равен V_1 , температура T_1 и давление p_1 , и цикл можно повторять вновь.

Таким образом, работа внешней силы (сжимающей газ), измеряемая площадью V_2cdaV_1 (на рис. 34 заштрихована горизонтально), оказывается меньше работы расширения газа, измеряемой площадью V_1abcV_2 (вертикально заштрихована). Следовательно, полная работа за цикл, равная разности этих работ, не равна нулю: она измеряется площадью, заключенной внутри фигуры $abcd$.

Итак, теперь есть все возможности выяснить, в чем состоят особенности использования внутренней энергии для работы тепловых двигателей (непрерывного действия).

Мы выяснили, что, получив при расширении от тела с температурой T_1 (нагреватель) некоторое количество теплоты Q_1 , газ непременно отдает при сжатии количество теплоты Q_2 телу с более низкой температурой T_2 (холодильник).

Значит, в работу преобразуется только часть количества теплоты Q_1 , полученной от нагревателя, равная $Q_1 - Q_2$. Поэтому к.п.д. цикла $\eta = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} < 1$.

Если же газ не охлаждать перед сжатием и, следовательно, не отдавать некоторое количество теплоты более холодному телу, то, как мы видели, работа за цикл будет равна нулю. В этом состоит особенность совершения механической работы тепловыми двигателями: *при циклическом процессе невозможно преобразовать все количество теплоты, полученное от нагревателя, в работу. Необходимо какую-то часть этого количества теплоты отдавать третьему телу с более низкой температурой.* Значит, для работы тепловых машин недостаточно иметь только источник энергии (нагреватель) и рабочее тело. Нужно иметь еще третье тело более низкой температуры, называемое холодильником. Таким холодильником часто служит окружающая атмосфера.

Рассматривая пути повышения к.п.д. тепловых двигателей, целесообразно дать его формулу для идеальной тепловой машины, выражающую через абсолютные температуры нагревателя и холодильника:

$$\text{к. п. д.} = \frac{T_1 - T_2}{T_1} = 1 - \frac{T_2}{T_1}.$$

Анализ этой формулы дает возможность учащимся понять направление научно-технического прогресса в теплоэнергетике — создание тепловых двигателей, использующих пар при высокой температуре, а следовательно, и при высоком давлении.

Вместе с тем необходимо разъяснить учащимся, что в реальных тепловых двигателях невозможно создать такие условия, при которых рабочий цикл состоял бы из указанных выше процессов: процессы в двигателях протекают быстрее, чем это необходимо для изотермического процесса, и в то же время не настолько быстро, чтобы обеспечить создание адиабатного процесса. Поэтому

рабочий цикл в реальных двигателях отличается от рассмотренного выше идеального. Чем больше это отклонение, тем меньше к.п.д. цикла, даже если не учитывать потери, связанные с трением. Следовательно, к.п.д. реального двигателя

$$\eta < \frac{T_1 - T_2}{T_1}.$$

Тем не менее рассмотрение идеального цикла имеет смысл потому, что оно дает возможность показать особенности использования внутренней энергии в циклическом процессе, а именно то, что к.п.д. даже идеальной машины всегда меньше единицы. Он показывает также предел, который может быть достигнут при данных температурах нагревателя и холодильника.

§ 18. Об изучении тепловых двигателей в IX классе

В программу данной темы входит изучение физических основ работы тепловых двигателей. Но совершенно очевидно, что учащихся необходимо познакомить также с реализацией этих принципов в конкретных двигателях.

В VII классе учащиеся изучили устройство и действие двигателя внутреннего сгорания, а также получили некоторое представление о работе паровых турбин. В учебнике для VII класса приведены рисунки, где изображены виды современного транспорта, в которых используют тепловые двигатели.

Но в IX классе физические основы работы этих двигателей изучают более глубоко. В соответствии с этим необходимо рассмотреть с учащимися на примерах конкретных двигателей, что используют в них в качестве нагревателя, рабочего тела и холодильника. Целесообразно познакомить также учащихся с некоторыми параметрами тепловых двигателей, такими, как мощность современных двигателей, их к.п.д.

Приведем таблицы мощностей и к.п.д. тепловых двигателей, которые могут быть использованы учителем на уроке.

Мощности тепловых двигателей

Вид двигателя	Устройство, в котором применяется этот вид двигателя	Мощность	
		кВт	л. с.
Карбюраторный двигатель внутреннего сгорания	Автомобиль «Запорожец»	32	43
	„ «Жигули»	43	60
	„ «Москвич-412»	55	75
	„ «Волга»	73	98
Дизельный двигатель внутреннего сгорания	Трактор	до 500	700
	Тепловоз	2 150	3 400
	Теплоход	до 16 500	21 000
Реактивные двигатели	Самолет ТУ-144	до 400 000	
Паровые турбины	Электростанции	до 500 000—800 000	
Проектируемые турбины	„	1 200 000	

К. п. д. тепловых двигателей

Тепловой двигатель	К. п. д. %
Паровая машина (стационарная)	15
Дизель (стационарный)	34—36
Дизель трактора	28—32
Карбюраторный двигатель внутреннего сгорания автомашины	25
Паровая турбина (на мощных электростанциях)	40
Турбовинтовой двигатель самолета	30

Многие сведения о тепловых двигателях и их применении учащиеся могут почерпнуть из учебных кинофильмов «Двигатели внутреннего сгорания» и «Реактивные двигатели».

§ 19. К изложению идей второго закона термодинамики

В методической литературе неоднократно поднимался вопрос о необходимости ознакомления учащихся со вторым законом термодинамики, имеющим важное значение для формирования мировоззрения учащихся. Речь не идет о том, чтобы этот закон был изучен со всей полнотой, в формулировках, которые требуют, например, введения понятия об энтропии и т. д.

Очевидно, речь может идти об изложении основных идей этого закона, хотя бы в ознакомительном плане.

Например, все изложенное выше об особенностях использования внутренней энергии для совершения работы приводит учащихся к пониманию идей второго закона, содержащихся в его формулировке, данной У и л ь я м о м К е л ь в и н о м (1824—1907).

«Невозможно осуществить такой периодический процесс, единственным результатом которого было бы получение работы за счет теплоты, взятой от одного источника».

Это положение было уже фактически разъяснено учащимся при обосновании необходимости холодильника для работы теплового двигателя.

Акцентирование внимания учащихся на этом положении позволяет пояснить, почему не все источники энергии на земном шаре могут быть причислены к энергетическим ресурсам. Очевидно, не может быть использована энергия таких тел, температура которых равна температуре окружающей среды.

Насколько заманчивым казалось бы использование почти безграничного запаса внутренней энергии, которая содержится в водах океанов! Однако для получения работы за счет этой энергии необходимо иметь столь же гигантский холодильник, который принимал бы часть этого огромного количества теплоты и при этом не нагревался бы сам до температуры океана.

Именно поэтому, как уже указывалось, энергия океанов не может быть причислена к энергетическим ресурсам на земном шаре.

Для закрепления знаний по учебному материалу данной главы необходимы упражнения учащихся в решении качественных, расчетных и графических задач.

Приведем примеры таких задач.

1. Найдите изменение внутренней энергии определенной массы идеального газа m при повышении его температуры на Δt , если его объем при этом не изменяется.

2. Какая энергия выделилась бы при охлаждении Мирового океана ($m = 10^{21}$ кг) на 1°C ?

3. Газ расширился при постоянном давлении $2 \cdot 10^6$ Н/м², и его объем увеличился от 2 до 4 м³. Вычислите работу в этом процессе.

4. Постройте график изотермического процесса по табличным данным, например, для $pV = 80$ Н·м. Пользуясь этим графиком, определите работу газа при изменении его объема от 10 до 30 м³.

5. Почему при очень быстром расширении газ заметно охлаждается? Приведите пример такого процесса.

6. Воздух, масса которого 2 кг, находится в закрытом сосуде. Чему равно изменение внутренней энергии воздуха при его нагревании на 20°C . Удельную теплоемкость воздуха в этом процессе принять равной 700 кДж/(кг·К).

Аналогичные задачи содержатся в сборниках задач по физике для средней школы.

Глава V

АГРЕГАТНЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ ВЕЩЕСТВА

§ 20. Введение

Взаимные превращения газа, жидкостей и твердых тел представляют собой такую группу физических явлений, изучение которых приводит старшеклассников к пониманию физического смысла и диалектического характера ряда тепловых явлений и процессов.

При изучении этой темы учащимся разъясняют, что скачкообразные изменения физических свойств веществ происходят лишь при определенных температурах — точке плавления и кристаллизации, точке кипения и конденсации.

В дальнейшем школьники ознакомятся и с другими скачкообразными изменениями свойств вещества, например с переходом ферромагнетика в парамагнетик (в точке Кюри), с превращениями, обусловленными полиморфизмом, с ядерными превращениями. Ф. Энгельс писал: «...в природе качественные изменения — точно определенным для каждого отдельного случая способом — могут происходить лишь путем количественного прибавления либо количественного убавления материи или движения...»¹.

¹ Э н г е л ь с Ф. Диалектика природы. М., 1969, с 45..

При взаимных агрегатных превращениях вещества проявляется борьба двух противоположных физических процессов: действия молекулярных сил, упорядочивающих взаимное расположение молекул, и теплового движения, разбрасывающего молекулы по различным направлениям. Эти противоположные процессы приводят к единству — определенному агрегатному состоянию вещества. В. И. Ленин писал: «Единство (совпадение, тождество, равновесие) противоположностей условно, временно, преходяще, релятивно. Борьба взаимоисключающих противоположностей абсолютна, как абсолютно развитие, движение»¹.

Большое познавательное значение имеет выяснение динамического характера равновесия в двухфазной системе, что характеризует относительность покоя физической системы в целом. Динамика процесса (например, испарение и конденсация) и равновесие (например, постоянство массы каждой из фаз — жидкости и газа) взаимосвязаны.

При изучении агрегатных превращений вещества можно воспользоваться понятиями фазы и фазового перехода.

Под фазой понимают однородную часть системы, обладающую одинаковыми физическими и химическими свойствами и имеющую четко выраженную границу с другими частями этой системы. Так, например, «вода — пар» (или «вода — лед») образуют систему, в которой каждая ее часть — вода или пар (вода или лед) — в отдельности является фазой этой системы. Система может состоять из одной или нескольких фаз. Агрегатные превращения вещества представляют собой изменение фаз. Поэтому такие превращения называют фазовыми превращениями или фазовыми переходами.

Различают фазовые переходы первого и второго рода. К первым относятся агрегатные изменения вещества, превращения кристаллических модификаций и другие, которые сопровождаются изменением объема и поглощением или выделением внутренней энергии (называемой теплотой фазового перехода) при постоянной температуре. Ко вторым относятся переходы без поглощения или выделения внутренней энергии.

К анализу агрегатных переходов следует применить закон сохранения и превращения энергии. Это должно быть сделано при термодинамическом и атомно-молекулярном рассмотрении этих переходов. В первом случае используют понятие о теплоте перехода, во втором — об энергии связи частиц в жидкости и твердом теле.

Методическая идея изложения темы состоит в том, что взаимные переходы «газ \rightleftharpoons жидкость» сопоставляют с агрегатными превращениями «жидкость \rightleftharpoons твердое тело». Это позволяет показать их общие черты и отличительные особенности. Применению сравнения в дидактике придавал в свое время большое значение К. Д. Ушинский, считавший сравнение основным приемом в дидактике.

¹ Ленин В. И. Полн. собр. соч. Изд. 5-е, т. 29, с. 317.

Взаимные превращения жидкости и твердого тела рассматриваются в IX классе в порядке обобщающего повторения на более высоком научном уровне, чем это было на первой ступени курса физики. Для этого привлекают сведения о силах, действующих между структурными частицами вещества, и используют понятие об энергии связи между ними.

§ 21. Взаимодействие атомов и молекул

Изучение взаимодействия можно начинать с одноатомных молекул (атомов), т. е. с наиболее простейшей системы — двух атомов. Разъясняют кривую взаимодействия атомов от расстояния между центрами их масс (рис. 35). Перед анализом этой кривой рассматривают опытные факты (некоторые из них в порядке повторения), свидетельствующие о существовании сил притяжения атомов и молекул (слипание свинцовых цилиндров по зачищенным поверхностям, хорошо отполированных стальных или стеклянных пластинок, упругая деформация растяжения) и сил отталкивания (малая сжимаемость твердых тел и жидкостей даже под большим давлением).

Разъясняют следующее.

1. Отдельные атомы и молекулы электрически нейтральны, так как содержат одинаковое количество электрических зарядов противоположных знаков. Если два атома расположены на расстояниях, намного превышающих их диаметры, то они практически не взаимодействуют. Лишь при сближении атомов на расстояние, равное нескольким диаметрам, начинают взаимодействовать их ядра, электроны одного атома с ядром соседнего атома, электронные оболочки атомов. В результате одновременно возникают силы притяжения и силы отталкивания, неодинаково зависящие от расстояния. Поэтому имеется равнодействующая, направленная либо в сторону притяжения атомов между собой, либо в сторону отталкивания. В первом случае верх берут силы притяжения, во втором случае — силы отталкивания. На некотором расстоянии r_0 между центрами масс атомов равнодействующая равна нулю.

2. Рассматривают график изменения сил притяжения (кривая I, рис. 35), сил отталкивания (кривая II) двух атомов и равнодействующей этих сил (кривая III) в зависимости от

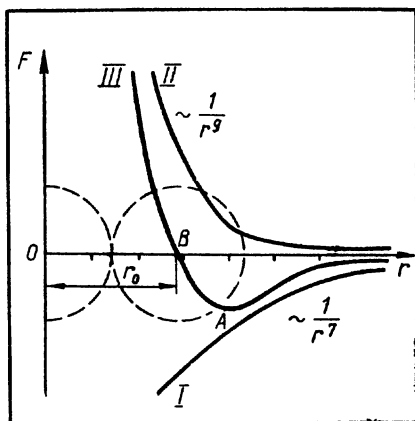
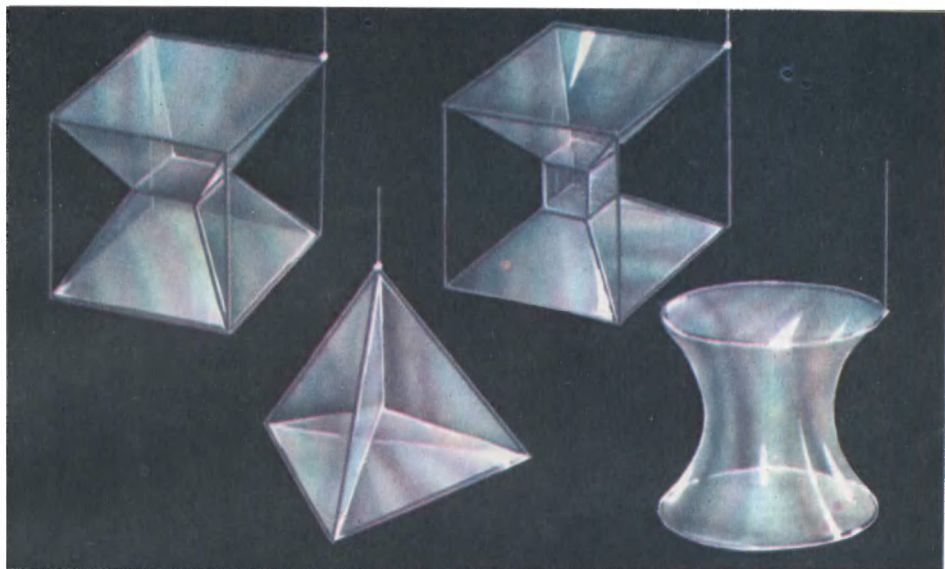
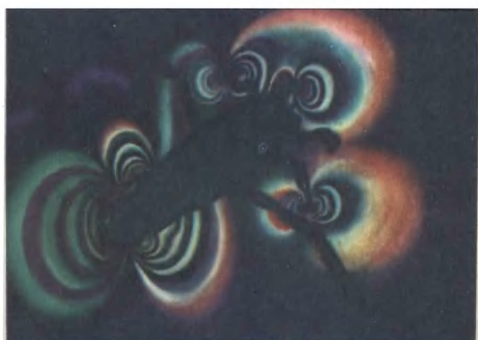


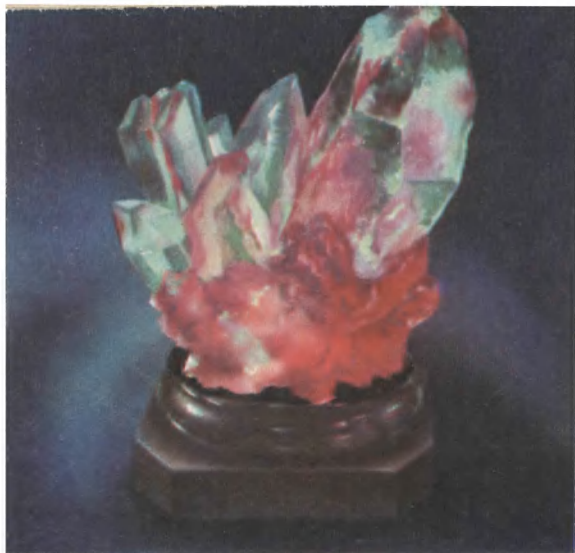
Рис. 35.



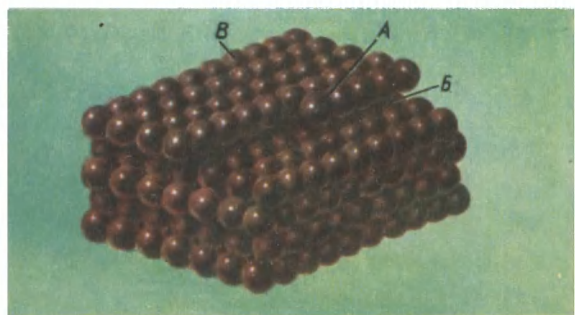
1. При заданном контуре мыльные пленки образуют поверхности, площадь которых минимальна.



Молекулярные силы, действующие в поверхностном слое, определяют форму капель ртути на стекле и воды на листьях растений, удерживают водомерку на поверхности воды.



II. Кристаллы кварца, выросшие в естественных условиях.



Модель расположения ионов при образовании кристалла.



Изображение структуры кристалла вольфрама, полученное с помощью ионного микроскопа.

расстояния r между центрами их масс. Кривую равнодействующей получают путем сложения соответствующих ординат точек кривой I и II . Кривую сил притяжения вычерчивают под осью абсцисс (силу притяжения условно берут со знаком минус), а кривую сил отталкивания — над осью абсцисс (силу отталкивания условно берут со знаком плюс).

Анализируют полученный график (кривая III): возрастание взаимодействия при сближении атомов; наибольшая сила соответствует точке A перехода от возрастания силы к ее уменьшению; равнодействующая обращается в нуль в точке B перехода от притяжения к взаимному отталкиванию атомов; кривая несимметрична относительно вертикальной оси, проходящей через точку A кривой — крутизна кривой на разных ее участках неодинакова (это физически истолковывается).

3. Подчеркивают, что расстояние r_0 равно примерно диаметру d атома. Точнее, $d < r_0$, так как атомы могут сблизиться настолько, что оказываются при этом немного «деформированными». (Такая модель явления представляет собой идеализацию реальной картины.)

4. На близком расстоянии атомов (порядка 0,1—0,4 нм) их электронные оболочки перекрываются, они окружают ядра атомов — образуется молекула. Ей соответствует определенная потенциальная энергия взаимодействующих атомов, называемая энергией связи (энергией химической связи) атомов в молекуле. Изложение иллюстрируют таблицей.

Вещество	Химическая формула	Энергия связи, х 10^{-10} Дж
Хлористый водород	HCl	7,09
Водород	H ₂	7,17
Кислород	O ₂	8,19
Азот	N ₂	15,6
Оксид углерода	CO	17,8

Сообщением этих сведений осуществляют преемственность курсов физики и химии.

Для выяснения различия агрегатных состояний вещества применяют понятие потенциальной энергии молекул.

Если $U_0 \ll kT$, где U_0 — потенциальная энергия молекулы, а kT — средняя кинетическая энергия теплового движения молекулы при температуре T (точнее, $\frac{3}{2}kT$), то молекулы не могут удержаться друг возле друга и разлетаются в разные стороны. Это характерно для газа. Противоположный случай реализуется в твердом теле. Здесь $U_0 \gg kT$, т. е. взаимодействие настолько велико, что молекулы незначительно отклоняются от некоторых средних положений равновесия, совершая при этом тепловые колебания. В результате

частицы располагаются упорядоченно, образуя кристалл. Промежуточный случай $U_0 \approx kT$ характерен для жидкости, в которой тепловое движение молекул имеет черты, присущие как газу, так и твердому телу.

§ 22. Агрегатные превращения вещества

Вначале выясняют роль в природе и технике явлений испарения, кипения и конденсации, с которыми учащиеся уже знакомы из VII класса. Сообщают сведения о круговороте воды в природе и применении искусственных водоемов в регулировании климата, о получении рабочего вещества в парогенераторах и конденсации отработавшего пара на тепловых и атомных электрических станциях, испарении холодильных агентов (аммиака, фреона и др.) в холодильных устройствах, перегонке нефти (получение бензина, керосина, солярового масла, мазута, гудрона и др.). Дают предварительное понятие о фазе на примере жидкости, находящейся в соприкосновении с ее паром. Кратко повторяют молекулярный механизм испарения и конденсации в открытом и закрытом сосудах. Затем обращают внимание учащихся на следующее.

1. В закрытом сосуде между испарением и конденсацией устанавливается динамическое равновесие. Оно имеет статистический смысл. За равные малые промежутки времени Δt число молекул, вылетающих из жидкости, и число молекул, попадающих в нее, в общем случае неодинаковы. За большие промежутки времени, например за 1 с, эти числа в среднем одинаковы. При огромном числе молекул, участвующих в испарении и конденсации, отклонения от этого среднего числа составляют только небольшой процент молекул.

2. Равновесие называют динамическим потому, что оно сопровождается прямо противоположными процессами: испарением и конденсацией. Но равновесие — это макроскопическое состояние тела, системы, поэтому говорят о равновесном состоянии. Фазовый же переход — это процесс. С молекулярной точки зрения равновесие в двухфазной системе неразрывно связано с процессом.

Равновесие не зависит от времени и определяется только параметрами системы; например, давлением p . Основываясь на молекулярном описании процессов испарения и конденсации, можно разъяснить, что эти параметры являются средними величинами. Они имеют смысл только для макросистемы, например для пара в целом.

3. Дают определение насыщающего пара. К нему применимо уравнение Клаузиуса для давления $p = nkT$. Отсюда следует, что давление насыщающего пара зависит от температуры.

4. Вводят понятие об удельной теплоте парообразования, используя имеющиеся у учащихся знания из курса VII класса.

Рассматривают работу перехода жидкости в пар. Описание этого

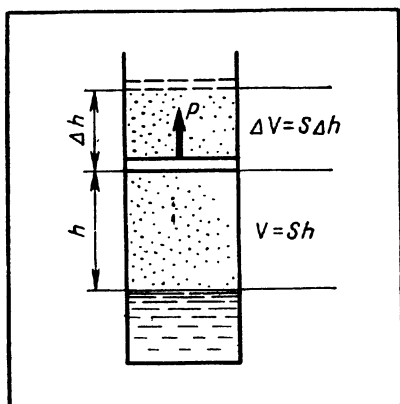


Рис. 36.

перехода, данного в учебном пособии («Физика, 9», § 37), иллюстрируют опытом и расчетом.

Опыт. На очковое вогнутое стекло наливают немного эфира, а под него — каплю воды. Вентилятором или грушей сдувают пары эфира и наблюдают замерзание воды. Результат опыта разъясняют.

Расчет. Жидкость и ее насыщающий пар находятся в цилиндре под поршнем, который может перемещаться без трения (рис. 36). Пар занимает некоторый объем $V = Sh$ при давлении p . Между жидкостью

и паром установилось динамическое равновесие.

Если цилиндру сообщить некоторое количество теплоты, то в системе «жидкость — пар» должны возрасти давление и температура. Однако в этой системе возникают процессы, препятствующие повышению давления и температуры. Во-первых, жидкость частично испаряется, а молекулы пара приобретают большую потенциальную энергию, чем молекулы жидкости, на величину работы выхода. Во-вторых, при испарении жидкости давление пара несколько повышается и поршень поднимается. При этом объем пара увеличивается на ΔV и совершается работа. На работу выхода молекул и работу расширения пара расходуется энергия самой системы. Поэтому давление и температура пара и жидкости падают до первоначальных значений.

В результате испарение жидкости и расширение пара происходят при постоянном давлении p и неизменной температуре T .

Работа расширения пара:

$$A_1 = p \Delta V,$$

где $\Delta V = S \Delta h$.

При испарении увеличиваются расстояния между молекулами и их взаимная потенциальная энергия U . При этом совершается работа A_2 . Общая работа:

$$A = A_1 + A_2 = p \Delta V + A_2.$$

При комнатной температуре $p \Delta V \ll A_2$. На совершение работы A_2 заимствуется энергия от источника (теплота парообразования).

При испарении твердых тел (нафталина, уголекислоты, льда, серы и др.) также совершается работа выхода молекул из твердых тел и работа расширения пара, на что расходуется теплота сублимации.

К фазовым переходам относится также процесс плавления, изученный в VII классе. Здесь его кратко повторяют и дополняют следующими сведениями.

При подводе энергии к кристаллическому телу должна была бы повыситься его температура. Однако при плавлении в теле происходят такие процессы, которые препятствуют изменению температуры. Действительно, плавление состоит в увеличении потенциальной энергии атомов тела, что приводит к разрушению кристаллической решетки. На это расходуется энергия самого тела. В итоге плавление происходит при постоянной температуре. В этих рассуждениях внешнюю работу расширения твердых тел, у которых объем при плавлении увеличивается, не учитывают. Она мала по сравнению с внутренней работой фазового перехода.

В случае конденсации пара, кристаллизации жидкости и кристаллизации пара, минуя жидкую фазу, теплота перехода выделяется.

Разъясняют, что при этих переходах взаимная потенциальная энергия атомов и молекул уменьшается. Вся система переходит в состояние с минимумом потенциальной энергии при данных условиях. Температура же тела остается неизменной. Поэтому нет превращения потенциальной энергии в кинетическую, и потенциальная энергия освобождается в виде теплоты фазового перехода: конденсации или кристаллизации.

Желательно сравнить удельную теплоту плавления и удельную теплоту парообразования (кипения) разных веществ.

Удельная теплота плавления и парообразования

Вещество	Плавление		Парообразование	
	удельная теплота перехода, $\times 10^3$ Дж/кг	изменение потенциальной энергии на частицу, $\times 10^{-20}$ Дж	удельная теплота перехода, $\times 10^3$ Дж/кг	изменение потенциальной энергии на частицу, $\times 10^{-20}$ Дж
Бензол	1,27	1,6	3,95	4,94
Висмут	0,53	1,8	8,59	29,6
Лед (вода)	3,35	1	22,6	7
Свинец	0,25	0,86	9,28	32
Углекислота	1,9	1,96	2,31	2,38

Из таблицы видно, что на парообразование расходуется больше энергии, чем на плавление, так как потенциальная энергия, приходящаяся на частицу, изменяется неодинаково — при парообразовании значительно больше, чем при плавлении. Значит, и расстояния между частицами в первом случае растут больше, чем во втором.

При изучении свойств паров необходимо разъяснить следующие фундаментальные факты.

1. Плотность и давление ненасыщающих паров зависят от объема, как и для любого газа.

2. Плотность и давление насыщающих паров при данной температуре являются наибольшими.

3. Плотность и давление насыщающих паров различных жидкостей при одинаковой температуре разные.

4. Плотность и давление насыщающего пара каждого из веществ не зависят от занимаемого объема.

5. Плотность и давление насыщающего пара зависят от температуры (не линейно!).

Эти факты надо подтвердить экспериментально [ДЭ, I, опыты 139—140].

При изучении кипения особое внимание обращают на выяснение условий кипения: наличие центров парообразования, равенство давления насыщающих паров внешнему давлению и подвод теплоты фазового перехода к системе; вода в закрытых сосудах не кипит, она кипит лишь при отборе пара, когда давление в сосуде поддерживается постоянным. Наконец, выясняют роль центров конденсации и кристаллизации при фазовых переходах.

Глава VI

СВОЙСТВА ЖИДКОСТЕЙ

§ 23. Введение

Особенности жидкого состояния вещества определяются тем, что средние расстояния между молекулами жидкостей на целый порядок меньше, чем между молекулами газов: они равны примерно одному-двум диаметрам молекул. Это следует из того, что плотность жидкостей примерно в 1000 раз превышает плотность их паров при одних и тех же условиях. Например, плотность воды при 100°C и атмосферном давлении в 1800 раз больше плотности водяного пара.

В связи с этим существенную роль, определяющую свойства жидкости, приобретает наряду с движением молекул также и взаимодействие между ними. Учесть влияние сил взаимодействия между молекулами на свойства жидкости оказалось настолько сложным, что до сих пор не удалось получить уравнения состояния жидкости, аналогичного уравнению состояния газа, для которого роль сил взаимодействия между молекулами пренебрежимо мала.

Существующие в науке теории жидкого состояния еще не закончены и не общепризнаны, поэтому не могут быть предметом изучения в средней школе.

Вместе с тем существует определенная область явлений, связанная с силами взаимодействия между молекулами жидкостей, теория которых достаточно хорошо разработана. Это явления на границах жидкостей с газообразной и твердой фазами, т. е. так называемые поверхностные явления. Они в основном и должны быть предметом изучения в средней школе.

Поверхностные явления представляют собой неисчерпаемый источник разнообразных приложений в различных областях техники.

Значение рассматриваемой области молекулярной физики в средней школе определяется тем, что при ее изучении у учащихся формируются понятия о молекулярных силах, радиусе их действия, о возможностях использования молекулярных сил в различных отраслях техники и в ряде прикладных наук.

§ 24. Формирование понятий об особых свойствах поверхностного слоя жидкостей. Поверхностное натяжение

Основное свойство поверхностных слоев заключается в частичной некомпенсированности молекулярных сил притяжения в них по сравнению с внутренними слоями жидкости.

Усвоить это учащиеся могут при рассмотрении сфер молекулярного действия для молекул внутри жидкости и в поверхностном слое. Молекулы внутри жидкости притягиваются соседними молекулами, находящимися на расстоянии порядка 10^{-8} см, во все стороны. Поэтому здесь молекулярные силы притяжения полностью компенсированы, равнодействующая этих сил в среднем равна нулю (рис. 37).

Совсем в ином положении находятся те молекулы жидкости, которые образуют ее поверхностный слой. Эти молекулы притягиваются соседними молекулами только внутрь и в стороны. Уравновешивающее притяжение вверх очень мало, так как плотность паров жидкости значительно меньше плотности самой жидкости. Поэтому силы притяжения, действующие на поверхностные молекулы, только частично скомпенсированы. Равнодействующая этих сил направлена внутрь жидкости и вызывает ее сжатие, что приводит к увеличению сил отталкивания, которыми и уравновешиваются силы притяжения, действующие на каждую молекулу поверхностного слоя.

В связи с тем что поверхностный слой оказывается деформированным, каждая молекула этого слоя обладает избыточной потенциальной энергией по сравнению с молекулами внутри жидкости.

Отсюда следует, что для увеличения поверхности жидкости, т. е. для перевода молекул из внутренних слоев в поверхностный, требуется совершение работы.

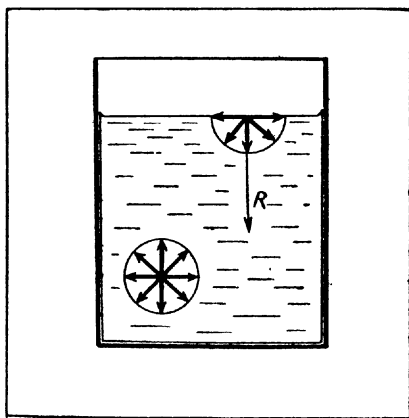


Рис. 37.

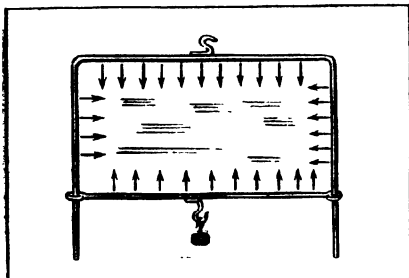


Рис. 38.

Введение понятия о частичной некомпенсированности сил притяжения в поверхностных слоях и о деформации поверхностного слоя позволяет дать энергетическую трактовку поверхностного натяжения как величины, измеряемой работой изотермического образования единицы площади поверхностного слоя жидкости:

$$\sigma = \frac{A}{S}.$$

Нужно иметь в виду, что растяжение какого-либо твердого тела, например резиновой пленки, показывает, что, чем больше увеличивается поверхность резины, тем большая сила возникает при этом. Это известно каждому учащемуся из личных наблюдений. Причина названного явления заключается в том, что при увеличении поверхности твердого тела происходит увеличение расстояния между молекулами, составляющими его поверхность. Иначе происходит увеличение поверхности жидкости. Поверхность жидкости увеличивается за счет перехода в поверхностный слой из глубины жидкости новых молекул, а не за счет увеличения расстояния между ними в поверхностном слое.

Для демонстрации непрерывного увеличения поверхности жидкости под действием постоянной силы берут проволоочный прямоугольник с одной подвижной перекладной (рис. 38) и опускают его в мыльную воду. На прямоугольнике образуется мыльная пленка, поверхность которой сокращается и тянет за собой подвижную перекладную.

Подбирают грузик, который может уравновесить силу, тянущую перекладную вверх. Немного увеличивают массу грузика. Наблюдают непрерывное возрастание поверхности пленки.

Этот опыт можно поставить при помощи проекционного динамометра [ДЭ, I, опыт 147].

Правильное представление о механизме увеличения поверхности жидкости подготавливает учащихся к введению понятия о поверхностном натяжении (энергетическая трактовка).

В самом деле, при переходе молекул из внутренних слоев жидкости в поверхностный слой должна быть совершена работа против сил, действующих на молекулы поверхностного слоя внутрь жидкости. Следовательно, увеличение поверхности жидкости совершается за счет работы внешних сил, выводящих молекулы изнутри жидкости в поверхностный слой.

Далее, по аналогии с работой подъема тела в поле земного тяготения, при совершении которой увеличивается потенциальная энергия тела, нужно дать учащимся понятие о том, что молекулы

поверхностного слоя (а следовательно, и вся масса поверхностного слоя) обладают избыточной энергией по сравнению с такой же массой внутри жидкости.

Таким образом, учащиеся уясняют, что увеличение поверхности жидкости всегда приводит к увеличению энергии.

Чем больше поверхность жидкости, тем большее число молекул обладает этой избыточной энергией. Следовательно, при раздроблении некоторой массы жидкости на мельчайшие капли внутренняя энергия жидкости увеличивается, так как при этом значительно возрастает поверхность жидкости, а значит, и число молекул, обладающих избыточной энергией.

Для поверхности раздела двух фаз, как например в опыте Плато (рис. 39), когда одна жидкость граничит с другой, имеет смысл только энергетическая трактовка поверхностного натяжения. Поэтому это общее определение поверхностного натяжения, справедливое для всех случаев (когда соприкасаются и две, и три фазы), и выясняют с учащимися прежде всего.

Однако для случаев соприкосновения трех фаз следует дать учащимся и иную (силовую) интерпретацию величины поверхностного натяжения, которая при этом облегчит понимание ряда явлений.

Демонстрируя хорошо известные опыты с мыльными пленками (рис. 40), обращают внимание учащихся на то, что мыльная пленка представляет собой слой воды малой массы с большой свободной поверхностью. Поэтому неуравновешенные в поверхностных слоях молекулярные силы притяжения преобладают в таких пленках над силами тяжести.

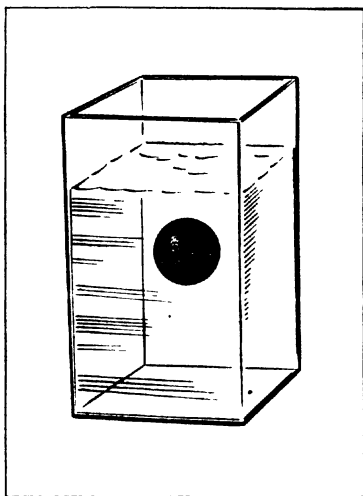


Рис. 39.

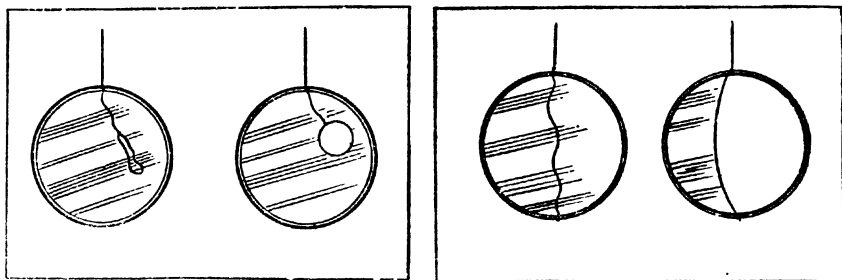


Рис. 40.

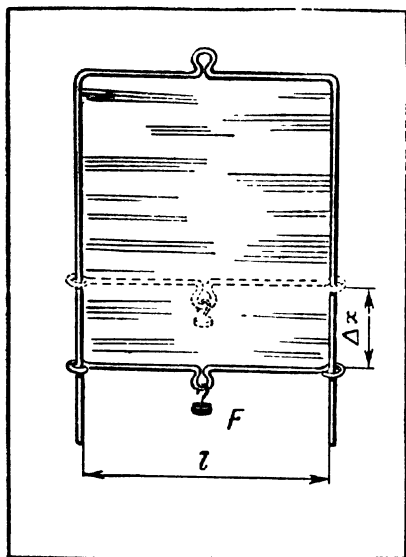


Рис. 41.

Образуя мыльные пленки на проволочных каркасах различной формы, получают разнообразие фигуры, у которых при заданном контуре будут наименьшие поверхности (см. цветную вклейку 1).

В описанных опытах поверхность жидкости граничит не только со своим паром, но и с твердым телом (нитка, проволочный каркас). В этом случае жидкость, уменьшая свою поверхность благодаря стягиванию молекул с поверхности во внутренние слои, действует с некоторой силой F на твердое тело, ограничивающее эту поверхность. Сила F направлена по касательной к поверхности и обращена в сторону ее сокращения.

Легко показать учащимся, что эта сила, действующая на единицу длины линии, ограничивающей поверхность жидкости, численно равна работе образования единицы площади поверхности, т. е. поверхностному натяжению данной жидкости. Для этого рассматривают мыльную пленку, образованную на прямоугольной рамке с одной подвижной перекладиной (рис. 41), и определяют работу, произведенную при увеличении поверхности. В этом случае пользуются известным уже учащимся понятием поверхностного натяжения, введенным через работу изотермического образования единицы площади поверхностного слоя.

Если под действием силы тяжести F подвижная перекладина сместится на расстояние Δx , то произведенную работу можно выразить через $A = F\Delta x$.

Но эту работу можно выразить и другим образом: поверхность жидкости увеличилась на $2l\Delta x$ (поверхность двусторонняя), где l — длина перекладины. Работа образования этой поверхности будет: $A = 2l\Delta x\sigma$, так как σ — работа образования единицы площади поверхности.

Отсюда $2l\Delta x\sigma = F\Delta x$ или $\sigma = \frac{F}{2l}$, т. е. *поверхностное натяжение в этих случаях имеет смысл не только работы образования единицы площади поверхности, но и силы, действующей на единицу длины линии, ограничивающей поверхность жидкости.*

Далее учащиеся в процессе лабораторной работы сами определяют поверхностное натяжение жидкости.

После проведения лабораторной работы надо рассмотреть таб-

лицу поверхностного натяжения разных жидкостей, обратив внимание школьников на громадные значения его для металлов и очень малые для ряда жидкостей, например для некоторых углеводородных соединений (бензин, масла и т. д.), а также для жидкостей, полученных от сжижения газов, например водорода.

Поверхностные натяжения жидкостей

Вещество	$t, ^\circ\text{C}$	$\sigma, \times 10^{-3} \text{ Н/м}$	Вещество	$t, ^\circ\text{C}$	$\sigma, \times 10^{-3} \text{ Н/м}$
Железо	1535	1000	Оливковое масло	20	33
Алюминий	750	520	Бензол	20	29
Олово	300	526	Керосин	20	26
Ртуть	20	465	Азот	-193	8,3
Вода	20	73	Водород	-255	2,3

Следует обратить внимание учащихся на то, что при повышении температуры поверхностное натяжение всех веществ уменьшается. Это связано с изменениями плотности жидкости и пара. Плотность жидкости при повышении температуры уменьшается, а плотность пара возрастает. Уменьшение различия плотностей жидкости и пара ведет к большей компенсации молекулярных сил притяжения в поверхностном слое, а следовательно, к уменьшению поверхностного натяжения.

Для закрепления полученных знаний следует предложить учащимся ряд упражнений.

1. Капля воды, радиус которой 1 мм, распадается на 10^6 мелких капелек. На сколько при этом увеличивается общая поверхность всех капелек? Какую работу нужно совершить для такого дробления капли, если поверхностное натяжение воды равно $73 \cdot 10^{-3} \text{ Н/м}$?

2. Положите на поверхность воды две спички на расстоянии 2 см друг от друга. Прикоснитесь к воде между спичками раскаленной проволокой. Спички отскочат друг от друга. Объясните явление.

3. Повторите опыт со спичками, коснувшись поверхности воды проволокой, смоченной спиртом (или мыльным раствором). Пронаблюдайте явления и сделайте вывод о сравнительной величине поверхностного натяжения чистой воды и спирта (или мыльного раствора).

§ 25. Принцип минимума потенциальной энергии

В этой части курса физики уместно познакомить учащихся с принципом минимума потенциальной энергии и далее применять его при изучении ряда поверхностных явлений.

Из механики учащимся известно, что в замкнутой системе полная механическая энергия сохраняется, т. е. сумма кинетической и потенциальной энергии остается постоянной:

$$\Pi + K = \text{const},$$

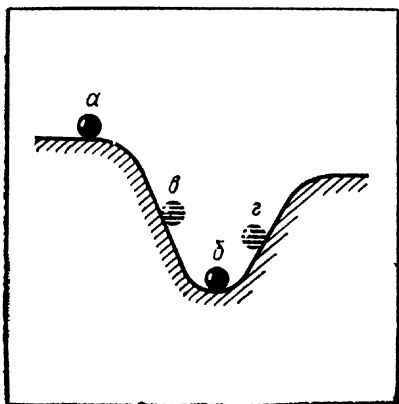


Рис. 42.

Значит, возрастание одного вида энергии, например кинетической, может происходить лишь за счет убыли другого вида — потенциальной.

Например, если тело находится в состоянии равновесия в верхней точке (а) кривой поверхности (рис. 42), то потенциальная энергия в самопроизвольном процессе возрастет не может, так как кинетическая энергия, за счет которой она могла бы возрасти, равна нулю.

Придет ли **тело в движение**, т. е. появится ли у него кинети-

ческая энергия, зависит от того, может ли при переходе из этого положения в соседние убывать его потенциальная энергия. Так как в соседних положениях потенциальная энергия шарика будет меньше, то достаточно ничтожного отклонения от положения равновесия и тело придет в движение, при котором будет возрастать кинетическая энергия за счет убыли потенциальной. Значит, тело в точке а находится в состоянии неустойчивого равновесия.

Далее рассматривают случай, когда тело покоится в нижней точке (б) этой же поверхности — в ямке. И в этом случае кинетическая энергия тела равна нулю. Значит, его потенциальная энергия возрастет не может. Но она не может и убывать: в любом соседнем положении (в и г) его потенциальная энергия была бы больше. Следовательно, переход в эти положения невозможен. Тело, находящееся на дне ямки, не может начать двигаться самопроизвольно — оно будет находиться в состоянии устойчивого равновесия. Отсюда можно сделать вывод.

Тело будет находиться в состоянии устойчивого равновесия в том случае, когда его потенциальная энергия минимальна.

Принцип минимума потенциальной энергии, сформулированный на основе рассмотрения механических процессов, следует распространить и на другие процессы. Например, равновесие жидкости наступает тогда, когда общая величина ее потенциальной энергии, включая и величину ее поверхностной энергии, становится наименьшей из всех возможных в данных условиях.

Принцип минимума потенциальной энергии можно сразу же применить для объяснения самопроизвольного сокращения поверхности жидкости, например, при образовании капель, в опыте Плато и др. Перед учащимися целесообразно поставить вопрос, заставляющий их под руководством учителя применять этот принцип к объяснению формы поверхности в состоянии равновесия. Беседу можно построить по следующему плану.

Так как поверхностная энергия пропорциональна площади поверхности, то она будет минимальной при наименьшем значении площади поверхности жидкости из всех возможных в данных условиях. Поэтому поверхность жидкости самопроизвольно сокращается. Этим и объясняется шаровая форма, которую принимает капля жидкости, так как при данном объеме наименьшую площадь поверхности имеет шар. Но известно, что только малые капли жидкости шарообразны. Жидкость в большом объеме не имеет формы шара, а находясь на опоре, сплющивается или растекается.

Потенциальная энергия некоторой массы жидкости состоит из двух частей — потенциальной энергии, связанной с действием силы тяжести, и потенциальной энергии поверхностного слоя, в котором действуют молекулярные силы.

Уменьшение потенциальной энергии, связанной с силой тяжести, приводит к понижению центра тяжести жидкости, т. е. к сплющиванию капли. Уменьшение же поверхностной энергии ведет к тому, что капля стягивается в шар. Форма капли определяется тем, какая из потенциальных энергий преобладает. А это зависит от размеров капли.

Действительно, та энергия, которая связана с силой тяжести, пропорциональна массе: $\Pi = mgh$, где h — радиус капли, а масса капли пропорциональна ее объему, т. е. в случае шаровой капли кубу радиуса ($V_{\text{шара}} = \frac{4}{3} \pi r^3$). Следовательно, потенциальная

энергия, связанная с силой тяжести жидкости $\Pi_{\text{тяж}} = \frac{4}{3} \pi r g r^4$, т. е. пропорциональна четвертой степени радиуса капли. Поверхностная же энергия пропорциональна площади поверхности, т. е. квадрату радиуса ($\Pi_{\text{пов}} = \sigma S_{\text{шара}} = 4\pi r^2 \sigma$). Значит, при увеличении радиуса капли жидкости энергия, связанная с силой тяжести, растет значительно быстрее, чем поверхностная энергия.

При некотором значении объема жидкости часть потенциальной энергии, зависящая от силы тяжести, преобладает над поверхностной энергией. Поэтому минимум общей потенциальной энергии жидкости достигается за счет понижения центра тяжести капли (рис. 43), т. е. за счет сплющивания капли.

Но есть особый случай, когда жидкость, взятая в любом объеме, имеет форму шара. Это бывает в состоянии невесомости, например, при свободном падении. Сила тяжести при этом сообщает всем частицам жидкости одинаковое ускорение, поэтому они не перемещаются относительно друг друга, и жидкость не деформируется. Действие же молекулярных сил, от которых за-

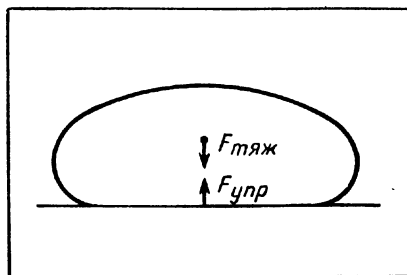


Рис. 43.

вносит поверхностная энергия, приводит к сокращению поверхности, и свободно падающая жидкость принимает форму шара.

Такую форму жидкости наблюдали наши космонавты в орбитальных полетах вокруг Земли.

§ 26. Явление смачивания и его практические применения

Явление смачивания в данном пособии рассматривается на основе применения принципа минимума потенциальной энергии.

Для того чтобы учащиеся поняли его применение к изучаемым явлениям, необходимо, чтобы они отчетливо представляли себе, как изменяются площади поверхностей разделов между различными средами при растекании жидкости по твердому телу или образовании капель на нем.

Этого можно добиться, показав с помощью ряда чертежей (рис. 44) динамику растекания, например, капли воды на поверхности стекла. Из рисунка видно, что при растекании жидкости увеличивается поверхность раздела жидкость (ж) — газ (г) и жидкость (ж) — твердое тело (т), но уменьшается поверхность раздела твердое тело — газ.

Из трех рассматриваемых случаев поверхностная энергия наибольшая для поверхности раздела стекло — воздух. Для поверхности раздела вода — воздух величина поверхностной энергии меньше, и она совсем мала для поверхности раздела вода — стекло. Поэтому растекание воды по стеклу, которое приводит к

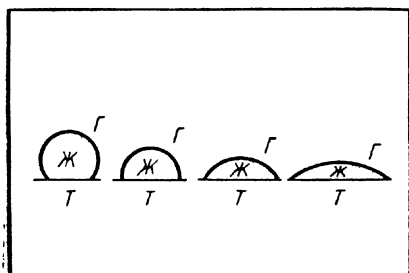


Рис. 44.

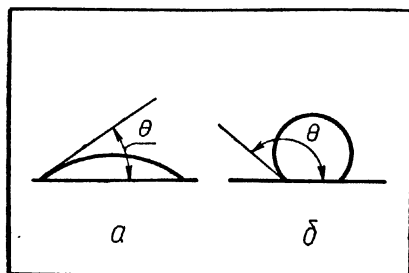


Рис. 45.

уменьшению свободной поверхности твердого стекла на границе с воздухом, приводит к уменьшению общего значения поверхностной энергии на всех границах, несмотря на увеличение поверхности разделов жидкость — твердое тело и жидкость — газ.

Подобным образом можно объяснить явление несмачивания; например, образование капель воды на парафине (см. цветную вклейку I). В этом случае энергетически оправдан такой процесс, при котором поверхность ртути на границе с воздухом и стеклом уменьшается, так как именно поверхностное натяжение на границе ртуть — воздух вносит наибольший вклад в общую сумму поверхностной энергии на всех границах.

Следует обратить внимание учащихся на то, что при смачивании жидкостью твердого тела угол между касательной к поверхности жидкости и твердым телом на общей границе трех сред (рис. 45, а), отсчитываемый внутрь жидкости (краевой угол), острый. В том случае, когда жидкость не смачивает твердое тело, краевой угол тупой (рис. 45, б).

Если жидкость находится в сосуде, стенки которого она смачивает, то форма ее поверхности у стенки вогнутая—краевой угол острый (рис. 46, а).

Несмачивающая жидкость образует у стенок сосуда выпуклую поверхность (рис. 46, б).

Из наиболее важных применений явлений смачивания и несмачивания целесообразно рассмотреть с учащимися принцип флотационного процесса обогащения руд.

Флотационный процесс заключается в следующем. Измельченная в мелкий порошок руда, помещенная в воду, разделяется на части вследствие того, что одна часть (пустая порода) тонет в воде, смачиваясь ею, а другая, не смачиваемая водой (полезный минерал), прилипает к пузырькам воздуха. Последний засасывается специальными мешалками во флотационную ванну и уносится на ее поверхность. Другим примером проявления флотационных сил служит движение по поверхности водоемов водомерки, лапки которой не смачиваются водой (см. цветную вклейку I, снимок сделан в поляризованном свете).

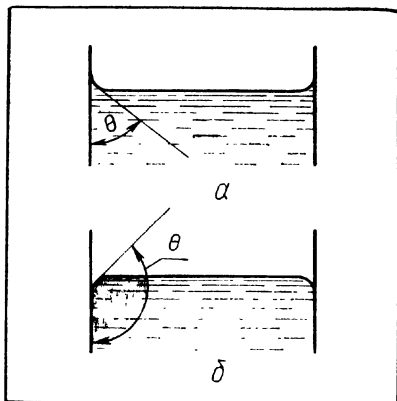


Рис. 46.

§ 27. Явление капиллярности и его применения

Изложение капиллярных явлений наиболее целесообразно дать в такой последовательности: форма поверхности смачивающей и несмачивающей жидкости в капилляре; зависимость давления в жидкости от формы ее поверхности; подъем жидкостей в капиллярных трубках; практические применения капиллярных явлений.

Применяя полученные ранее учащимися знания, устанавливая, что поверхность смачивающей жидкости у стенок сосуда вогнутая, причем в капилляре ее можно принять за полусферу. Несмачивающая жидкость образует в узком сосуде выпуклый мениск.

Наиболее сложен вопрос о равновесии кривых поверхностей жидкости, т. е. вопрос о давлении, связанном с кривизной поверхности жидкости. К этому вопросу следует подойти от эксперимента, показав на ряде опытов, что давление внутри жидкости, ограничен-

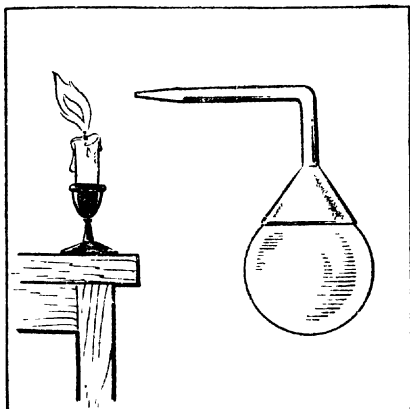


Рис. 47.

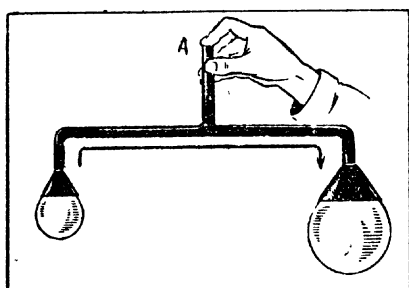


Рис. 48.

ной выпуклой поверхностью, больше, а в случае вогнутого мениска жидкости меньше, чем в случае плоской поверхности.

Совершенно отчетливо это различие в давлении выступает при вытекании струи воздуха из мыльного пузыря, полученного на стеклянной воронке (рис. 47). Внутри мыльного пузыря, под выпуклой поверхностью жидкости, давление больше, чем внешнее. Поэтому воздух вытекает из пузыря, что можно обнаружить по отклонению пламени свечи, поднесенной к концу стеклянной воронки.

Наблюдение этого явления может быть использовано также для того, чтобы показать учащимся, что величина давления внутри пузыря (под выпуклой поверхностью) зависит от радиуса его кривизны. С уменьшением радиуса кривизны (при сокращении пузыря) давление возрастает, воздух вытекает более сильной струей и пламя

отклоняется резче. Однако с большей наглядностью эту зависимость давления под выпуклой поверхностью от радиуса кривизны поверхности можно продемонстрировать на опыте с двумя мыльными пузырями (рис. 48).

При выдувании пузырей они обычно получают неодинаковых размеров. Закрыв отверстие А, можно видеть, что большой пузырь будет расти, а малый сокращаться. Это значит, что воздух из малого пузыря, где давление больше, перетекает в большой пузырь, внутри которого давление меньше.

Установив на опытах, что давление под кривыми поверхностями жидкости отличается от давления под плоской поверхностью и что оно зависит от радиуса кривизны, нужно перейти к количественным соотношениям и сообщить учащимся, что разность давлений для шаровых поверхностей

$$p - p_0 = \frac{2\sigma}{r},$$

где p — давление под кривой поверхностью жидкости, а p_0 — давление под плоской поверхностью (равное внешнему давлению).

Разность давлений $p - p_0$ часто называют капиллярным давлением (p_k).

Как показывает формула, капиллярное давление пропорционально поверхностному натяжению жидкости и обратно пропорционально радиусу кривизны поверхности.

Формула капиллярного давления позволяет вычислить высоту, на которую поднимается смачивающая или опускается несмачивающая жидкость в капилляре над ее уровнем в широком сосуде (рис. 49). Смачивающая жидкость в капиллярной трубке поднимается потому, что давление под плоской поверхностью в широком сосуде больше, чем под вогнутой поверхностью в капилляре, на величину

$$p_k = \frac{2\sigma}{r}.$$

Равновесие жидкости наступает тогда, когда поднятый столб жидкости (рис. 50) своим весовым давлением $p = \rho gh$ уравновесит капиллярное давление:

$$\rho gh = \frac{2\sigma}{r},$$

откуда

$$h = \frac{2\sigma}{r\rho g}.$$

В этой формуле r — радиус кривизны поверхности, равный радиусу капилляра для случая полусферического мениска. В средней школе только такие случаи и целесообразно рассматривать.

Следует обратить внимание учащихся на то, что капиллярные явления весьма распространены. Очень многие окружающие нас тела: дерево, бумага, ткань, кожа, различные строительные материалы — имеют в себе множество мелких каналов. Вода или другие смачивающие их жидкости, придя в соприкосновение с такими телами, впитываются ими, поднимаясь по капиллярам. Так, чернила поднимаются по промокательной бумаге, керосин — по фитилю, вода — по стеблям растений и по промежуткам между частицами почвы и т. д.

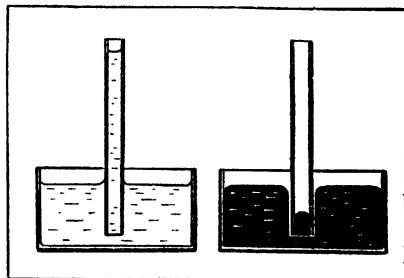


Рис. 49.

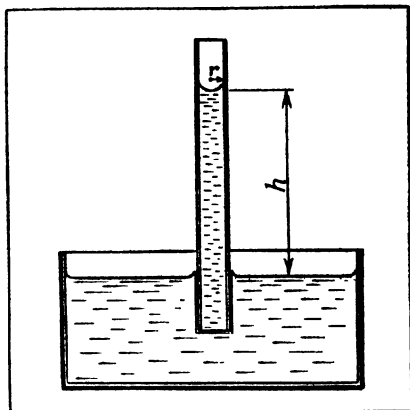


Рис. 50.

Целесообразно предложить учащимся выполнить ряд упражнений:

1. Весной землю пахут и боронуют. Почему это способствует сохранению влаги в почве?
2. Почему трудно вытереть мокрые руки шерстяной тряпкой?
3. На сыром грунте следы от шагов или от машины намокают. Почему?
4. На какую высоту может подняться вода в капиллярных каналах стебля ржи, диаметр которого равен 0,04 мм?
5. Стеклянная капиллярная трубка опущена в воду. Как изменится уровень воды в капиллярной трубке, если: а) воду заменить спиртом? б) провести опыт на Луне?
6. Фитиль поднимает воду на высоту 10 см. На какую высоту по этому же фитилю поднимется керосин?
7. Опустите в воду конец полоски промокательной бумаги и измерьте, на какую максимальную высоту поднимется вода. По высоте подъема воды оцените примерные диаметры каналов в волокнах бумаги.
8. Глицерин поднялся в капиллярной трубке на высоту 20 мм. Определите величину поверхностного натяжения глицерина, если диаметр канала трубки 1 мм.
9. При строительстве зданий фундамент отделяют от стен листами толя (просмоленная плотная бумага). Для чего это делают?

Глава VII

СВОЙСТВА ТВЕРДЫХ ТЕЛ

§ 28. Введение

Твердые тела и материалы, которыми располагает общество, во многом определяют уровень его технического развития. Физика твердого тела служит основой современного материаловедения, она указывает пути создания технически важных твердых тел и материалов с требуемыми свойствами. В связи с этим учебный материал, посвященный изучению свойств твердых тел в школьном курсе физики, должен отражать современное состояние науки о природе и свойствах твердого тела.

Так как применение большинства твердых материалов определяется в первую очередь их механическими свойствами, то из всего многообразия физических свойств в рассматриваемой теме основное внимание уделяют механическим свойствам. Наряду с ними рассматривают также и некоторые другие характеристики твердых тел, которые могут быть объяснены с точки зрения молекулярно-кинетической теории.

Учащихся необходимо познакомить с элементарными представлениями о таких вопросах, как строение идеального кристалла, принцип плотной упаковки, силы межатомного взаимодействия в кристаллах, механизм деформации, строение реальных кристаллов.

§ 29. Механические свойства

1. При ознакомлении учащихся с механическими свойствами следует помнить, что первоначальные сведения об упругих и пластических свойствах учащиеся получают на уроках физики в

VI классе, а работа в школьных мастерских на практике знакомит их с различием в механических свойствах наиболее употребительных твердых материалов. В старших классах рассматривают уже количественные характеристики механических свойств: модуль упругости, предел текучести, запас прочности, пластичность.

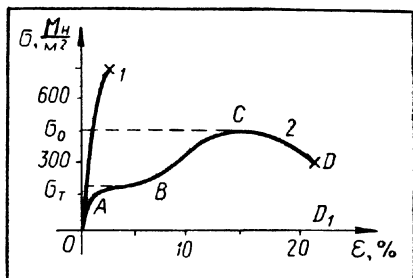


Рис. 51.

С механическими свойствами твердых тел целесообразно знакомить учащихся на основе рассказа об испытании материалов. Такой подход дает возможность, во-первых, познакомить школьников с тем, как в технике определяют механические свойства, и, во-вторых, рассмотреть все механические свойства твердых тел с единой точки зрения.

На практике наибольшее распространение получил метод испытания на растяжение. В результате такого испытания обычно вычерчивают диаграмму растяжения, анализ которой позволяет определить основные характеристики механических свойств. Поэтому диаграмма растяжения может явиться той связующей основой, вокруг которой проводят ознакомление школьников с количественной оценкой механических свойств твердых тел.

В методической литературе описано несколько вариантов экспериментального нахождения зависимости между напряжением и деформацией [ДЭ, I, стр. 77].

Начальный участок диаграммы растяжения OA (рис. 51) представляет собой отрезок прямой. С помощью прибора, позволяющего проводить испытание на растяжение, можно показать, что данному участку соответствуют упругие деформации. Для этого надо убедиться в том, что малые деформации полностью исчезают после разгрузки испытуемого образца.

Учащиеся знают, что прямой линии на графике соответствует прямо пропорциональная зависимость между двумя величинами. На основе этого делают вывод, что в области упругих деформаций существует прямо пропорциональная зависимость между напряжением и относительным удлинением. Эту зависимость записывают математически ($\sigma = E\epsilon$) и разъясняют, что она представляет собой одну из формулировок закона Гука. Закон Гука справедлив для деформации любого вида (сжатие, изгиб и т. д.). Общее условие применимости этого закона состоит в том, что деформации должны быть упругими. В качестве домашнего задания школьникам можно предложить самостоятельно исследовать зависимость величины изгиба стальной линейки от величины нагрузки.

Учащимся разъясняют, что модуль упругости характеризует жесткость материала. С этой целью можно воспользоваться

вычерченными в крупном масштабе начальными участками диаграмм растяжения таких металлов, как сталь и медь. Сравнивая эти диаграммы, легко показать, что одно и то же напряжение в материале, имеющем большее значение модуля упругости, возникает при меньшей упругой деформации. Полезно обратиться к таблице механических свойств и познакомиться с упругими свойствами распространенных материалов (сталь, бетон, дерево, и т. д.).

2. На уроке, посвященном п л а с т и ч е с к и м деформациям, анализируют вторую часть диаграммы растяжения — участок AD (рис. 51). Он отражает зависимость между нагрузкой и деформацией в области остаточных деформаций.

Рассказ о пластических свойствах желательнее сопровождать демонстрацией испытания материала на растяжение. В начале опыта, постепенно нагружая и разгружая образец, наблюдают за изменением его длины и замечают, при каком напряжении возникают заметные остаточные деформации. На основе этих наблюдений вводят понятие п р е д е л а т е к у ч е с т и (σ_T), т. е. наименьшего напряжения, при котором материал начинает «течь». Предел текучести характеризует сопротивление материалов малым пластическим деформациям, поэтому на уроке его рассматривают как характеристику пластических свойств. Учащимся полезно разъяснить, какие изменения в поведении материала отражает предел текучести, ознакомить их с различиями в величине пределов текучести некоторых твердых материалов (металлов, сплавов, пластмасс) и рассказать о том, какое значение для техники имеет знание пределов текучести различных материалов.

Наблюдая за дальнейшим изменением напряжения и анализируя диаграмму растяжения (участок BC), можно сделать вывод, что по мере пластического деформирования к образцу приходится прикладывать все большие напряжения, т. е. сопротивление материала пластическим деформациям возрастает. Это замечательное свойство большинства металлов — способность к упрочнению при пластическом деформировании («наклеп») — должно быть разъяснено на знакомых примерах: края жести, разрезанной ножницами, теряют пластичность и становятся хрупкими; несколько раз согнутая медная проволока становится менее пластичной и т. д.

Если проследить за изменением напряжения в образце при испытании на растяжение и проанализировать диаграмму растяжения, то можно ознакомиться еще с одной характеристикой механических свойств металла — прочностью¹ (на рис. 51 она обозначена σ_0). Величину прочности оценивают по наибольшему напряжению, которое выдерживает материал без разрушения.

Учащимся известно, что различные твердые материалы имеют неодинаковую пластичность. На занятиях по трудовому обучению они познакомились с обработкой металлов резанием и давлением.

¹ В технике эту величину называют пределом прочности.

Опираясь на это, надо рассказать, как важно для техники знать величину пластичности и каким образом пластичность можно оценить количественно.

О пластичности материала судят по величине наибольшей остаточной деформации перед разрушением. На практике наибольшее относительное удлинение при разрыве можно найти, либо измерив на диаграмме растяжения отрезок OD_1 , либо оценив длину двух половинок образца после испытания на разрыв.

На уроке для эксперимента полезно использовать школьный гидравлический пресс с принадлежностями для разрывания стержней и сравнить пластичность (а также прочность) различных материалов: стали, алюминия, бронзы, капрона, полиэтилена и т. д. Внимание учащихся обращают на тот факт, что пластичность материала не является его неизменной характеристикой. В зависимости от температуры, механической или термической обработки и других факторов материал может изменять величину своей пластичности.

Оценка пластичности по величине наибольшей остаточной деформации позволяет самым простым способом ввести понятие о пластичных и хрупких материалах. Учащимся разъясняют, что в технике материалы с малой пластичностью называют хрупкими (например, чугун, кирпич). Такое определение подчеркивает условность деления твердых тел на хрупкие и пластичные, соответствует практике и вполне доступно для школьников. Для закрепления знаний о хрупких и пластичных материалах следует в виде упражнений рассмотреть значения меры пластичности различных материалов из таблицы механических свойств и сравнить между собой диаграммы растяжения закаленной (1) и незакаленной (2) стали (рис. 51). Чтобы учащиеся поняли условность деления твердых материалов на пластичные и хрупкие, желательно привести примеры того, как при увеличении скорости деформации (ударные нагрузки) или уменьшении температуры материал разрушается без заметных пластических деформаций, т. е. хрупко.

При изучении механических свойств твердых тел можно рекомендовать показ кинофильма «Испытание на растяжение» или проведение экскурсии в лабораторию по испытаниям материалов.

§ 30. Кристаллические и аморфные твердые вещества

Для успешного преподавания темы «Свойства твердых тел» важен не только отбор учебного материала, но и выбор рациональной последовательности его изучения. Наиболее удачным можно считать следующий порядок изложения: основные особенности кристаллических и аморфных твердых тел, строение кристаллов, объяснение свойств твердых тел на основе их строения, причины упорядоченного строения кристаллов.

При таком варианте школьники прежде всего узнают о тех опытных фактах, которые должна объяснить теория строения твер-

дых тел. Затем они знакомятся с экспериментальными доказательствами упорядоченности внутреннего строения кристаллов, позволившими объяснить их свойства. И наконец, учащимся объясняют причину упорядоченного строения кристаллов. Изучение свойств твердого тела на этом не заканчивается. Полученные знания о строении твердых тел используют на последующих уроках для объяснения разнообразия свойств кристаллов, а также для выяснения механизма деформаций в твердых телах и физических основ управления механическими свойствами.

В технике к твердым телам относят самые разнообразные конструкционные материалы: металлы, камни, пластмассы, стекло и т. д. Общим для них является способность сопротивляться изменению формы, или, как говорят, упругость формы. В физике твердые тела делят на кристаллические и аморфные. Причина такого деления — различие в их внутреннем строении. Указав на общие свойства кристаллических и аморфных твердых тел, целесообразно рассмотреть их отличительные особенности.

Из всех основных свойств кристаллов, отличающих их от аморфных веществ, для изучения в школе выделяют правильность формы, наличие определенной температуры плавления и анизотропию физических свойств.

Знакомство со свойствами кристаллов целесообразно начать с повторения известных учащимся явлений отвердевания и плавления, так как наличие определенной температуры плавления позволяет почти всегда отличить кристаллическое вещество от некристаллического, аморфного.

- Характерная особенность многих кристаллических тел — это правильность их внешнего вида. Она проявляется в том, что естественной формой кристаллов являются многогранники с плоскими гранями и постоянными для каждого вещества углами между ними.

Необходимо показать, что у кристаллов различных веществ эти многогранники неодинаковы. Для этого школьникам предлагают рассмотреть невооруженным глазом или с помощью лупы кристаллики различных веществ. Ими могут быть поваренная соль, исландский шпат, сахар, гипосульфит, бура, квасцы или какие-то другие вещества, имеющиеся в школе. Весьма полезно показать коллекцию кристаллов, а также зарисовать на доске и в тетрадь внешний вид некоторых из них.

Особо следует остановиться на симметрии кристаллов, т. е. на их свойстве повторять в себе отдельные свои части. Нужно указать, что это одно из наиболее характерных свойств кристаллов, проявляющееся не только в их форме, но и в строении и почти во всех свойствах. Можно привести известное образное выражение о том, что кристаллы «блещут своей симметрией». В сознании школьников понятие о симметрии кристалла должно как бы отождествляться с правильностью его внешнего вида.

В качестве дополнительного материала учащимся можно рассказать о том, что обычно грани кристаллов расположены относительно друг друга по определенным законам симметрии. В мире кристаллов природа «разрешила» только следующие элементы симметрии: оси симметрии 2, 3, 4 и 6-го порядка, плоскости симметрии и центр симметрии. Различным возможным сочетаниям этих элементов симметрии соответствуют разные способы повторения граней кристаллов. Законам симметрии подчинено и размещение частиц в кристалле. Знаменитый русский кристаллограф Е в г р а ф С т е п а н о в и ч Ф е д о р о в (1853—1919) теоретическим путем нашел все возможные способы периодического расположения элементов симметрии в пространстве (их оказалось 230). В природе — в мире кристаллов — не было обнаружено ни одного случая, который не входил бы в это число.

Полезно зарисовать внешний вид кристаллов тех веществ, которые учащиеся могут найти дома. Можно предложить также учащимся в домашних условиях вырастить красивые кристаллы медного купороса, квасцов, поваренной соли. Для этого в насыщенный раствор соли надо внести затравку в виде маленького кристаллика, подвешенного на тщательно вымытой нити.

В противоположность аморфным телам кристаллы а н и з о т р о п н ы. У разных веществ наблюдается анизотропия относительно различных свойств. На уроке необходимо показать хотя бы один из случаев анизотропии. Для этого лучше всего выбрать анизотропию прочности, так как она присуща почти всем кристаллам.

В школьных условиях анизотропию прочности можно показать, раскалывая достаточно крупные кристаллы поваренной соли или расщепляя на отдельные листочки кристаллы слюды. Хорошо, если эти опыты сможет провести каждый ученик на своем столе. Из опытов делают вывод о том, что в различных направлениях прочность кристаллов неодинакова. А это и есть проявление анизотропии свойств кристалла.

Об анизотропии других свойств кристалла (тепловых, электрических, оптических) можно рассказать менее подробно. Эффектен опыт с кристаллом исландского шпата, позволяющий показать, что в некоторых направлениях кристалл может «раздваивать» рассматриваемый предмет.

Анизотропия свойств тесно связана с особенностями строения кристалла, однако проявляется она только у монокристаллов. Большинство же твердых тел — это поликристаллические агрегаты. Каждому кристаллику, входящему в их состав, присуща анизотропия относительно тех или иных свойств. Но так как все они срослись беспорядочно, то в поликристаллах уже не наблюдается преимущественного направления. Такие тела обычно изотропны. Тот факт, что поликристаллы состоят из большого числа беспорядочно расположенных зерен-кристалликов, показывают на изломах цинковой пластинки или напильника из крупнозернистой стали.

С особенностями аморфных тел учащихся целесообразно ознакомить параллельно с изложением свойств кристаллов.

Знания учащихся о свойствах кристаллических и аморфных тел желательно закрепить в беседе, в ходе которой выясняют черты сходства и различия между кристаллическими и аморфными телами, между монокристаллами и поликристаллами, между поликристаллическими телами и твердыми аморфными телами.

§ 31. Строение твердых тел

1. Особенности свойств аморфных и кристаллических твердых тел обусловлены различием их внутреннего строения. Знание строения твердых тел дает возможность не только объяснить их свойства, но и наметить пути, позволяющие изменять эти свойства.

Изложение начинают с напоминания о том, что представления о строении кристаллов должны объяснить их основные особенности: правильность формы, анизотропию свойств, наличие определенной температуры плавления. Затем рассказывают, что еще в XVIII веке правильность внешней формы кристаллов привела ученых к предположению о правильности, упорядоченности их внутреннего строения. Такой взгляд на строение кристаллов позволил объяснить ряд их свойств: плоские грани, постоянство углов, симметрию. Однако это предположение нуждалось еще в экспериментальном доказательстве, которое было получено в опытах по дифракции рентгеновских лучей в кристаллах.

На уроке целесообразно сообщить о том, что в настоящее время получены прямые доказательства упорядоченности расположения атомов в кристаллах. С этой целью можно продемонстрировать, например, изображение расположения атомов в вольфраме, полученное в ионном проекторе (см. цветную вклейку II). Анализ этого снимка убеждает учащихся в том, что атомы в кристаллах действительно расположены упорядоченно.

Особенности свойств кристаллических и аморфных твердых тел могут быть объяснены на основе представлений об их строении. Для этого можно воспользоваться упрощенными схемами строения кристаллических и аморфных тел.

Учащимся разъясняют, что внешняя правильность кристалла является отражением того факта, что внутри него атомы (ионы, молекулы) расположены правильными рядами.

Например, внутренняя симметрия кристалла, т. е. правильная повторяемость отдельных частей его строения, определяет симметрию его внешней формы. Образование у кристаллов плоских граней может быть пояснено с помощью модели, изображающей кристалл в процессе роста (см. цветную вклейку II). При образовании кристалла атомы скорее всего будут присоединяться к нему в точке А, а не в точках В и В', так как в точке А на присоединившийся атом действует притяжение с трех сторон, а не с двух или с одной, как

в точках B и B . Вследствие этого и образуются плоские грани кристалла.

Упорядоченность строения определяет наличие в кристалле преимущественных направлений, так как в отличие от аморфных тел в кристаллах в различных направлениях встречается разное число атомов. Благодаря этому и свойства кристаллов в этих направлениях могут быть неодинаковыми.

Несколько подробнее на уроке следует остановиться на анизотропии прочности, рассмотренной ранее. В связи с тем, что изучение ее проводилось на примере кристаллов поваренной соли,

объяснение этого явления ведут с помощью схемы строения кристалла поваренной соли (рис. 52). В таком кристалле в разных направлениях расстояния между атомными плоскостями и их заряды неодинаковы, поэтому различны и силы притяжения между ними. Прочность тела в конечном счете определяется силами межатомного взаимодействия. Рисунок 52 позволяет понять, почему в направлении, параллельном A_1A_2 , кристалл расколоть легче, чем в направлении, параллельном B_1B_2 , т. е. в конечном счете, почему кристаллы поваренной соли раскалываются всегда на прямоугольные параллелепипеды. Вывод о том, что анизотропия прочности является следствием упорядоченного строения кристаллов, может быть наглядно проиллюстрирован также на модели кристалла графита. В графите плоскости, густо усеянные атомами, отстоят друг от друга примерно в два раза дальше, чем атомы в самих плоскостях.

Наличие у кристаллических тел определенной температуры плавления объясняется тем, что для перехода из твердого кристаллического состояния в жидкое необходимо разрушить упорядоченность в расположении частиц тела. Для этого надо затратить энергию, которую тело получает в виде так называемой теплоты плавления. При температуре плавления за счет этой энергии изменяется характер хаотического движения частиц тела. Учащаются их «перескоки» и разрушается порядок в их расположении. Такой процесс как раз и представляет собой переход тела из кристаллического состояния в жидкое (аморфное).

Учащиеся знают, что в аморфных телах атомы (молекулы) расположены хаотично. Этим можно объяснить изотропию свойств аморфного тела, его постепенное размягчение при нагревании и относительную термодинамическую неустойчивость по сравнению с кристаллическими телами.

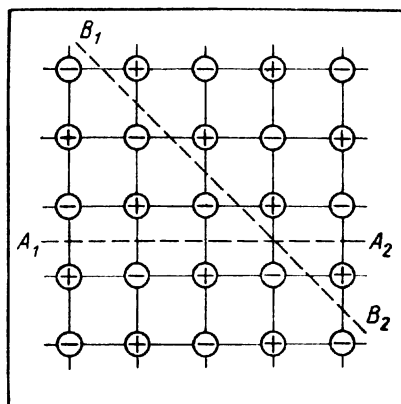


Рис. 52.

2. После рассмотрения строения кристаллических тел учащимся необходимо разъяснить, почему в кристаллах частицы располагаются упорядоченно и почему строение, а следовательно, и свойства различных кристаллов неодинаковы.

Причины упорядоченного расположения частиц в кристалле — это существование сил межатомного взаимодействия. Учащиеся уже знают, что силы притяжения и силы отталкивания между атомами тел неодинаково зависят от расстояния. Из этого делают вывод о том, что частицы твердого тела можно рассматривать как твердые упругие шары, притягивающиеся друг к другу. В определенной мере такая модель соответствует действительности, так как на малых расстояниях между атомами преобладают значительные силы отталкивания, затрудняющие проникновение атомов тела друг в друга.

Кроме того, учащимся известно, что состоянию устойчивого равновесия соответствует минимум потенциальной энергии. Все это позволяет изложить сведения о строении твердых тел как следствие ранее изученных закономерностей. Для этого учащихся необходимо ознакомить с плотными упаковками частиц в кристаллах. Изложение материала на уроке можно провести следующим образом.

Частицы, образующие кристалл (атомы, ионы, молекулы), связаны между собой силами взаимодействия, имеющими электрическое происхождение. Зависимость этих сил от расстояния такова (см. стр. 65), что частицы большинства кристаллов в первом приближении можно рассматривать в виде притягивающихся друг к другу шаров.

Кристалл — это устойчивое состояние твердого тела. Отверждение наступает при охлаждении жидкости, т. е. при уменьшении интенсивности теплового движения. В этих условиях решающее воздействие (по сравнению с тепловым движением) на взаимное расположение частиц тела начинают оказывать силы притяжения между ними. Под их влиянием частицы тела получают возможность уменьшить свою взаимную энергию.

С уменьшением расстояния между двумя притягивающимися телами их взаимная потенциальная энергия уменьшается. Поэтому процесс образования устойчивого состояния твердого тела (процесс кристаллизации) сводится к тому, что расстояния между его частицами уменьшаются. Вследствие этого атомы располагаются как можно ближе друг к другу. В результате образуется система плотно упакованных частиц, расположение которых в пространстве повторяется. Это и есть кристалл, так как плотная упаковка частиц влечет за собой как устойчивость (минимум потенциальной энергии системы), так и упорядоченность строения, проявляющуюся, например, в анизотропии некоторых свойств.

Наглядными пособиями при изложении приведенного материала служат различные «плотные упаковки» шаров, представляющие собой модели кристаллов. Двумерную модель можно получить с

помощью шариков или горошин в сосуде со слегка вогнутым стеклянным дном. Слабым потягиванием такого сосуда легко добиться такого положения, когда «притягивающиеся» друг к другу шарики (изображающие частицы тела при слабом тепловом движении) расположатся наиболее тесным образом в виде плотнейшей упаковки. Эту демонстрацию проводят на уроке в теневой проекции.

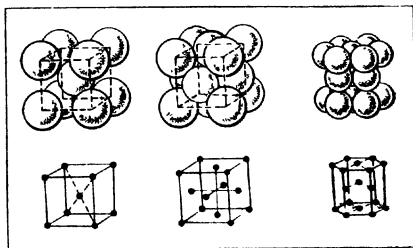


Рис. 53.

На моделях, изготовленных из пластилина, нетрудно показать, что шары могут плотно упаковываться по-разному, а следовательно, и строение кристаллов может быть самым различным. Отмечается, что тип упаковки частиц в кристалле того или иного вещества определяется природой сил связи и размерами частиц, образующих кристалл. Модель кристалла поваренной соли позволяет понять, как располагаются в кристаллах частицы различных диаметров.

От рассмотрения плотных упаковок логично перейти к знакомству с кристаллическими решетками. Учащимся рассказывают о том, что строение различных кристаллов можно изобразить схематически, не считаясь с размерами частиц, а обращая внимание только на их взаимное расположение. Если мысленно провести прямые через центры плотно упакованных частиц — «шаров» кристалла, а затем «удалить» частицы, то остается так называемая кристаллическая решетка. По расположению узлов (точек пересечения прямых) этой решетки можно судить о строении кристаллов. При объяснении следует воспользоваться рисунком, на котором совмещены изображения упаковки частиц в кристалле и кристаллической решетки (рис. 53).

Чтобы ознакомить учащихся с разнообразием в строении кристаллов, демонстрируют модели некоторых типов плотных упаковок и соответствующих им кристаллических решеток. Наиболее распространены объемноцентрированный куб (натрий, хром, вольфрам, α -железо и др., рис. 53 слева), гранецентрированный куб (медь, алюминий, свинец, γ -железо и др., рис. 53 в середине) и гексагональная решетка (магний, цинк и т. д., рис. 53, справа).

§ 32. Управление механическими свойствами

1.⁵ Современная техника нуждается в прочных и долговечных материалах с разнообразными механическими и другими свойствами. Чтобы создавать такие материалы, чтобы изменять их свойства в нужном направлении, важно знать, что происходит в реальных твердых телах под действием внешней механической нагрузки, т. е. необходимо знать механизм деформации и разрушения.

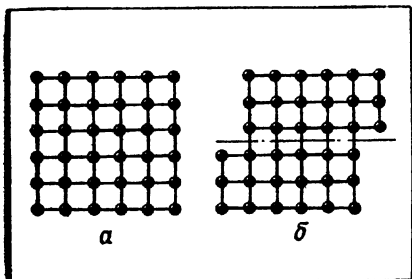


Рис. 54.

Ознакомление с механизмом пластических деформаций начинают с рассмотрения деформации монокристалла. Учащиеся знают, что пластические деформации сопровождаются изменением формы тела. Следовательно, при пластических деформациях частицам приходится покидать свои положения равновесия. Однако сохранение целостности тела свидетельствует о том, что после пластического де-

формирования атомы вновь оказываются в положении равновесия. С помощью моделей кристалла следует показать, что это возможно в том случае, если происходит скольжение атомных плоскостей кристалла друг относительно друга. При этом полезно воспользоваться рисунком, где схематически показан кристалл до деформации (рис. 54, а) и после пластической деформации (рис. 54, б). Опираясь на сведения о существовании атомных плоскостей, силы взаимодействия между которыми относительно невелики, надо разъяснить, что механизм пластических деформаций в монокристаллах заключается в том, что при достижении определенного напряжения (предела текучести) вдоль таких плоскостей происходит сдвиг, скольжение.

На уроке полезно выяснить, как происходит скольжение атомных плоскостей при пластической деформации.

Если подсчитать напряжение, необходимое для одновременного смещения всех частиц атомной плоскости, то окажется, что оно во много раз больше напряжения, при котором в реальных телах возникают пластические деформации. Следовательно, при сдвиге связи между скользящими атомными плоскостями не могут прерываться все одновременно.

Чтобы правильно представить себе механизм пластической деформации, необходимо учесть, что в кристаллах всегда имеются нарушения правильности расположения атомов — различные дефекты строения (атомы примеси, не занятые атомами узлы решетки, границы зерен и т. д.).

В металлах и других пластичных материалах решающую роль играют особые подвижные дефекты кристаллической решетки — дислокации. При рассказе о них можно использовать схематическое изображение дислокации, образованной краем «лишней» атомной плоскости (рис. 55).

Механизм пластической деформации, т. е. сдвиг атомных плоскостей при наличии дислокации, также поясняют с помощью рисунка 55. Под действием внешних сил сдвиг на одно межатомное расстояние, т. е. перемещение дислокации вдоль кристалла, постепенно распространяется вдоль плоскости скольжения через крис-

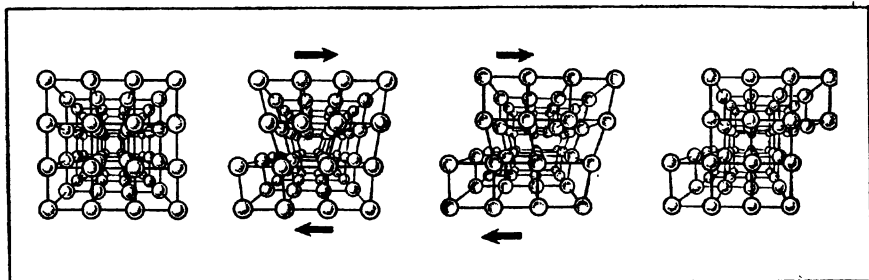


Рис. 55.

талл. При этом связи между скользящими плоскостями перестраиваются не все одновременно, а постепенно одна за другой.

2. В результате знакомства с механизмом пластической деформации учащиеся понимают, что пластическое деформирование во много раз облегчается, если в твердом теле имеются дислокации и если эти дислокации могут свободно перемещаться. Из этого следует, что один из путей, позволяющих повысить сопротивление твердых тел появлению остаточных деформаций, — это образование в металле всякого рода дефектов строения, которые затрудняют, тормозят перемещение дислокаций. Именно поэтому, изменяя в процессе обработки вид и число дефектов строения в кристалле, удастся существенно изменить характеристики многих свойств металлов.

Изменение физических свойств металла за счет изменения его химического состава (введение лигирующих элементов) используют при создании сплавов, когда получают материалы с заданными свойствами путем смешивания определенных элементов в расплавленном состоянии. Учащихся целесообразно познакомить с некоторыми количественными данными, иллюстрирующими зависимость свойств вещества от его химического состава. Например, добавка к железу 0,001% углерода увеличивает предел его текучести в два раза.

3. Используемые в технике твердые материалы почти всегда поликристаллические. Они обычно менее пластичны по сравнению с монокристаллами того же вещества. Учащимся предлагают вспомнить механизм пластической деформации в отдельном кристалле. Внимание их обращают на то, что хаотическое расположение зерен в поликристаллах затрудняет процесс пластического деформирования.

Действительно, при пластических деформациях происходит скольжение в отдельных зернах металла. Этому процессу препятствуют соседние беспорядочно расположенные зерна, которые как бы блокируют плоскости скольжения. В результате затрудняется перемещение дислокаций в кристаллах и это уменьшает пластичность поликристаллических металлов.

Знание механизма пластических деформаций в поликристаллах позволяет понять причину такого важного свойства металла, как способность к упрочнению. С н а к л е п о м, т. е. с упрочнением металла при холодной обработке, учащиеся знакомы по работе в школьных мастерских. На уроках физики упрочнение можно объяснить тем, что в процессе пластического деформирования растет число дислокаций в металле, искажается кристаллическая решетка и измельчаются зерна металла. В результате этого уменьшается подвижность дислокаций и затрудняется пластическое деформирование.

На изменении структуры металлов при пластическом деформировании основан ряд способов управления механическими свойствами. Учащимся целесообразно предложить ответить на вопрос, как, опираясь на знание механизмов пластических деформаций в поликристаллах, можно повысить сопротивление металла пластическим деформациям.

4. Рассматривая на уроке прочность твердого тела, полезно вспомнить, что для разрушения тела необходимо, чтобы в нем создалось напряжение, соответствующее предельной прочности, величина которой определяется силами межатомного взаимодействия. Действительно, в этом случае расстояние между частицами тела увеличивается, силы связи между ними уменьшаются и тело разрушается. Однако следует отметить, что на практике твердые тела разрушаются при напряжениях, во много раз меньших их предельной прочности. Это явление объясняется тем, что для разрушения, как и для пластичного деформирования, важны всевозможные микро- и макродефекты, имеющиеся в реальных твердых телах (дефекты строения кристаллов, поверхностные и внутренние трещины литья, царапины и повреждения поверхности тела при обработке и т. д.). В этих местах возникает резкое повышение напряжения, достигающее величины предельной прочности тела. Это и вызывает процесс разрушения, который начинается в какой-либо части тела, а затем уже распространяется по всему его сечению. При этом среднее напряжение, приложенное к телу, остается во много раз меньше предельной прочности.

Чтобы создать у учащихся правильные представления о влиянии разного рода дефектов на величину прочности твердого тела, им можно рассказать о том, что различные вырезы, выточки, отверстия способствуют значительному понижению прочности детали. В этих опасных местах во много раз увеличиваются напряжения, и тело может разрушиться.

Влияние резких изменений в сечении детали на прочность легко показать на примере разрыва полосок из станиоля или бумаги.

Учащихся можно ознакомить с возможностью создания сверхпрочных металлов за счет уменьшения числа дефектов в их внутреннем строении. Они знают, что максимальной прочностью обладает идеально правильный кристалл, решетка которого не имеет

искажений. Следует рассказать, что в настоящее время в лабораториях выращивают «идеальные» кристаллы, практически лишенные дефектов, с прочностью, близкой к предельной. В качестве примера достаточно привести только две цифры. Обычное чистое железо разрывается при напряжении в $2 \cdot 10^6$ Н/м², а кристаллы железа, полученные в лаборатории почти без дефектов строения (без дислокаций), имеют прочность на разрыв $14 \cdot 10^7$ Н/м².

На поведение твердых тел под действием внешних сил существенно влияют условия деформации: температура, время деформирования и окружающая среда. Знание механизма пластических деформаций позволяет объяснить учащимся, почему при ударных нагрузках, например при штамповке, возникает опасность хрупкого разрушения. Учет и использование зависимости механических свойств от температуры могут быть проиллюстрированы на примере горячей обработки металлов. Причина облегчения деформирования и уменьшения прочности твердых тел под действием поверхностно-активной среды объясняется на основе знаний учащихся о поверхностных явлениях в жидкостях.

Для закрепления знаний по учебному материалу данной темы учащимся желательно предложить ряд упражнений, примеры которых приводятся ниже.

1. Исходя из закона Гука, записанного в форме $\sigma = E\varepsilon$, получите соотношение между упругой силой ($F_{\text{упр}}$) и абсолютной деформацией (Δl).

2. Какое напряжение возникнет в метровой стальной проволоке диаметром 0,5 мм, если ее растянуть на 2 мм?

3. Деревянная свая высотой 3 м имеет поперечное сечение 300 см². Найти абсолютное сжатие под действием груза 50 кН.

4. При какой длине подвешенная вертикально стальная проволока оборвется под действием собственного веса?

5. В каких случаях куб, вырезанный из монокристалла, при нагревании может превратиться в параллелепипед?

6. Как можно отличить друг от друга две внешне одинаковые пластинки: из кристаллического кварца и из стекла?

7. Составьте коллекцию кристаллических и аморфных твердых тел.

8. Вырастите дома кристаллы из раствора поваренной соли, алюминиевых квасцов или гипосульфита. Воспользуйтесь советами учителя.

9. Почему алмаз имеет большую прочность, чем графит?

10. Приведите примеры того, когда твердое тело меняет свои механические свойства в зависимости от температуры или скорости деформации.

11. Какими способами можно повысить сопротивление металла пластическому деформированию?

Часть II

ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОДИНАМИКИ

Глава VIII

НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ИЗУЧЕНИЯ ЭЛЕКТРОДИНАМИКИ В СРЕДНЕЙ ШКОЛЕ

§ 33. Содержание и структура раздела

Вопросы электродинамики занимают одно из самых значительных мест в курсе физики средней школы. И это вполне закономерно, так как полностью соответствует тому значению, которое этот раздел имеет для формирования у учащихся представления об общей физической картине мира, для разъяснения учащимся важнейшего направления научно-технического прогресса — электрификации народного хозяйства и применения радиоэлектроники к автоматизации производственных процессов.

Как указывал В. И. Ленин, «к электрификации неграмотные люди не подойдут, и мало тут одной простой грамотности. Здесь недостаточно понимать, что такое электричество: надо знать, как технически приложить его и к промышленности и к земледелию...»¹

Повышение научного уровня раздела электродинамики в средней школе и усиление его практической направленности способствуют решению этой задачи.

Характерной особенностью содержания современного курса физики является группировка всего учебного материала вокруг небольшого числа фундаментальных понятий и принципов. В разделе «Основы электродинамики» это — понятия об электрически заряженных частицах и учение об электромагнитном поле. Взаимодействие между заряженными частицами, осуществляемое через электромагнитные поля, относится к наиболее распространенному в природе электромагнитному взаимодействию.

В этом разделе продолжают развивать одну из ведущих физических идей: об относительности движения и системах отсчета. Здесь показывают, что электрическое и магнитное поля являются составляющими электромагнитного

¹ Ленин В. И. Задачи союзов молодежи. Речь на III Всероссийском съезде Российского коммунистического союза молодежи. — Полн. собр. соч. Изд. 5-е, т. 41, стр. 307.

поля, что проявление каждого из них зависит от системы отсчета.

Так же как в молекулярной физике ведущей является молекулярно-кинетическая теория, так и в электродинамике дальнейшее продвижение учащихся в изучении строения вещества идет на основе электронной теории.

В средней школе изучают основы классической электронной теории. Вместе с тем в ряде случаев указывают границы ее применимости, и это имеет существенное значение для усвоения школьниками одного из основных положений теории познания диалектического материализма о соотношении между абсолютной и относительной истинами.

Изучение элементов классической электронной теории доводят до вывода закона Ома для участка цепи. Этот вывод дает возможности применить его для анализа характера зависимости силы тока от напряжения в различных средах; установить границы применимости этого закона; связать макроскопическую величину — удельное сопротивление — с атомарными величинами, характерными для данного вещества. Отсюда возникает возможность предположить существование зависимости сопротивления проводников от температуры, что имеет большое методологическое значение, так как показывает учащимся эвристическую роль теории.

При изучении электродинамики и в частности таких тем, как «Электрический ток в различных средах» и «Магнитные свойства вещества», учащиеся углубляют свои знания о строении вещества, полученные в разделе «Молекулярная физика», о частицах, входящих в состав атомов и молекул, об их движении и взаимодействии.

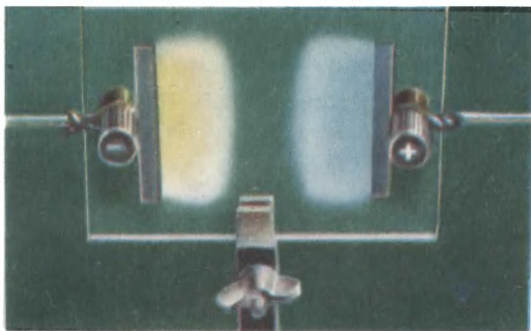
Практическая направленность раздела обеспечивается тем, что в него входит изучение устройства и действия современных приборов и установок.

Изучение электрического тока в различных средах дает возможность разъяснить физические основы использования электролиза для получения алюминия и других цветных металлов, применения искрового и дугового разрядов в металлургии и в технологических процессах по обработке металлов, а также коронного разряда в электрофильтрах и др.

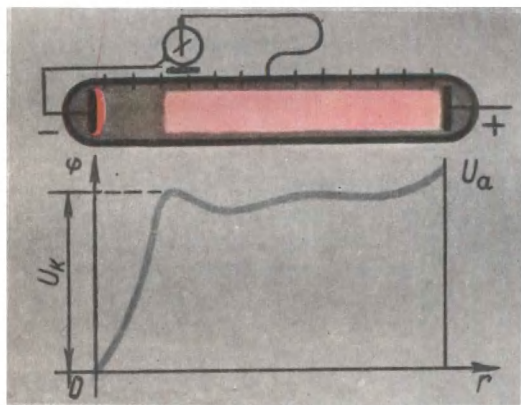
Ознакомление учащихся с электромагнетизмом позволяет им понять многие важные технические применения, например: учет явления самоиндукции (масляные выключатели, искрогасительные конденсаторы), принцип действия циклических ускорителей, а также применение магнитных свойств вещества.

Изучение всех этих вопросов обеспечивает политехническую направленность содержания раздела «Основы электродинамики».

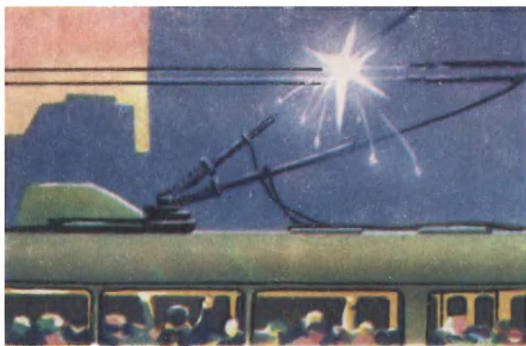
Программой предусмотрена следующая последовательность изучения тем раздела: электрическое поле; постоянный электрический ток; магнитное поле тока; электромагнитная индукция; магнитные свойства вещества. В такой последовательности из-



III. По распространению окраски обнаруживают движение ионов.



Приборы, в которых наблюдают и используют тлеющий разряд: двухэлектродная трубка, неоновая лампа, рекламные газоразрядные трубки.



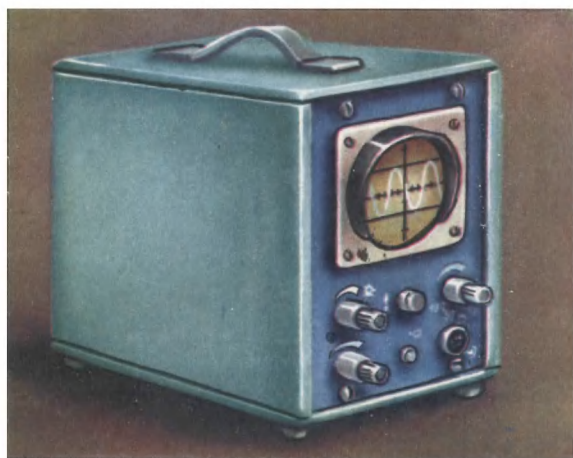
Образование дугового разряда при отрыве штанги троллейбуса от токонесущего провода.



IV. Телевизионная электронно-лучевая трубка — кинескоп.



Электронно-лучевая трубка в цветном телевизоре.



Электронно-лучевая трубка в осциллографе.

ложен учебный материал в учебном пособии «Физика, 9». При этом изучение электрического тока в различных средах начинают с тока в металлах, что позволяет вначале рассмотреть основы электронной теории, получить вывод закона Ома и следствия из него применять далее к анализу механизма проводимости других сред.

В соответствии с принятой последовательностью тем изучение магнитных свойств вещества отделено от прохождения магнитного поля тока темой «Электромагнитная индукция». Это дает возможность при описании магнитных свойств вещества опираться на явление электромагнитной индукции.

§ 34. Некоторые педагогические принципы изучения электродинамики

Успешное усвоение содержания изучаемого материала во многом зависит от широкого применения в преподавании ряда дидактических приемов, активизирующих познавательную деятельность учащихся. К ним относятся приемы сопоставления и сравнения понятий, явлений, закономерностей, имеющих черты сходства, применение аналогий и моделей, использование демонстрационного эксперимента и др.

Сопоставление и сравнение, отыскание черт сходства и различия представляют собой важный элемент процесса усвоения знаний. Таких вопросов, для усвоения которых особенно важно использование приема сравнения, в электродинамике много. Это, например, закон Кулона и закон всемирного тяготения; магнитное и электрическое поля; электрический ток в различных средах и др.

В методике преподавания электродинамики значительное место уделяют использованию аналогий и моделей. В науке аналогии применялись многими учеными. Так, Максвелл, применяя аналогии, пришел к своим замечательным уравнениям, являющимся основой учения об электромагнитном поле. Он использовал аналогию между электрическим током и течением воды для установления зависимости между силой тока и напряжением, т. е. для установления закона, носящего его имя. В преподавании аналогии играют иную роль: они служат для разъяснения сложных явлений и закономерностей. Особенно полезны аналогии при изучении явлений, недоступных для непосредственного наблюдения. Например, при выяснении роли источника тока, введении понятия об э. д. с. и рассмотрении энергетических превращений в цепи тока значительно облегчает усвоение этих вопросов механическая аналогия, т. е. сопоставление электрического тока с движением шарика по наклонной винтовой дорожке.

Аналогии также могут быть с успехом применены при изучении термоэлектронной эмиссии (с испарением жидкости), явления самоиндукции (с инерцией), возникновения э. д. с. самоиндукции при размыкании цепи (с гидравлическим ударом) и др.

При использовании аналогий следует иметь в виду, что они отражают не полную тождественность явлений, а лишь сходство в некоторых чертах между вновь изучаемым и известным уже учащимся более наглядным явлением. Поэтому любую аналогию можно применять лишь в определенных границах, где не выступают отличительные черты сравниваемых явлений — наличие заряда у движущихся частиц, магнитные поля, создаваемые ими, и т. д. Чтобы определить в каждом отдельном случае границы применения данной аналогии, необходимо при сопоставлении явлений указывать не только черты сходства, но и различия между ними.

Не меньшее значение в преподавании электродинамики имеет применение моделей. Это относится главным образом к тем моделям, которые создают представления об объектах, непосредственно не наблюдаемых: атомах, электронах, ионах. Например, при выводе закона Ома из электронной теории используют модельные представления об электронном газе, где электроны рассматривают как материальные точки, наделенные электрическим зарядом. При этом учащимся должны быть разъяснены те упрощения, которые вносят в представления о поведении электронов в металле применения данной модели.

Кроме аналогий и моделей, разъяснению механизма явлений, недоступных для непосредственного наблюдения, способствует использование учебных кинофильмов. Такие фильмы имеются почти по всем темам электродинамики.

Известно, что процесс мышления человека активизируется тогда, когда возникает определенная проблемная ситуация. Это важное положение всегда нужно иметь в виду в процессе обучения. Эффективным способом создания проблемной ситуации при изучении электродинамики могут служить некоторые опыты и экспериментальные задачи. В этих опытах демонстрируют явления, которые на первый взгляд противоречат усвоенным ранее представлениям учащихся, или такие, которые требуют объяснения на основе усвоенных ранее знаний. Например, экспериментально получают вольтамперную характеристику для нити лампы накаливания, которая оказывается кривой линией, а не прямой, как было установлено ранее для металлических проводников. Выяснение кажущегося противоречия позволяет поставить перед учащимися учебную задачу — изучить зависимость сопротивления проводников от температуры.

Глава IX

ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ

§ 35. Введение

Изучение основ электродинамики завершается формированием важного и сложного понятия об электромагнитном поле. В электростатике, где изучают электрическое поле непод-

вижных зарядов, при рассмотрении сравнительно простых явлений вводят ряд предварительных понятий, необходимых для формирования понятия об электромагнитном поле. Кроме того, в электростатике учащиеся получают ряд сведений, необходимых для понимания физических явлений, наблюдаемых в природе и быту, а также имеющих применение в промышленном производстве. Введением понятия электрического поля как одного из видов материи электростатика вносит свой вклад в формирование диалектико-материалистического мировоззрения.

Приступая к изучению электростатики, необходимо учитывать, что учащиеся еще в VII классе практически ознакомились с явлением электризации тел, на опытах убедились в существовании двоякого рода зарядов, имеют начальные представления о строении атома и умеют объяснить ряд явлений, связанных с взаимодействием зарядов. Развивая и углубляя изученное ранее, сообщая новые сведения, учитель должен побуждать учащихся вспоминать изученное и опираться на эти знания.

В данной главе предполагается привлечь внимание учителя к вопросам, особенно трудным для усвоения учащимися, требующим разъяснения более детального, чем это может быть сделано в учебнике. В ней рассматриваются закон Кулона как основа всего раздела, рационализация записи уравнений электродинамики в системе СИ и переход от одной формы записи в другую, подчеркиваются особенности электрического и гравитационного взаимодействий, выясняются причины прочности вещества и ряд других вопросов. Предлагаются также задачи, решение которых может способствовать лучшему пониманию изучаемого материала. При этом предполагается, что некоторые изложенные ниже сведения учитель может сообщить учащимся для более глубокого понимания и запоминания основного материала, изложенного в учебнике, но не следует требовать от девятиклассников их заучивания.

§ 36. Закон Кулона

Закон взаимодействия электрических зарядов — один из фундаментальных законов природы. Поэтому ознакомление с историческими опытами, на основании которых он был открыт, имеет для учащихся особо важное значение. Рассказ об устройстве крутильных весов, которыми пользовался Шарль Огюстен Кулон (1736—1806), целесообразно сопроводить рисунком на доске или диапозитивом. После того как будет сформулирован закон Кулона, следует продемонстрировать выраженные в нем зависимости с помощью специальных неравноплечих весов в установке, изображенной на рисунке 56.

Весы представляют собой рычаг, уравновешенный противовесом в горизонтальном положении. Легкий пустотелый металлический шарик диаметром около 20 мм прикреплен к рычагу на изолирующем стержне точно под осью и вращающего момента не

создает. Рычаг устанавливают в горизонтальном положении, передвигая противовес, пока конец рычага не станет против метки, нанесенной на основании прибора.

Вся установка состоит из закрепленных на штативе весов, второго шарика на изолирующем стержне и линейки, установленной так, чтобы удобно было измерять расстояние между центрами шариков.

Когда установка подготовлена, оба шарика заряжают от электрофорной машины и шарик на штативе помещают на расстоянии 5—6 см от другого шарика. Весы при этом выйдут из равновесия. Чтобы вернуть их в прежнее горизонтальное положение, на рычаг насаживают рейтер — скобочку из проволоки — и перемещают его вдоль рычага, пока конец рычага не совпадет с меткой.

Затем уменьшают заряд одного из шариков вдвое, для чего касаются его незаряженным третьим шариком такого же размера на изолирующей ручке. И опять, передвигая рейтер по рычагу, добиваются равновесия весов. Оказывается, что в этом случае плечо силы уменьшилось вдвое, значит, и сила отталкивания между шариками уменьшилась также в два раза. Уменьшив тем же способом заряд в 4 раза, наблюдают уменьшение силы тоже в 4 раза.

Опыт повторяют, меняя заряд другого шарика, и из проведенных наблюдений делают вывод, что сила взаимодействия пропорциональна величинам каждого из зарядов.

Чтобы показать на опыте зависимость силы взаимодействия от расстояния, опять заряжают оба шарика, устанавливают их на расстоянии, например, 5 см друг от друга и определяют величину силы по положению рейтера на рычаге при равновесии весов. Затем увеличивают расстояние между шариками вдвое (10 см), а затем втрое (15 см). Перемещая рейтер, приводят весы в равновесие и убеждаются, что в первом случае сила уменьшилась в 4 раза, а во втором — в 9 раз, т. е. именно так, как это следует из закона Кулона [ДЭ, II, опыт 5].

Крутильные весы, которыми пользовался Кулон для установления указанной зависимости, были безусловно более чувствительными, чем описанный здесь демонстрационный учебный прибор. Однако их чувствительность все же не была достаточной, чтобы на этом прекратить дальнейшие исследования. В настоящее время закон Кулона подтвержден с высокой степенью точности проверкой на опытах вытекающих из него следствий.

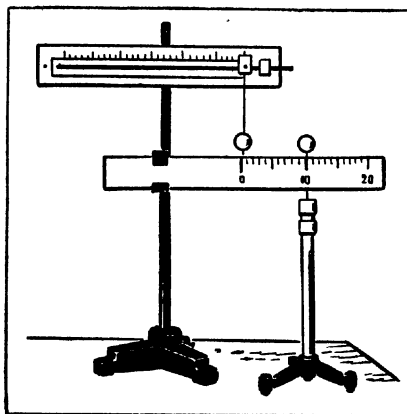


Рис. 56.

§ 37. Единицы заряда

Замечено, что у учащихся возникают немалые трудности при введении рационализованной формы записи уравнений электростатики и при переходе из одной системы единиц в другую. Чтобы помочь учащимся понять проводимые при этом преобразования, можно рекомендовать такой ход изложения.

В Международной системе единиц пользуются уже известной учащимся единицей заряда кулоном, которая установлена независимо от закона Кулона. Это позволяет ввести коэффициент пропорциональности k в законе Кулона ($F = k \frac{q_1 q_2}{R^2}$) как величину, полученную из опыта:

$$k = \frac{FR^2}{q_1 q_2} = 9 \cdot 10^9 \text{ Н} \cdot \text{м}^2 / \text{Кл}^2.$$

Полезно при этом напомнить учащимся, что аналогично было получено значение коэффициента пропорциональности в законе всемирного тяготения ($\gamma = \frac{FR^2}{m_1 m_2}$).

Единицу заряда в системе СИ получают из закона Кулона, принимая значение коэффициента k равным единице.

В Международной системе единиц принята так называемая «рационализованная» форма записи формул электродинамики с целью освобождения некоторых важных формул от имеющихся в них множителей 2π или 4π . Разумеется, это сделано за счет введения тех же множителей в другие, менее употребительные формулы и прежде всего в формулу, выражающую закон Кулона. Проследим это на ряде преобразований.

Умножим и разделим знаменатель в формуле, выражающей закон Кулона, на $4\pi k$:

$$F = k \frac{q_1 q_2}{4\pi k \frac{1}{4\pi k} R^2}.$$

или

$$F = \frac{q_1 q_2}{4\pi \frac{1}{4\pi k} R^2}.$$

Величину $\frac{1}{4\pi k}$, стоящую в знаменателе, обозначают символом ϵ_0 и называют электрической постоянной:

$$\epsilon_0 = \frac{1}{4 \cdot 3,14 \cdot 9 \cdot 10^9} \text{ Кл}^2 / (\text{Н} \cdot \text{м}^2) \approx 8,8 \cdot 10^{-12} \text{ Кл}^2 / (\text{Н} \cdot \text{м}^2)$$

Итак, формула для закона Кулона, записанная в рационализованной форме, в единицах СИ для вакуума имеет следующий вид:

$$F = \frac{q_1 q_2}{4\pi \epsilon_0 R^2}.$$

Следовательно, в коэффициенте k , полученном из опыта, содержится выражение 4π :

$$k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} = 9 \cdot 10^9 \text{ Н} \cdot \text{м}^2 / \text{Кл}^2.$$

Поэтому в дальнейшем при пользовании законом Кулона можно вместо выражения $\frac{1}{4\pi\epsilon_0}$ писать коэффициент k .

В случае необходимости учитель может объяснить учащимся, как узнать, в какой системе написана та или иная формула электростатики.

В электростатике рационализированную форму записи применяют только для закона Кулона и всех выведенных из него формул. Остальные формулы электростатики записывают в обеих системах одинаково. Такова, например, формула для определения поверхностной плотности заряда шара:

$$\sigma = \frac{q}{4\pi R^2}.$$

Если формула выведена из закона Кулона и в ней отсутствует ϵ_0 , то формула записана в нерационализованной форме в системе СГСЭ.

Если в формуле содержится электрическая постоянная, то формула записана в единицах СИ.

Для перехода от одной системы к другой надо правую часть формулы освободить от множителя π или ϵ_0 . Для этого ее надо умножить или разделить на $4\pi\epsilon_0$.

Если в формуле оба эти множителя отсутствуют, то выражение $4\pi\epsilon_0$ надо ввести в правую часть формулы так, чтобы ϵ_0 и π оказались сомножителями.

Рассмотрим примеры.

1. Формула напряженности у поверхности заряженного шара $E = \frac{\sigma}{\epsilon_0\epsilon}$.

Электрическая постоянная ϵ_0 , стоящая в знаменателе, есть признак того, что формула написана в единицах СИ. Умножив правую часть на $4\pi\epsilon_0$, получим для системы СГСЭ: $E = \frac{4\pi\sigma}{\epsilon}$.

2. Емкость плоского конденсатора с диэлектрической проницаемостью диэлектрика ϵ :

$$C = \frac{\epsilon S}{4\pi d}.$$

Данная формула получена из выражения $E = \frac{4\pi q}{\epsilon S}$ для поля между двумя разноименно заряженными пластинами, при выводе которого был использован закон Кулона. Значит, по отсутствию в ней электрической постоянной ϵ_0 можно заключить, что формула дана для системы СГСЭ. Умножив выражение для емкости плоского конденсатора на $4\pi\epsilon_0$, получим запись формулы в СИ:

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

3. Согласно определению напряженность электрического поля:

$$E = \frac{F}{q}.$$

Для какой системы единиц написана формула? Поскольку эта формула следует из определения напряженности и не связана с законом Кулона, в обеих системах она записывается одинаково.

4. Формула емкости шара

$$C = \epsilon R$$

выведена на основании закона Кулона. По отсутствию в ней ϵ_0 заключаем, что формула дана в системе СГСЭ. Но в ней отсутствует также и множитель 4π . Переходя к единицам СИ, выражение $4\pi\epsilon_0$ вводим так, чтобы ϵ_0 и ϵ оказались сомножителями. Получаем: $C = 4\pi\epsilon_0\epsilon R$.

§ 38. Электрические и гравитационные взаимодействия

Сходство законов электрического и гравитационного взаимодействий не может не привлечь внимания учащихся. Но при обсуждении этого вопроса необходимо в то же время обратить внимание на глубокие различия в природе и в проявлении этих взаимодействий.

Гравитационные силы действуют между любыми двумя частицами, тогда как только некоторым частицам свойственно еще и электрическое взаимодействие.

Гравитационное взаимодействие — это всегда притяжение, электрическое же взаимодействие проявляется как в притяжении, так и в отталкивании.

Сила электрического взаимодействия зависит от среды, чего мы не наблюдаем при взаимном тяготении тел.

Масса — неотъемлемое свойство любой частицы, но не каждая частица обладает электрическим зарядом.

Масса тела положительна, а электрический заряд может быть и положительным, и отрицательным.

Оба закона справедливы для точечных тел. Однако существенно, что закон всемирного тяготения применим также и для шарообразных тел любого радиуса, расположенных на любом малом расстоянии друг от друга (даже вплотную друг к другу), при условии, что плотность каждого из них во всех точках, равноотстоящих от центра, одинакова. При этом предполагается, что расстояние R , входящее в формулу закона всемирного тяготения, измеряется между центрами шаров. Это использовано при определении гравитационной постоянной с помощью прибора, в котором массивный шар весьма большого размера размещается на очень малом расстоянии от взаимодействующего с ним шарика.

То же можно отнести и к закону Кулона при условии, что во время взаимодействия электрические заряды шаров распределены по их поверхности равномерно. Однако практически это условие трудно осуществить, так как при электрическом взаимодействии двух заряженных проводящих шаров их электрические заряды, распределенные на поверхности шаров до взаимодействия равномерно, при взаимодействии смещаются и поверхностная

плотность заряда на разных участках поверхности шара оказывается различной.

Громадное различие в величине гравитационных и электрических сил — факт, заслуживающий особого внимания, тем более, что обычные наблюдения, доступные каждому, способны создавать превратное представление об этом различии. В самом деле, каждого поражают огромные силы, удерживающие небесные тела на их орбитах; да и в земных условиях необходимость в мощных подъемных сооружениях невольно внушает уважение к гравитационным взаимодействиям.

С другой стороны, если мы хотим (не упоминая силы упругости, трения и т. д., представляющие собой силы электромагнитного взаимодействия) показать действие электрических сил, мы прибегаем к опытам с притяжением и отталкиванием электрических маятников или наэлектризованных палочек. Эти опыты необходимы, но мы вынуждены довольствоваться в них наблюдением действия совершенно ничтожных сил. Кстати, едва ли эти опыты станут более впечатляющими, если мы заменим электрический маятник половой щеткой или железной трубой, как это иногда рекомендуют.

Сравнительная оценка гравитационных и электрических сил необходима. Такая оценка сделана в учебном пособии «Физика, 9», где сравниваются силы электрического и гравитационного притяжения электрона к ядру в атоме водорода. Но, по-видимому, на уроке этим нельзя ограничиться. Надо показать, что в обычно наблюдаемом нами взаимодействии заряженных тел проявляет себя лишь ничтожная доля имеющихся в теле заряженных частиц.

Здесь уместно вспомнить опыт с чувствительными весами, на которых была установлена зависимость, выражаемая законом Кулона. Зная расстояние между шариками и длины плеч, на которые действуют электрическая сила и сила тяжести рейтера, учащиеся могут определить порядок величины заряда на каждом шарике. Вычисления по этим данным дадут для заряда значение, близкое к 10^{-8} Кл, что равно заряду примерно 10^{11} электронов.

Если этот шарик изготовлен из алюминия, имеет радиус $r = 1$ см и толщину стенки $d = 0,5$ см, то площадь его поверхности $S = 4\pi r^2$, а объем стенки $V \approx 4\pi r^2 d$. По этим данным можно найти массу шарика $m = V\rho$. Следовательно, в нем содержится $\frac{m}{M}$ молей, или $\frac{m}{M} N_A$ атомов, или $\frac{m}{M} N_A n$ электронов.

Найдя по справочнику для алюминия плотность $\rho = 2,7$ г/см³, молярную массу $M = 27$ г/моль, атомный номер $n = 13$, определим число электронов в шарике:

$$\frac{4\pi r^2 d \rho N_A n}{M} = \frac{4 \cdot 3,14 \cdot 1 \text{ см}^2 \cdot 2,7 \cdot \frac{\text{г}}{\text{см}^3} \cdot 0,05 \text{ см} \cdot 6,02 \cdot 10^{23} \cdot \frac{1}{\text{моль}} \cdot 13}{27 \frac{\text{г}}{\text{моль}}} \approx 5 \cdot 10^{23}.$$

Легко подсчитать, что, добавив к шарiku 10^{11} электронов, число уже имеющихся в нем электронов увеличивается на ничтожную долю (10^{-12}). Этот подсчет показывает, что все окружающие нас тела представляют собой отлично сбалансированную совокупность огромного числа одинаковых по абсолютной величине положительных и отрицательных элементарных зарядов. При малейшем нарушении этого баланса ничтожная несбалансированная часть этих зарядов тотчас обнаруживает себя во взаимодействии заряженных тел.

§ 39. Электрическое поле и его силовая характеристика

Главное свойство электрического поля, которым оно заявляет о своем существовании, — способность действовать на электрические заряды с некоторой силой. Электрические заряды действуют друг на друга через свои электрические поля: из двух взаимодействующих зарядов первый заряд своим электрическим полем действует на второй заряд (находящийся в этом поле), а электрическое поле второго заряда с силой такой же величины, но противоположно направленной, действует на первый заряд.

В обычных условиях при наложении электрических полей последние не влияют друг на друга (значит, не взаимодействуют)¹ и действуют на внесенный в них заряд независимо друг от друга. При этом они образуют результирующее электрическое поле, напряженность которого в любой его точке равна геометрической сумме напряженностей каждого из полей.

При изучении понятия напряженности электрического поля учащиеся знакомятся с двумя формулами:

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q} \quad \text{и} \quad E = \frac{kq}{eR^2}.$$

Чтобы предупредить возможные ошибки, им необходимо дать некоторые дополнительные разъяснения.

Первая формула универсальна: она следует из определения напряженности. В ней q — пробный заряд, внесенный в некоторую точку любого исследуемого поля, а \vec{F} — действующая на него сила.

Вторая формула справедлива только для простейшего частного случая, когда поле образовано одним точечным зарядом или зарядом, равномерно распределенным по поверхности шара. Здесь q — заряд, образующий поле, а R — расстояние от заряда или от центра заряженного шара до той точки поля (за пределами шара), где требуется определить напряженность.

¹ Здесь не учитываются особые случаи нелинейной оптики, когда нарушается принцип суперпозиции.

Чтобы уточнить понятия «пробный заряд», «точечный заряд»; «единичный заряд», «напряженность», полезно рассмотреть такой пример.

Представим себе электрическое поле отрицательного заряда в $45 \cdot 10^{-9}$ Кл, распределенного по поверхности проводящего шара.

Числовое значение напряженности этого поля в вакууме в точке A (рис. 57), находящейся на расстоянии 15 см от центра шара, найдем по второй формуле:

$$E = \frac{kq}{eR^2}, \quad E = \frac{9 \cdot 10^9 \cdot 45 \cdot 10^{-9}}{15^2 \cdot 10^{-4}} \text{ Н/Кл} = 1,8 \cdot 10^4 \text{ Н/Кл}.$$

Предположим, что, желая экспериментально проверить полученный результат, в точку A внесли небольшой металлический шарик с положительным зарядом, например, $q = 2 \cdot 10^{-8}$ Кл и, измерив действующую на него электрическую силу, вычислили напряженность в точке A по формуле

$$E = \frac{F}{q}.$$

Если судить об относительных размерах и взаимном расположении шаров по рисунку 58, то можно заключить, что результат, полученный из этого опыта, не совпадет с полученным выше результатом.

В самом деле, во-первых, отдельные части пробного заряда, размещенные на поверхности шарика, испытывают действие поля не в точке A , а в разных точках и суммарная сила, действующая на шарик, не может характеризовать поле в точке A .

Во-вторых, при внесении пробного заряда в исследуемое поле заряды на обоих шарах вследствие взаимного притяжения сместились (рис. 58). Это привело к изменению исследуемого поля и значительному увеличению напряженности в точке A . Надо обратить внимание учащихся на то, что здесь идет речь не о результирующем поле

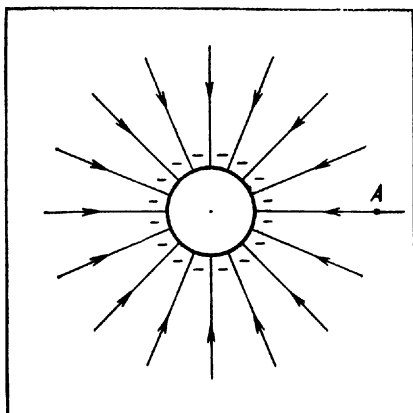


Рис. 57.

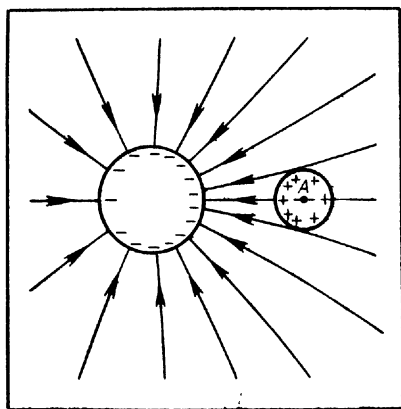


Рис. 58.

двух зарядов, а только об интересующем нас электрическом поле большого заряженного шара. Ведь на пробный заряд действует не результирующее поле, а поле, в которое он внесен.

Из рассмотрения этого примера можно сделать заключение, что пробный заряд, пригодный для исследования электрического поля, должен быть, во-первых, «точечным», т. е. размеры тела, на котором он находится, должны быть достаточно малыми по сравнению с расстоянием до источника поля, чтобы ими можно было пренебречь. Во-вторых, величина пробного заряда должна быть достаточно мала, чтобы можно было пренебречь вызываемым им смещением зарядов и искажением поля.

Чтобы в определении напряженности отразить все сказанное, его можно сформулировать так.

Напряженность поля в некоторой его точке равна отношению силы, действующей на точечный положительный заряд, к величине этого заряда, если он находится в рассматриваемой точке поля и настолько мал, что своим электрическим полем не смещает заряды, образовавшие исследуемое поле.

Изображение электрических полей с помощью силовых линий дает наглядное и правильное представление не только о направлении, но и о величине напряженности электрического поля любой сложности. Это необходимо подчеркнуть, воспользовавшись хотя бы таким примером.

Пусть мы хотим выяснить, в какой из двух точек A и B (рис. 59) напряженность электрического поля больше. Обе точки лежат на прямой, соединяющей два равных разноименных заряда, и находятся: точка A посередине между зарядами, точка B посередине между левым зарядом и точкой A .

Чтобы ответить на этот вопрос, можно выразить напряженность в каждой из точек через величины зарядов и соответствующие расстояния и убедиться, что напряженность в точке B больше, чем в точке A . Но к такому же заключению можно прийти, сравнивая густоту силовых линий (рис. 60) в областях, окружающих интересующие точки, и не прибегая к вычислениям.

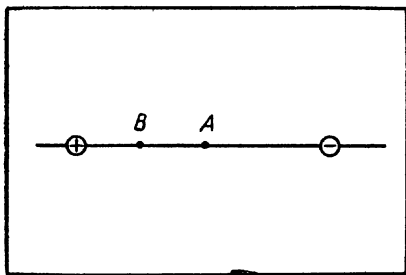


Рис. 59.

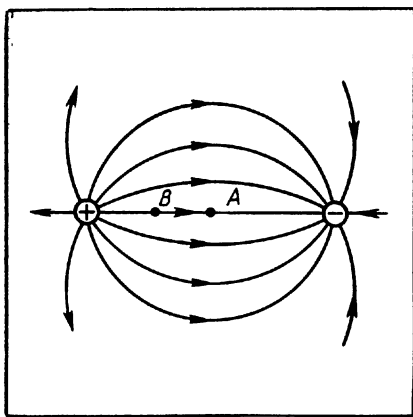


Рис. 60.

§ 40. Проводники в электрическом поле

Основная цель изучения этой темы — доказать и объяснить отсутствие заряда и электрического поля внутри заряженного проводника или проводника, помещенного в электрическое поле. В связи с этим учащимся сначала сообщают, что проводимость металлических проводников обусловлена существованием в них свободных электронов, а проводимость газов и растворов некоторых веществ (электролитов) — существованием в них ионов. Как электроны, так и ионы, оказавшись в электрическом поле и будучи свободными, продолжая свое тепловое хаотическое движение, начинают дрейфовать под действием сил электрического поля.

Необходимо обратить внимание учащихся на то, что перенос заряда под действием электрической силы надо отличать от движения заряженной частицы. Так, можно говорить о движении положительного и отрицательного зарядов не только в растворе электролита, где действительно перемещаются в противоположных направлениях и положительно и отрицательно заряженные ионы, но и в металлическом проводнике, где перемещаются только свободные электроны, а положительно заряженные частицы прочно удерживаются на своих местах. Например, зарядив металлический шар положительно и соединив его с землей (рис. 61), мы можем сказать, что положительный заряд шара ушел в землю или что свободные электроны из земли перешли на шар и своим отрицательным зарядом нейтрализовали его положительный заряд. Оба утверждения верны и употребительны.

Объяснение отсутствия электрического поля и заряда внутри проводника тем, что в последнем отсутствует электрический ток, вполне убедительно, если речь идет о сплошном проводнике. Отсутствие поля и заряда внутри полости, имеющейся в проводнике, целесообразно продемонстрировать на следующем опыте.

Заряжают металлический полый шар, установленный на изолирующей подставке, и маленьким металлическим шариком на изолирующей ручке пытаются маленькими порциями снимать с него заряд и передавать на стержень электроскопа. Эта попытка каждый раз удаётся в том случае, если касаются пробным шариком наружной поверхности заряженного шара. При этом листки электроскопа отклоняются все больше и больше по мере накопления на нем

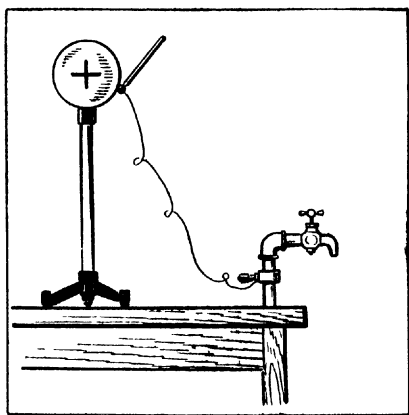


Рис. 61.

заряда. Если же касаются пробным шариком не наружной, а внутренней поверхности, внося его внутрь шара, то электроскоп остается незаряженным, сколько бы ни повторяли эту операцию. В связи с этим полезно выяснить, как будет вести себя свободный электрический заряд, если его поместить внутрь заряженного шара.

Так как внутри заряженного проводника, сплошного или полого, электрическое поле отсутствует, то из этого как будто бы следует, что на помещенную внутрь заряженного шара заряженную частицу электрические силы действовать не будут и она останется в той точке, куда ее поместили. Однако опыт показывает, что это не так. Свободный заряд немедленно выходит на поверхность проводника.

Объясняется это тем, что в реальных условиях любой заряд внутри шара, если он помещен не в центре его, обязательно своим электрическим полем вызовет смещение зарядов на поверхности. В результате этого поверхностный заряд создаст внутри шара электрическое поле, под действием которого помещенный внутрь заряд выйдет на поверхность. После перераспределения зарядов напряженность внутри шара во всех точках вновь станет равной нулю.

На этом явлении основан способ полной передачи заряда одного проводника другому. Это можно показать на следующем опыте. Ставят рядом два электроскопа с надетыми на них шарами и заряжают один из них. Поочередно прикасаясь пробным шариком к шарам электроскопов снаружи, замечают, что лепестки заряженного электроскопа постепенно опадают, а лепестки электроскопа, который был не заряжен, отклоняются все больше и больше. Однако это будет продолжаться лишь до тех пор, пока заряд не распределится между электроскопами поровну, а их лепестки будут отклонены одинаково.

Далее, изменяют способ передачи заряда: прикоснувшись пробным шариком снаружи к заряженному шару, вносят пробный шарик внутрь незаряженного шара и касаются его внутренней поверхности. Повторяя эту операцию, в конце концов по показаниям электроскопов замечают, что заряд с одного шара на другой перенесен почти полностью.

Описанный способ нашел практическое применение в генераторе Ван-де Граафа, с устройством которого полезно ознакомить учащихся.

В связи с рассмотрением вопроса о распределении заряда на поверхности проводника в зависимости от ее кривизны целесообразно продемонстрировать ряд опытов, описанных в пособии [ДЭ, II, опыт 3].

§ 41. Электростатическая защита

Одним из важных практических применений законов электростатики, с которым знакомятся учащиеся, является электростатическая защита чувствительных к электрическому полю приборов. Иногда она состоит в том, что такие приборы помещают внутрь замкнутого металлического экрана. На поверхности такого экрана внешнее электрическое поле индуцирует электрические заряды, которые своим электрическим полем полностью компенсируют поле внутри экрана, и таким образом защищает от действия поля помещенный внутри экрана прибор.

Не менее часто приходится экранировать не прибор, чувствительный к полю, а сам источник электрического поля, от нежелательного воздействия которого надо защитить многочисленные чувствительные устройства, расположенные поблизости. Казалось бы, что для этого достаточно источник электрического поля также окружить металлическим экраном. На самом деле это не так. Допустим, что, желая освободиться от действия электрического поля заряда q , последний поместили внутрь металлического экрана (рис. 62). Под действием сил электрического поля заряда q свободные электроны в стенках экрана придут в движение и будут накапливаться на внутренней поверхности, образуя индуцированный отрицательный заряд $-q'$. Одновременно на наружной поверхности образуется такой же величины положительный заряд $+q'$. Равновесие наступит, когда напряженность внутри стенки экрана в результате сложения полей станет равной нулю. При этом окажется, что вокруг экрана электрическое поле стало таким, каким оно было до установки экрана.

Как видно, таким способом цели пока не достигли. Однако достаточно соединить экран с землей и положительный заряд с внешней поверхности экрана уйдет в землю, электрическое поле

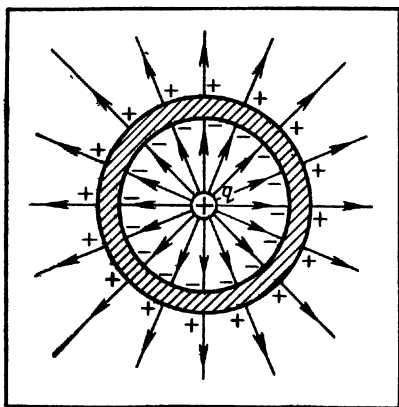


Рис. 62.

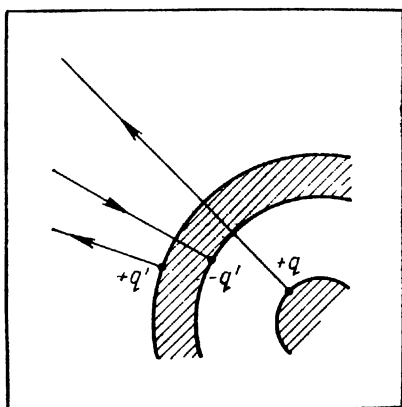


Рис. 63.

заряда q , как это и требовалось, теперь оказывается полностью заключенным внутри экрана.

Подробный разбор изложенного можно провести в такой последовательности.

1. Известно, что электрическое поле заряда, равномерно размещенного по поверхности сферы, внутри сферы отсутствует, а за ее пределами оно такое же, как если бы заряд находился в ее центре. Следовательно, за пределами экрана поле образовано тремя зарядами $+q' - q'$ и $+q'$ (рис. 63); в стенке экрана — зарядами $+q'$ и $-q'$; внутри экрана — зарядом $+q$.

Из закона сохранения заряда следует, что индуцированные заряды $+q'$ и $-q'$ равны по абсолютной величине. Значит, образованное ими поле за пределами экрана равно нулю; проявляет же себя за пределами экрана только поле заряда $+q$.

2. В стенке экрана, как внутри всякого проводника, поле отсутствует. Следовательно, напряженности полей, образованных в стенке экрана зарядами $+q$ и $-q'$, в каждой его точке равны и противоположны, а образовавшие их заряды равны по абсолютной величине.

3. После заземления заряд $+q'$ на наружной поверхности экрана нейтрализован пришедшими с земли электронами. Тогда поля зарядов $+q$ и $-q'$ вокруг экрана полностью компенсируют друг друга и электрическое поле оказывается сосредоточенным только внутри экрана между этими равными по величине зарядами.

§ 42. Работа в электрическом поле

Понятие потенциала наиболее трудное в электростатике и вместе с тем очень важное, так как является одним из отправных

понятий при переходе к изучению законов электрического тока. Несмотря на то что практический интерес представляет не потенциал точки поля, а разность потенциалов, учащимся все же дают понятие потенциала точки поля, созданного уединенным точечным зарядом (как понятие первичное), и приводят готовую формулу для вычисления потенциала. Элементарный вывод этой формулы (он приведен ниже) не прост. Однако его можно показать учащимся, но требовать запоминания не следует.

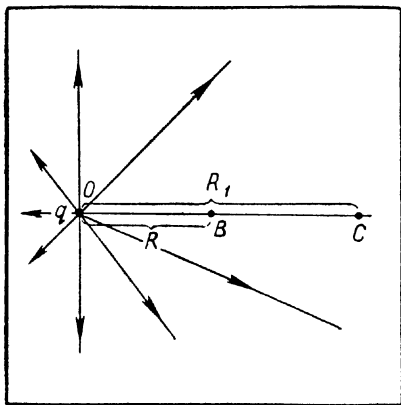


Рис. 64.

Представим себе точечный положительный заряд q , помещенный в точку O (рис. 64), и вычислим потенциал созданного им электрического поля в точке B , находящейся на расстоянии R от точки O . Он равен потенциальной энергии положительного заряда, равного единице и помещенного в точку B . Потенциальная же энергия заряда, помещенного в точку B , равна работе, которая может быть совершена полем при перемещении этого заряда из точки B в бесконечность.

Вычислить работу, просто умножив силу на перемещение, нельзя, так как перемещение в этом случае бесконечно велико, а сила по закону Кулона с увеличением расстояния убывает до нуля. Поэтому для вычисления работы можно воспользоваться следующим приемом.

Сначала вычисляют работу перемещения заряда q_1 на конечном участке BC в поле заряда q . Сила, действующая в начале этого участка,

$$F = \frac{kqq_1}{eR^2},$$

а в конце его

$$F_1 = \frac{kqq_1}{eR_1^2}.$$

Среднее значение сил F и F_1 (среднее геометрическое):

$$F_{\text{ср}} = \sqrt{FF_1}, \text{ или } F_{\text{ср}} = \frac{kqq_1}{eRR_1}.$$

Работа поля на участке BC равна:

$$A = F_{\text{ср}} (R_1 - R), \text{ или } A = \frac{kqq_1}{eR} - \frac{kqq_1}{eR_1}.$$

Если точка C находится на бесконечно большом расстоянии $R_1 = \infty$, то $\frac{kqq_1}{eR_1} = 0$, и работа, произведенная электрическим полем по перемещению заряда q_1 из точки B в бесконечность, равна:

$$A = \frac{kqq_1}{eR}.$$

Но потенциал точки B электрического поля равен работе поля по перемещению в бесконечность единицы заряда, помещенного в точку B :

$$\varphi_B = \frac{A}{q_1}.$$

В таком случае

$$\varphi_B = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 eR} \text{ (СИ) или } \varphi_B = \frac{q}{eR} \text{ (СГСЭ)}.$$

Как видно из формулы, знак потенциала определяется знаком заряда, образовавшего поле.

Если электрическое поле представляет собой результат наложения нескольких полей, то потенциал любой точки такого поля равен алгебраической сумме потенциалов, определенных в данной точке для каждого из полей в отдельности. Этим определится и знак потенциала для любой точки поля.

Для закрепления введенного понятия учащимся полезно выполнить такие упражнения.

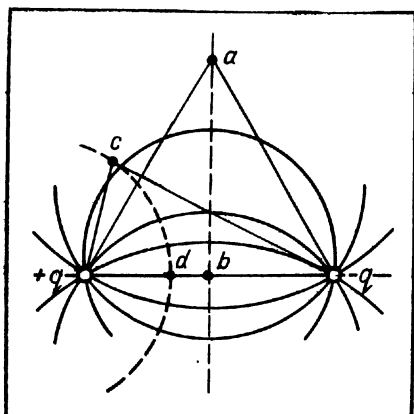


Рис. 65.

1. Изобразите с помощью силовых линий электрическое поле двух разноименных точечных зарядов $+q$ и $-q$.

2. Определите потенциалы точек a , b и c (рис. 65), если известно, что расстояние между зарядами $r=20$ см, точка a находится на расстоянии 20 см от каждого из зарядов, точка b — посередине между зарядами, а точка c — на расстоянии 10 см от одного заряда и 20 см от другого. Определите также, в какой точке на прямой, проходящей через оба заряда, потенциал равен потенциалу точки c .

Решение.

$$\varphi_a = \varphi'_a + \varphi''_a;$$

$$\varphi_a = \frac{q}{r} - \frac{q}{r} = 0;$$

$$\varphi_b = \varphi'_b + \varphi''_b; \quad \varphi_b = \frac{q}{r/2} - \frac{q}{r/2} = 0;$$

$$\varphi_c = \varphi'_c + \varphi''_c; \quad \varphi_c = \frac{q}{r/2} - \frac{q}{r} = 0,05 q.$$

$$\varphi_d = \varphi'_d + \varphi''_d; \quad \varphi_d = \frac{q}{x} - \frac{q}{r-x} = 0,05 q.$$

После преобразования и подстановки числовых данных получаем квадратное уравнение

$$0,05x^2 - 3x + 20 = 0$$

с корнями $x_1 = 7,6$ и $x_2 = 52,4$.

Полученный результат показывает, что на прямой, проходящей через заряды $+q$ и $-q$, имеется не одна, а две точки с потенциалами, равными потенциалу точки c . Одна из них — точка d находится на расстоянии 7,6 см от заряда $+q$; другая расположена слева от заряда $+q$ и на расстоянии 52,4 см от него.

3. Проведите эквипотенциальные линии (линии пересечения эквипотенциальных поверхностей плоскостью чертежа) через точки, указанные в п. 2.

Очевидно, что по полученным данным через точки a , b , c и d можно провести две эквипотенциальные линии. При их проведении надо следить, чтобы силовые и эквипотенциальные линии пересекались всюду под прямым углом.

Результаты выполнения трех рассмотренных упражнений дают богатый материал для продолжения исследования. Например, руководствуясь полученными результатами, можно продолжить нанесение эквипотенциальных линий (не прибегая к вычислению), выяс-

нить связь между густотой силовых линий и расстоянием между эквипотенциальными поверхностями и т. д.

§ 43. Решение задач по теме „Работа в электрическом поле“

Работа в электрическом поле вычисляется по известной из механики формуле:

$$A = Fs \cos \alpha,$$

и ее знак при любых знаках зарядов определяется только знаком косинуса. При этом надо различать работу поля и работу внешних сил. Если нет особых оговорок, под работой в электрическом поле подразумевается работа электрической силы.

В заключение изучения темы можно рекомендовать учащимся решить следующие задачи.

1. Частица, имеющая массу $m = 0,25$ г и заряд $q = +5$ ед. заряда СГСЭ, летит за пределами действия поля заряда $Q = +20$ ед. заряда СГСЭ со скоростью $v = 4$ см/с по направлению к заряду. Опишите ее движение и определите, на какое наименьшее расстояние она приблизится к заряду Q .

Решение. Приближаясь к заряду, частица испытывает тормозящее действие электрической силы отталкивания. Скорость частицы будет уменьшаться и в некоторой точке станет равной нулю. К этому моменту вся ее энергия движения

$$K = \frac{mv^2}{2}; \quad K = \frac{0,25 \cdot 16}{2}; \quad K = 2 \text{ эрг}$$

превратится в потенциальную энергию электрического взаимодействия:

$$\Pi = \varphi q, \text{ или } \Pi = \frac{Q}{R} q.$$

Но согласно закону сохранения энергии

$$\Pi = K \text{ или } \frac{Q}{R} q = 2 \text{ эрг,}$$

откуда

$$R = \frac{Qq}{\Pi};$$

т. е. частица приблизится к заряду Q на

$$R = \frac{20 \cdot 5}{2}, \quad R = 50 \text{ см}$$

и, остановившись, начнет удаляться от заряда.

2. Частица, масса которой $m = 0,25$ г и заряд $q = +5$ ед. заряда СГСЭ, двигаясь по кривой (рис. 66), пролетает через точку A со скоростью 10 см/с и достигает точки B , после чего начинает удаляться от заряда Q . Потенциалы точек $\varphi_A = 2$ эрг/ед. заряда СГСЭ, $\varphi_B = 4$ эрг/ед. заряда СГСЭ. Определите скорость частицы в точке B .

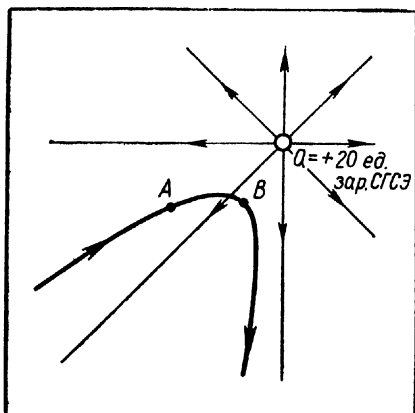


Рис. 66.

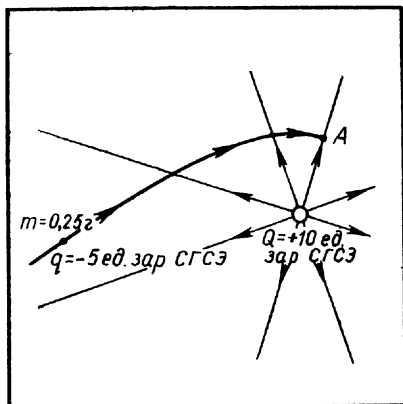


Рис. 67.

стоянии 8 см от заряда Q , сила, действующая на частицу со стороны поля, направлена перпендикулярно к вектору ее скорости?

Решение. На очень большом расстоянии от заряда Q потенциальная энергия частицы $\Pi = 0$, а кинетическая энергия

$$K_0 = \frac{mv_0^2}{2}; \quad K_0 = \frac{0,25 \cdot 16}{2}; \quad K_0 = 2 \text{ эрг.}$$

В точке A :

$$K_A = \frac{0,25 \cdot v_A^2}{2} = 0,125 \cdot v_A^2;$$

$$\Pi_A = \varphi_A q; \quad \Pi_A = \frac{10}{8} \cdot (-5); \quad \Pi_A = -6,25 \text{ эрг.}$$

Решение. Полная энергия частицы в любой точке поля:

$$K + \Pi = \frac{mv^2}{2} + \varphi q.$$

В точке A :

$$K_A + \Pi_A = \frac{0,25 \cdot 100}{2} + 2 \cdot 5;$$

$$K_A + \Pi_A = 22,5 \text{ эрг.}$$

В точке B :

$$K_B + \Pi_B = \frac{0,25 \cdot v_B^2}{2} + 4 \cdot 5.$$

По закону сохранения энергии

$$K_A + \Pi_A = K_B + \Pi_B, \text{ или}$$

$$\frac{0,25 \cdot v_B^2}{2} + 4 \cdot 5 = 22,5,$$

откуда

$$v_B = \sqrt{\frac{(22,5 - 20) \cdot 2}{0,25}};$$

$$v_B \approx 4,5 \text{ см/с.}$$

3. Траектория частицы, масса которой $m = 0,25 \text{ г}$ и заряд $q = -5 \text{ ед. заряда СГСЭ}$, летевшей со скоростью 4 см/с (рис. 67), искривляется притяжением заряда $Q = +10 \text{ ед. заряда СГСЭ}$. Пролетит частица мимо заряда или будет притянута им, если в точке A , находящейся на рас-

Согласно закону сохранения энергии

$$K_A + \Pi_A = K_0 + \Pi_0, \text{ или } 0,125 \cdot v_A^2 - 6,25 = 2,$$

откуда

$$v_A = \sqrt{\frac{2+6,25}{0,125}}; \quad v_A \approx 8 \text{ см/с.}$$

Чтобы при такой скорости удержать частицу на окружности радиуса R , нужна сила

$$F = \frac{mv^2}{R}, \text{ или } F = \frac{0,25 \cdot 8^2}{8};$$

$$F = 2 \text{ дин.}$$

Но сила электростатического притяжения частицы с зарядом Q равна:

$$F_{эл} = \frac{Qq}{R^2}; \quad F_{эл} = \frac{10 \cdot (-5)}{64}; \quad F_{эл} \approx -0,78 \text{ дин.}$$

Как видно, эта сила не сможет удержать частицу на окружности, а тем более притянуть ее. Частица, обогнув заряд Q , удалится по искривленной траектории за пределы действия поля; а ее скорость уменьшится до прежней величины 4 см/с.

§ 44. Емкость. Конденсаторы

Изучение электростатики завершается знакомством учащихся с элементами теории конденсатора, с его устройством и отчасти с применением конденсаторов различного типа. При изучении этого прибора учащиеся встречаются со всеми важнейшими понятиями электростатики. Поэтому само изучение конденсатора дает возможность повторить почти все содержание главы.

Вывод формулы энергии заряженного конденсатора возвращает учащихся к важному вопросу о материальности электрического поля. В самом деле, в полученной формуле энергия выражена через величины, характеризующие только электрическое поле; никаких данных о конденсаторе в этой формуле не содержится. Следовательно, носителем энергии является электрическое поле независимо от зарядов, с которыми оно связано. Этим еще раз подтверждается материальность электрического поля.

Конденсатор — один из немногих технических приборов, изучаемых в электростатике. Он имеет широчайшее применение в электротехнике. Кроме того, знание устройства и действия конденсатора учащимся будет необходимо при изучении курса физики X класса. Поэтому изучению конденсатора следует уделить достаточное внимание.

Учащиеся легче усваивают понятие емкости, если при проведении опытов сравнивать наблюдаемые явления с знакомыми аналогичными явлениями иной природы. Наиболее близким анало-

гом процесса зарядки проводника можно считать наполнение жидкостью сосуда с поперечным сечением, постоянным по всей высоте.

При введении понятия электроемкости необходимо поставить ряд опытов, на которых надо показать неодинаковое изменение потенциала двух изолированных проводников различного размера при сообщении им равных зарядов и продемонстрировать далее, что для получения равных потенциалов этим проводникам требуются неодинаковые заряды. Эти опыты можно проводить с одинаковым успехом как с положительными зарядами, так и с отрицательными. Все же, если учесть, что электромметр не показывает знака потенциала, лучше пользоваться положительными зарядами. Это удобнее, так как при положительных зарядах увеличение угла отклонения стрелки электромметра всегда будет означать повышение потенциала, а не наоборот.

Перед опытами учащиеся должны убедиться в одинаковой чувствительности двух электромметров. Для этого корпуса электромметров заземляют, а стержни соединяют проводником и заряжают от наэлектризованной палочки. У исправных электромметров стрелки при этом отклонятся одинаково. Затем стержни электромметров разъединяют, надевают на них шаровые кондукторы — большой и малый — и приступают к опытам.

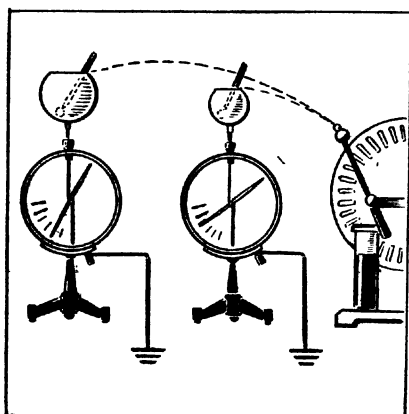


Рис. 68.

1. Зарядив банки электрофорной машины, быстро переносят с одной из банок на каждый из шаров равное количество положительного электричества с помощью пробного шарика на изолирующей ручке, как показано на рисунке 68. (Чтобы меньше сказывалась утечка заряда, лучше заряжать сначала большой шар, а затем малый.)

По показаниям электромметров заключают, что потенциал малого шара с каждой порцией перенесенного заряда увеличился быстрее и достиг большей величины, чем у большого. Это происходит подобно тому, как уровень жидкости в узком цилиндрическом сосуда (рис. 69) повышается быстрее и достигает большей высоты, чем в широком, при наливании в них одинакового количества жидкости.

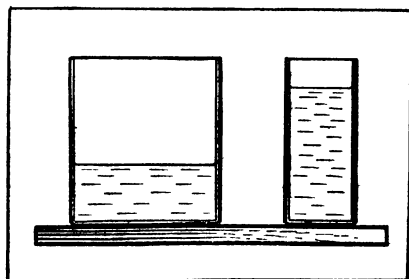


Рис. 69.

2. Заряженные шары соединяют проводником. По показаниям электрометров видно, что потенциалы шаров стали равными. Как же теперь перераспределились заряды? В предыдущем опыте шарам были сообщены равные заряды. После соединения происходило перемещение положительного заряда в сторону понижения потенциала, т. е. от малого шара к большому, пока потенциалы не выровнялись. Следовательно, теперь на шарах заряды не равны; у большого шара заряд больше, чем у малого.

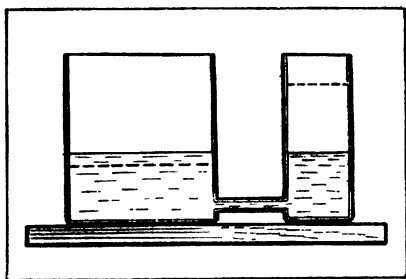


Рис. 70.

Это аналогично явлению, которое происходит при соединении двух сосудов с различным поперечным сечением, в которых уровни жидкости сначала находятся на разной высоте, а затем при соединении выравниваются (рис. 70).

Проведенные опыты показывают, что у каждого проводника потенциал изменяется пропорционально заряду, а отношение заряда к потенциалу $\frac{q}{\varphi}$ для данного проводника — величина постоянная, зависящая от его размеров и форм и называемая емкостью проводника:

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

В каждом из сосудов высота уровня изменяется пропорционально объему налитой жидкости, но отношение объема жидкости к высоте также есть величина постоянная, характеризующая свойство сосуда — его емкость и равная площади его поперечного сечения:

$$S = \frac{V}{h}.$$

Учащиеся не впервые встречаются с аналогиями и понимают, что любая аналогия имеет границы. В данном случае, продолжая опыты, мы подходим к такой границе.

3. Присоединив к одному из электрометров вместо шара металлический диск, заряжают его так же, как и в первом опыте, и еще раз наблюдают,

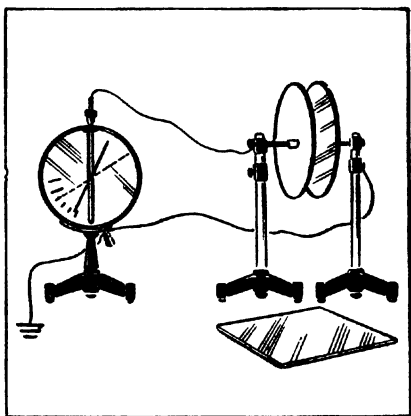


Рис. 71.

что с увеличением заряда на диске пропорционально увеличивается и его потенциал. Далее берут второй диск, заземляют его и, расположив параллельно первому диску, уменьшают расстояние между дисками (рис. 71). При этом стрелка электрометра показывает уменьшение потенциала.

Сблизив диски до расстояния, немного превышающего толщину имеющейся пластины из диэлектрика, вставляют ее в зазор между дисками. Электрометр вновь показывает еще большее уменьшение потенциала. При удалении пластины потенциал восстанавливается до прежней величины.

Этот опыт показывает, что электроемкость зависит не только от размеров и формы проводника. Она увеличивается при приближении другого проводника, а также при увеличении диэлектрической проницаемости среды.

Два диска с пластиной из диэлектрика представляют собой плоский конденсатор. После установления единиц электроемкости и вывода формулы конденсатора следует вычислить (приблизленно) электроемкость данного конденсатора. Для этого надо определить на глаз диаметр диска (25 см) и толщину пластины из диэлектрика (3 мм). Диэлектрическая проницаемость органического стекла, из которого состоит пластина, $\epsilon = 3$. По этим данным электроемкость школьного разборного конденсатора приблизительно равна 400 пФ.

4. Для ознакомления с конденсатором переменной емкости учащимся сначала надо показать демонстрационный детекторный радиоприемник, в котором на вертикальной панели укреплен конденсатор переменной емкости, входящий в состав колебательного контура. Расстояние между пластинами этого конденсатора очень мало, и при напряжениях, которые удобно измерять демонстрационным электрометром, напряженность электрического поля между пластинами оказывается достаточной, чтобы слой воздуха между ними был пробит. Поэтому для проведения опытов следует воспользоваться демонстрационным конденсатором переменной емкости, имеющим значительно большие размеры.

Для демонстрации действия конденсатора переменной емкости подвижные пластины конденсатора соединяют с корпусом электрометра, а неподвижные — со стержнем. Затем устанавливают подвижные пластины в среднее положение и неподвижной системе пластин сообщают заряд с помощью наэлектризованной палочки. Поворачивая ручку конденсатора, обращают внимание учащихся на изменение показаний электрометра и делают соответствующие выводы о зависимости величины электроемкости от относительного положения подвижных и неподвижных пластин.

5. Бумажные и электролитические конденсаторы лучше всего раздать учащимся на руки по одному комплекту на звено из двух человек. Раздаточный материал представляет собой два бумажных и два электролитических конденсатора, уложенных в небольшую коробку. В каждой паре одинаковых конденсаторов один должен

быть вскрыт. Учащимся дают две-три минуты, чтобы они рассмотрели устройство конденсаторов и переписали в тетрадь величины их емкости и рабочего напряжения.

После уборки раздаточного материала надо сделать необходимые разъяснения относительно устройства конденсаторов и значения указанных на их корпусе данных.

6. В число работ физического практикума IX класса желательно включить работу по определению электроемкости батареи конденсаторов. Подготовку к работе целесообразно провести в связи с изучением конденсаторов. Учащимся надо показать, как протекает заряд и разряд конденсатора, и представить этот процесс на графике. При проведении этого опыта становится понятным один из способов определения электроемкости конденсатора.

Для демонстрации надо воспользоваться демонстрационной батареей конденсаторов, включенной на ее полную емкость 60 мкФ, гальванометром от демонстрационного амперметра, переменным резистором с полным сопротивлением 1 МОм, выпрямителем с регулятором напряжения от 0 до 250 В и однополюсным переключателем. Установку для демонстрации надо подготовить и наладить заранее (перед уроком).

Перед сборкой электрической цепи ручку регулятора на выпрямителе ставят на минимальное напряжение, а сопротивление переменного резистора увеличивают до предельной величины. Затем составляют электрическую цепь по схеме, представленной на рисунке 72, и приступают к регулированию установки. Для этого временно замыкают проводником зажимы батареи конденсаторов и включают ток. Увеличивая постепенно напряжение на зажимах выпрямителя, доводят силу тока до величины, соответствующей отклонению стрелки гальванометра от нуля посредине шкалы до крайнего деления. На шкале гальванометра указана его чувствительность: $4,3 \cdot 10^{-5}$ А/дел. Следовательно, максимальное показание гальванометра соответствует

$$I = 4,3 \cdot 10^{-5} \text{ А/дел} \cdot 5 \text{ дел} = 21,5 \cdot 10^{-5} \text{ А}.$$

После этого с зажимов батареи конденсаторов снимают закорачивающий ее проводник, и установка готова для опыта.

Показав учащимся собранную установку, включают батарею конденсаторов на заряд. Учащиеся наблюдают отброс стрелки до края шкалы и сначала довольно быстрое, а потом все более медленное возвращение ее к нулю. Процесс заряда так же, как и разряда, длится около 180 с.

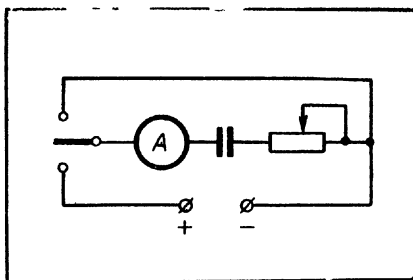


Рис. 72.

Повторив опыт несколько раз, надо разъяснить наблюдаемый процесс. Когда переключатель находится в верхнем положении (рис. 72), обе обкладки конденсатора имеют потенциал, одинаковый с отрицательным зажимом источника. При переводе переключателя в нижнее положение электроны с левой обкладки начнут перемещаться к положительному зажиму и она зарядится положительно. Одновременно электроны правой обкладки перейдут на ее внутреннюю поверхность, а левый конец резистора зарядится положительно. На концах резистора возникнет разность потенциалов, вследствие чего через него пойдет электрический ток. По мере передвижения электронов с отрицательного зажима через резистор к правой обкладке электроны с левой обкладки будут переходить к положительному зажиму. Ток будет идти, пока потенциалы каждой обкладки и соединенного с нею зажима источника не станут равными. Объяснение процесса разряда конденсатора можно предоставить самим учащимся.

Следующий этап опыта — построение графика зависимости силы разрядного тока от времени. Для этого настраивают метроном на 120 ударов в минуту и в момент начала отсчета времени включают установку на заряд или разряд конденсатора. Громко отсчитывая целые секунды, надо фиксировать моменты времени, соответствующие целому числу делений по шкале гальванометра. Лучше всего, если учитель включает установку и громко отсчитывает секунды, а учащиеся записывают время в моменты, когда стрелка гальванометра проходит через деление шкалы.

Результаты опыта на установке с приведенными выше данными показаны на рисунке 73.

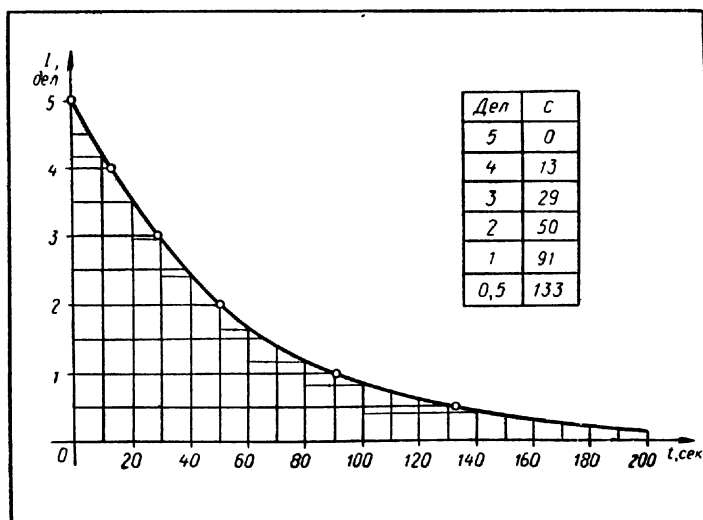


Рис. 73.

Вычертить график учащимся можно предоставить самостоятельно. Далее с помощью графика они могут определить заряд конденсатора, численно равный площади, ограниченной графиком и координатными осями. Пусть 0,5 см на оси ординат соответствует $0,4 \cdot 4,3 \cdot 10^{-5}$ А, а 0,5 см на оси абсцисс — 10 с. Тогда одна клетка полученной фигуры будет соответствовать заряду

$$0,4 \cdot 4,3 \cdot 10^{-5} \text{ А} \cdot 10 \text{ с} \approx 17 \cdot 10^{-5} \text{ Кл.}$$

Подсчитав число клеток (55) и умножив его на значение одной клетки, учащиеся найдут заряд конденсатора:

$$q = 17 \cdot 10^{-5} \text{ Кл.} \cdot 55 \approx 9,4 \cdot 10^{-3} \text{ Кл.}$$

Так как в школе, к сожалению, пока нет подходящего демонстрационного вольтметра, напряжение, до которого была заряжена батарея конденсаторов, можно измерить авометром и результат сообщить учащимся. В описанном опыте батарея заряжалась до 215 В. По этим данным можно определить электроемкость батареи:

$$C = \frac{q}{U}; \quad C = \frac{9,4 \cdot 10^{-3} \text{ Кл}}{215 \text{ В}} = 4,4 \cdot 10^{-5} \text{ Ф.}$$

Подобное исследование надо предложить учащимся в предстоящем практикуме в качестве самостоятельной работы с более совершенными измерительными приборами.

7. Вопрос о том, до какого предела можно накапливать заряд в конденсаторе, полезно рассмотреть, сравнивая конденсатор с двумя сообщающимися сосудами (рис. 74). Очевидно, в зависимости от устройства сообщающихся сосудов воду из одного сосуда в другой можно перекачивать: а) пока от чрезмерного давления не разрушится перегородка между сосудами, или б) пока вода не станет переливаться через край перегородки обратно в правый сосуд, или в) пока не иссякнет вода в правом сосуде.

Подобно этому, конденсатор можно заряжать: а) до тех пор, пока напряженность электрического поля между обкладками конденсатора не достигнет величины, при которой происходит разрушение (пробой) диэлектрика и конденсатор разрядится (в конденсаторах воздушных или с жидким диэлектриком работоспособность после этого восстанавливается; бумажные конденсаторы с пропиткой парафином приходят в негодность); б) пока напряжен-

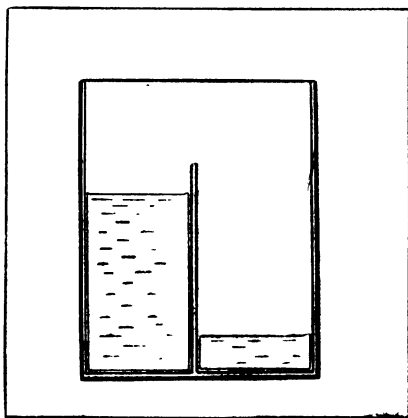


Рис. 74.

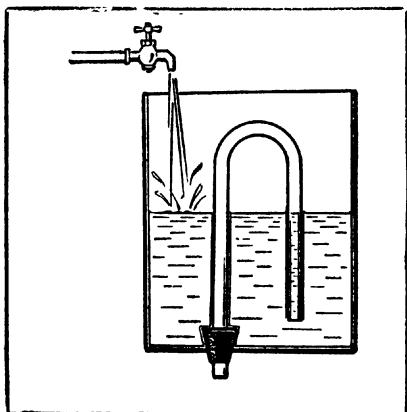


Рис. 75.

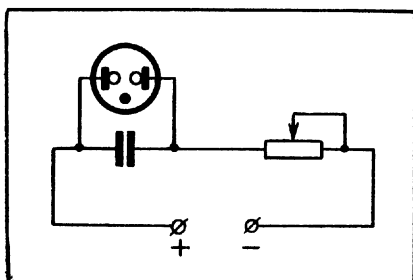


Рис. 76.

изображенное на рисунке 75, действует следующим образом. При постепенном наполнении сосуда жидкость сначала заполняет правое колено трубки сифона. Когда она перельется в левое колено, сифон быстро опорожняет сосуд, после чего весь процесс повторяется.

Аналогичные явления надо показать на следующих двух опытах. Замкнув металлическую перемычку, находящуюся на основании электрофорной машины между конденсаторами, сближают шарики разрядника до расстояния 1—2 см и приводят диски в движение. Между шариками начинает проскакивать искра. Если шарики немного раздвинуть, искра становится мощнее, но проскакивает реже. Если конденсаторы отключить, сняв перемычку между ними, то искровой разряд становится частым и слабым. Сравнивая наблюдаемые явления с действием жидкостного дозатора, учащиеся легко сумеют их объяснить.

Для второго опыта собирают установку по схеме, изображенной на рисунке 76. Она состоит из выпрямителя с напряжением, регулируемым в пределах от 0 до 250 В, батареи конденсаторов, резистора с переменным сопротивлением до 1 МОм и сигнальной

ность электрического поля, выходящего за края обкладок, не достигнет величины, при которой воздух становится проводящим (в этом случае из-за утечки заряда через воздух дальнейшая подзарядка конденсатора не увеличивает напряжения на его обкладках; это наблюдается во время работы электрофорной машины при далеко разведенных шариках кондукторов); по аналогии с сообщающимися сосудами пределом переноса заряда с одной обкладки на другую следует считать запас электронов на отрицательной обкладке. Однако этот предел практически недостижим, так как задолго до того, как исчерпается этот запас, разряд произойдет по одной из причин, указанных выше.

8. Представляет интерес автоматический действующий сифон, применяемый в дозаторах, периодически отмеривающих жидкость равными порциями. Это несложное устройство,

неоновой лампочки на 127 или 220 В. При постепенном увеличении напряжения на выпрямителе лампочка начинает периодически вспыхивать. Изменяя напряжение, сопротивление резистора и емкость батареи конденсаторов, можно в больших пределах изменять яркость и частоту вспышек. Учащимся надо предложить объяснить действие всей установки в целом и воздействие каждого из ее органов управления на поведение лампочки. Эта задача также облегчается сравнением действия описанной установки с действием жидкостного дозатора.

§ 45. Энергия заряженного конденсатора

При выводе формулы энергии заряженного конденсатора

$$\Pi = \frac{qU}{2}$$

полезны некоторые дополнительные разъяснения в связи с появлением в знаменателе формулы числа 2. Это как будто бы противоречит формуле

$$\Pi = qU,$$

выражающей энергию, которая требуется для перемещения заряда q в электрическом поле на участке с разностью потенциалов U .

Учащимся надо разъяснить, что выражение $\Pi = qU$ справедливо при условии, когда при перемещении заряда q из одной точки поля в другую разность потенциалов в этих точках не изменяется. Такой процесс переноса заряда можно представить графически в виде горизонтальной прямой (рис. 77). Энергия, необходимая для перемещения заряда, выразится площадью заштрихованного на рисунке прямоугольника, равной произведению qU .

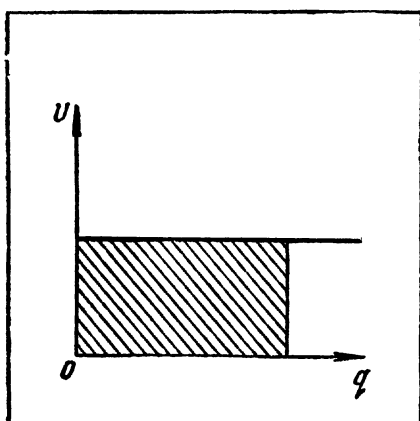


Рис. 77.

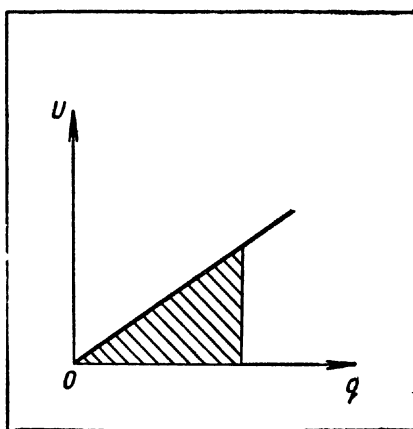


Рис. 78.

При зарядке незаряженного конденсатора в начале зарядки напряжение на его обкладках равно нулю. Однако по мере накопления заряда напряжение увеличивается прямо пропорционально заряду, как показано на рисунке 78, где линия графика — наклонная прямая, проходящая через начало координат. И в этом случае энергия, затраченная на зарядку конденсатора, выразится площадью фигуры, ограниченной линией графика и координатами. Но теперь это треугольник и его площадь при надлежащем выборе масштаба равна $\frac{qU}{2}$.

Зависимость энергии заряженного конденсатора от его емкости и напряжения выражается формулой

$$\Pi = \frac{CU^2}{2}.$$

Эту зависимость следует показать на опыте, описанном в пособии [ДЭ, II, опыт 13].

Конденсатор — прибор, заслуживающий самого детального изучения, какое только возможно, если основываться на знаниях, полученных учащимися в VII классе и при изучении электростатики. Однако на этом этапе возможности для ознакомления с практическими применениями конденсатора ограничены. О некоторых применениях учащиеся прочтут в учебнике, о других должен рассказать учитель. Это прежде всего лейденские банки. Они в настоящее время сохранили лишь историческое значение. Однако благодаря большой электрической прочности, они дают возможность наблюдать мощные искровые разряды — грозовые разряды в миниатюре. Описанная выше релаксационная установка имеет применение в устройствах автоматики, где требуется получение периодических импульсов тока. В дальнейшем учащимся придется встретиться с многочисленными применениями конденсатора в цепях переменного тока, в колебательных контурах, в фильтрах для сглаживания пульсации, в искрогасящих устройствах. Так же как и для зажигания лампы-вспышки, конденсатор может служить для питания счетчика ионизирующих излучений. Учащиеся легко разберутся в действии всех этих устройств, если изучению конденсатора при прохождении электростатики было уделено должное внимание.

Глава X

ЗАКОНЫ ПОСТОЯННОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА

§ 46. Введение

Некоторые понятия, формируемые в данной теме, уже частично были рассмотрены в теме «Электрическое поле» — это понятия разности потенциалов и напряжения. При изучении электрическо-

го поля, в котором действуют только кулоновские силы, разность потенциалов совпадает с напряжением ($\varphi_1 - \varphi_2 = U$). Последнее, вообще говоря, представляет собой более широкое понятие и измеряется работой всех сил, действующих на данном участке, по перемещению единицы положительного заряда. Если на участке цепи, кроме электростатических сил, действуют еще и неэлектростатические (сторонние), то напряжение на этом участке складывается из работы как электростатических, так и сторонних сил:

$$U = \mathcal{E} + (\varphi_1 - \varphi_2). \quad (1)$$

Различие между напряжением и разностью потенциалов, таким образом, необходимо учитывать в том случае, если на участке цепи имеется источник э. д. с.

Но в программу курса физики IX класса не входит вопрос о законе Ома для участка цепи, содержащего э. д. с. А для участка цепи, не содержащего э.д.с., выражение (1) принимает вид:

$$U = \varphi_1 - \varphi_2. \quad (2)$$

Следовательно, понятие разности потенциалов в данном случае совпадает с более общим понятием напряжения. Отсюда следует, что в отличие от темы «Электрическое поле», где всегда можно пользоваться понятием «разность потенциалов», в теме «Законы постоянного тока» это понятие можно использовать не всегда. Целесообразно поэтому пользоваться понятием «напряжение», которое применимо во всех случаях и к любым участкам цепи. В частности, этим понятием следует пользоваться и при определении работы тока.

При изучении темы «Электрическое поле» была получена формула для работы электростатических сил при перемещении электрического заряда из точки 1 в точку 2:

$$A = -q(\varphi_2 - \varphi_1) = -q\Delta\varphi. \quad (3)$$

Так как напряжение для электростатического, а также стационарного электрического поля равно разности потенциалов ($U = \varphi_1 - \varphi_2$), то формула (3) может быть записана следующим образом:

$$A = Uq.$$

Необходимо иметь в виду, что сила тока, напряжение и э.д.с. — величины алгебраические, они могут быть как положительными, так и отрицательными, в зависимости от выбора направления обхода контура тока. В случае совпадения направления тока с выбранным положительным направлением обхода цепи сила тока положительна. Э.д.с. источника положительна, если с выбранным направлением обхода контура внутри источника совпадает направление от отрицательного полюса к положительному (т. е. совпадает с направлением сторонних сил в источнике). Напряжение между точками ($U_{1,2}$) считают положительным, если направление от точки 1 к точке 2 совпадает с выбранным направлением обхода контура.

Положительный и отрицательный знаки силы тока, напряжения и э.д.с. необходимо учитывать при изучении правил Кирхгофа, а также при рассмотрении закона Ома для участка цепи, содержащего э.д.с. Но эти вопросы в средней школе не изучают. В большинстве же случаев, рассматриваемых в школе, имеют дело с положительными значениями этих величин, так как обычно имеют в виду, что направление обхода контура — это направление во внешней цепи от положительного полюса источника к отрицательному.

Необходимо иметь в виду, что ряд вопросов темы, хотя и изучали учащиеся в VII классе (закономерности параллельного и последовательного соединения проводников), не могли быть усвоены ими там достаточно прочно. Тем более, что в VII классе рассматривались наиболее простые случаи соединения проводников. Поэтому необходимо воспользоваться возможностью повторить в IX классе эти вопросы на более высоком уровне, в связи с решением задач на закон Ома для полной цепи.

§ 47. Условия существования тока

Содержание темы тесно связано со знаниями, полученными в VII классе. Но многие сформированные там понятия и закономерности должны получить дальнейшее развитие и углубление. Это относится, в частности, к вопросу об условиях существования тока в проводниках.

Учащиеся знают, что для длительного существования тока в проводнике в нем должно поддерживаться электрическое поле. Надо напомнить, что заряженные частицы при своем упорядоченном движении сталкиваются с ионами, молекулами или атомами проводника и теряют при этом часть своей энергии. Поэтому для их непрерывного движения необходимо, чтобы на них все время действовали силы, т. е. чтобы в проводнике все время существовало электрическое поле.

К обоснованию роли источника тока для поддержания поля в проводнике можно подойти от следующих опытов.

Берут два электрометра и заряжают один из них до некоторого положительного потенциала φ_1 . При соединении этих электрометров проводниками, между которыми в качестве индикатора включена неоновая лампочка (рис. 79), можно видеть по ее вспышке, что по ней протекал кратковременный ток. Электрометры при этом оказываются заряженными до одного и того же потенциала φ_2 .

Опыт показывает, что ток в проводнике идет только тогда, когда между его концами существует разность потенциалов или напряжение $U = \varphi_1 - \varphi_2$. Следовательно, для длительного существования тока в проводнике необходимо столько же времени поддерживать напряжение между его концами, т. е. поддерживать

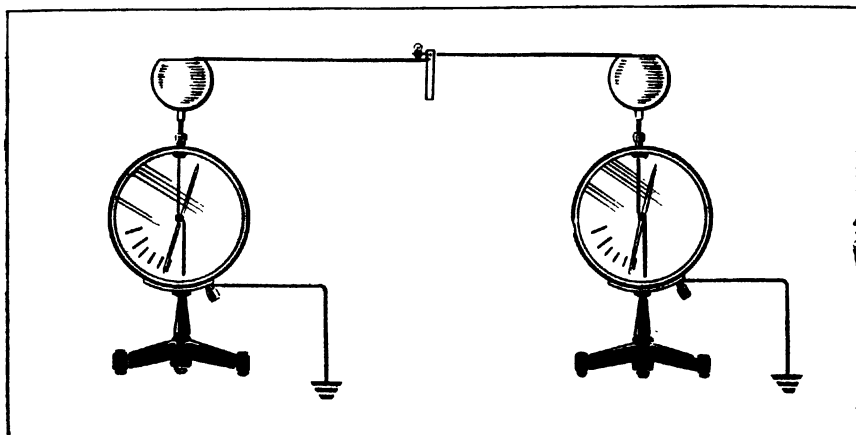


Рис. 79.

в нем электрическое поле. Более длительный ток можно показать на опыте с разрядкой конденсатора (см. стр. 121).

Условие существования тока в проводнике можно разъяснить с помощью гидродинамической модели (рис. 80). Если открыть кран, соединяющий два сосуда, в которые налита вода до разных уровней, то начнется перетекание ее из одного сосуда в другой («ток» воды). Оно прекратится тогда, когда уровни воды в сосудах станут одинаковыми. Для того чтобы движение воды было длительным, необходимо воду из сосуда, в который она наливается, переносить в сосуд, из которого она вытекает под действием силы тяжести. Такой перенос воды не может быть осуществлен силой тяжести. Для этого необходимо действие силы иной природы.

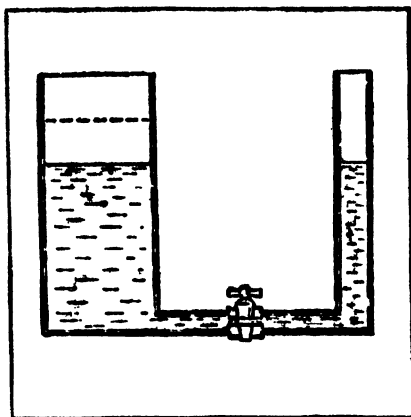


Рис. 80.

В опыте с электрометрами поддерживать постоянной разность потенциалов можно было бы, перенося каким-то способом положительный заряд со второго электрометра снова на первый. Поясняя учащимся, что переносимый заряд при этом будет испытывать электростатическую силу отталкивания от заряда первого электрометра, обосновывают тем самым необходимость действия сил, направленных в сторону, противоположную силе отталкивания одноименных зарядов, т. е. действие неэлектростатической (сторонней) силы. Эта сила должна совершать работу, за счет которой и под-

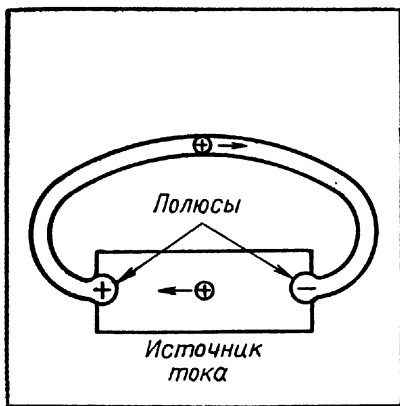


Рис. 81.

держивается разность потенциалов между электрометрами. Такую работу обычно совершают силы, действующие внутри источника тока.

Необходимо обратить внимание учащихся на направление движения зарядов в проводнике, присоединенном к полюсам источника тока (внешняя часть цепи), и в самом источнике между его полюсами (внутренняя часть цепи). Движение положительных зарядов внутри источника к положительному полюсу, т. е. в сторону, противоположную направлению их

движения во внешней цепи (рис. 81), объясняют действием сторонних сил.

Таким образом, роль сторонних сил, действующих в источнике, сводится к созданию электростатического поля между его полюсами, благодаря чему заряды движутся по внешней цепи.

Для объяснения роли источника тока можно продолжить гидродинамическую аналогию между электрическим током в цепи и током воды в системе труб.

Если кольцеобразную трубу, заполненную водой, привести во вращение и потом остановить, то некоторое время вода будет продолжать двигаться по трубе. Однако из-за трения это движение быстро прекратится. Движение воды можно сделать сколь угодно продолжительным, если в кольцеобразную трубу включить насос, работа которого возместит потери энергии на трение.

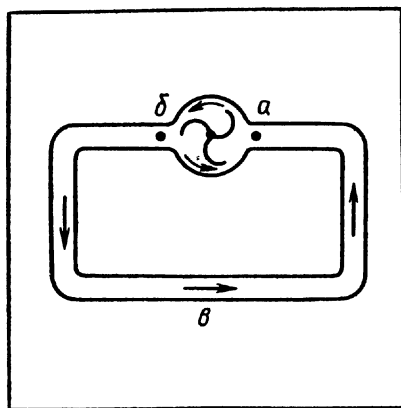


Рис. 82.

В этом случае при работе насоса (рис. 82) вода приходит в движение в направлении, указанном стрелками. Очевидно, что в местах соединения насоса с трубами (точки *а* и *б*) создается разность давлений. Вода движется в направлении *бв* потому, что давление в точке *б* больше, чем в точке *а*. Так как в точке *а* вода не накапливается, то ток воды продолжается внутри насоса от *а* к *б*.

Итак, по трубам (внешняя часть цепи) вода течет благодаря разности давлений, внутри же насоса она движется от

точки, где давление меньше, к точке с более высоким давлением. Следовательно, движение воды внутри насоса вызывается не разностью давлений, а упругими силами, действующими со стороны лопастей насоса, которые деформируются при проталкивании воды.

Сравнивая движение зарядов в электрической цепи с движением воды в замкнутой системе труб, легко пояснить учащимся, что источник тока выполняет ту же роль, что и насос. Так же как без работы насоса не могла бы поддерживаться разность давлений в точках *a* и *b*, без работы, совершаемой в источнике тока, замкнутом на внешнюю цепь, не может длительно поддерживаться разность потенциалов на его полюсах. Полюса источника аналогичны точкам *a* и *b*, в которых создается разность давлений.

Кроме гидродинамической аналогии, которую можно объяснить с помощью рисунка, полезно поставить опыт на механической модели электрической цепи (рис. 83).

По винтовой наклонной дорожке *abv* под действием силы тяжести скатывается шарик. (Аналогично этому движутся электрические заряды в проводнике под действием электростатического поля.) Если бы шарик не испытывал трения при своем движении, то его кинетическая энергия у подножия дорожки была бы равна потенциальной энергии у ее вершины и за счет этой энергии он мог бы подняться к вершине дорожки по участку *va*, а затем вновь двигаться вниз. Следовательно, при отсутствии трения движение шарика было бы непрерывным.

Однако, перемещаясь по наклонной дорожке, шарик из-за трения «теряет» энергию. Поэтому для непрерывного движения шарика необходимо, чтобы на участке *va* на него действовала

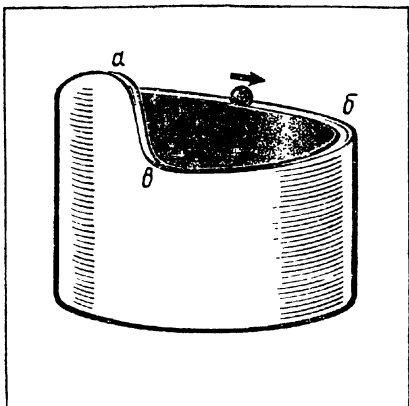


Рис. 83.

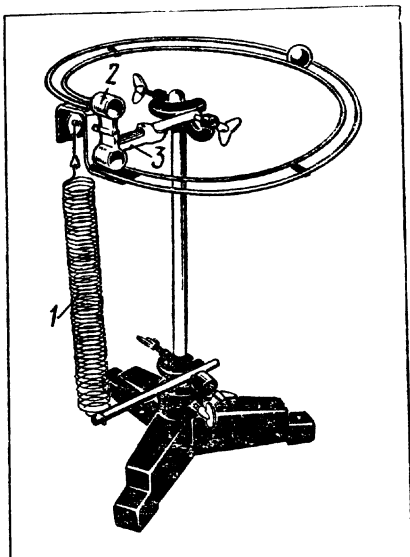


Рис. 84.

со стороны другого тела какая-то сила, направленная противоположно силе тяжести, и чтобы она совершала работу, поднимая его вновь к вершине. Эту работу может совершить, например, сила упругости мышц руки. Но можно к винтовой дорожке присоединить небольшой подъемный механизм (рис. 84), который действует благодаря силе упругости пружины 1. Специальный ротор 2, в нижнее гнездо которого попадает шарик, освобождая его от защелки 3, поворачивается на 180° и поднимает шарик к вершине наклонной дорожки, откуда он вновь скатывается вниз [ДЭ, II, стр. 50].

Подъемный механизм совершает работу, перемещая шарик в направлении, противоположном силе тяжести. Источник тока, перемещающий заряды внутри него против сил электростатического поля, выполняет ту же роль, что и подъемный механизм в рассмотренной модели.

§ 48. Стационарное электрическое поле

Рассматривая вопрос об электрическом поле как об условии существования тока в проводнике, необходимо учесть следующее. При изучении электростатики учащиеся узнали, что внутри заряженного проводника электрическое поле отсутствует, а свободные заряды расположены на его поверхности. Эти заряды создают поле лишь вне проводника, причем силовые линии направлены нормально к его поверхности. Но, когда поле в проводнике отсутствует, заряды не перемещаются в каком-то определенном направлении: ток в нем отсутствует.

Действительно, с помощью известного опыта (рис. 85) легко показать, что, пока тока в цепи нет, все точки заряженного про-

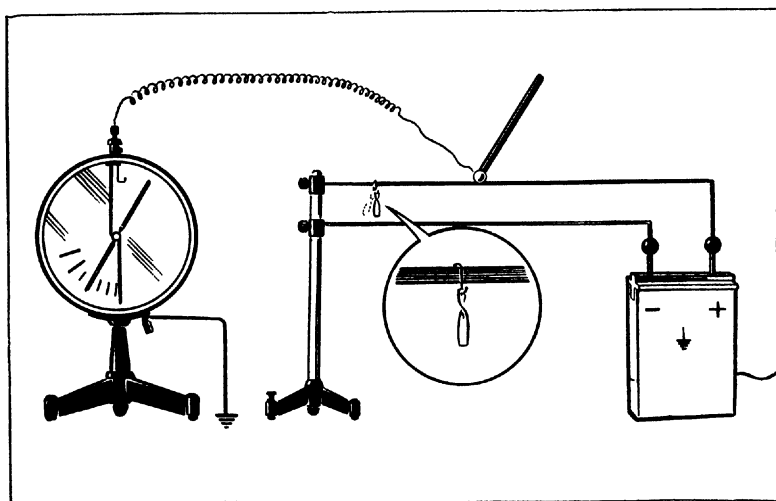


Рис. 85.

водника (бумажной ленты, натертой графитом, или влажной нити), присоединенного к источнику высокого напряжения, имеют одинаковые потенциалы [ДЭ, II, стр. 52]. Следовательно, напряженность поля в любой точке проводника равна нулю. При замыкании цепи потенциалы различных точек проводника становятся неодинаковыми.

Итак, эксперимент убеждает в том, что при наличии тока в проводнике в нем существует электрическое поле. Однако это поле, называемое **стационарным**, отличается от электростатического поля неподвижных зарядов. И это различие необходимо разъяснить учащимся.

Известно, что между полюсами источника тока существует электростатическое поле (рис. 86). При подключении к источнику тока проводника под действием этого поля свободные заряженные частицы в нем (например, электроны в металле) начинают двигаться в различных направлениях, в том числе и к поверхности проводника. В результате на поверхности проводника скапливаются заряды: положительные около положительного полюса источника, отрицательные — у отрицательного. Плотность этих зарядов по абсолютному значению убывает от полюсов к середине проводника (рис. 87).

Появившиеся на поверхности проводника заряды изменяют первоначальное электрическое поле: силовые линии в самом проводнике становятся почти параллельными его оси, т. е. поле оказывается близким к однородному, а вне его оно неоднородно, причем силовые линии располагаются наклонно к поверхности проводника.

Для подтверждения сказанного учащимся целесообразно показать опыт¹. В проекционную ванночку помещают два деревянных

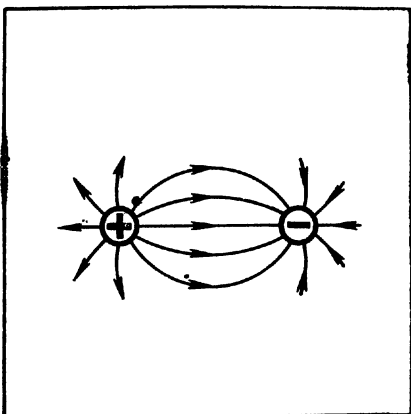


Рис. 86.

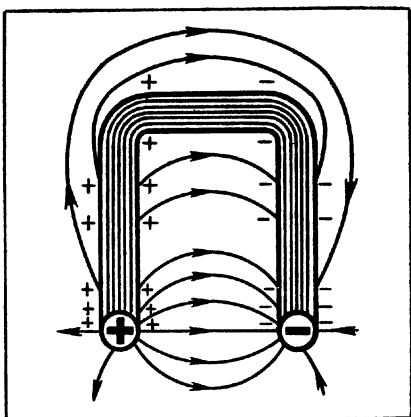


Рис. 87.

¹ Опыт описан в кн.: Шахмаев Н. М. Основные демонстрации при изучении электромагнитного поля. М., 1960, с. 64.

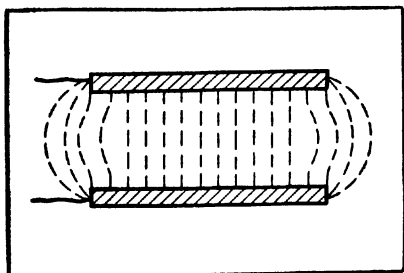


Рис. 88.

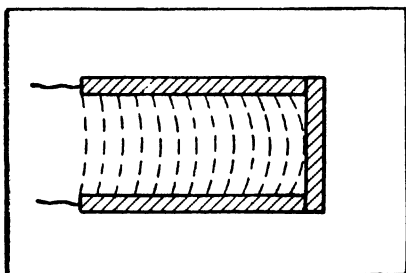


Рис. 89.

электрода (ими могут быть, например, две предварительно увлажненные палочки), наливают касторовое или трансформаторное масло с небольшим количеством манной крупы в нем и присоединяют эти электроды к электрофорной машине или высоковольтному выпрямителю. На экране наблюдают картину электростатического поля заряженных проводников (рис. 88): силовые линии поля нормальны к поверхностям проводников.

Замыкая цепь поперечной деревянной палочкой (рис. 89), показывают, как изменяется поле: силовые линии оказываются уже не перпендикулярными, а наклонными к поверхностям проводников.

Ученикам нужно также пояснить, что наряду с различием имеется и существенное сходство между электростатическим и стационарным электрическим полем проводника с током — оба они потенциальные: работа при перемещении заряда в этих полях по замкнутому пути равна нулю; силовые линии обоих полей незамкнутые (начинаются и кончаются на зарядах).

§ 49. Электродвижущая сила источника тока

Разъяснив учащимся роль источника тока в цепи, необходимо ввести основную величину, характеризующую его: **электродвижущую силу** (э.д.с.). Известно, что э.д.с. источника тока можно определить как работу сторонних сил по перемещению единицы положительного заряда от отрицательного полюса источника к положительному. Необходимость действия сторонних сил для создания постоянного тока в цепи уже была обоснована. Следует разъяснить, что эти силы в различных источниках имеют неодинаковое происхождение. Например, в гальванических элементах это силы, возникающие в результате определенных химических процессов; в электрофорной машине — это силы упругости мышц руки, вращающей диски машины; в индукционных генераторах — электромагнитная сила и т. д.

Каждый источник тока характеризуется *работой действующих в нем сторонних сил по перемещению единицы положительного заряда, т. е. определенной э.д.с.*

Возникает вопрос, о каком участке цепи идет речь при определении э.д.с. источника через работу сторонних сил. В определении можно говорить о том участке, где эти силы действуют, а можно говорить о работе перемещения заряда по всей замкнутой цепи. Эти определения эквивалентны. В самом деле при движении зарядов между полюсами источника во внешней цепи работу совершают только электростатические силы. Во внутренней же части цепи работу совершают как электростатические, так и сторонние силы. При этом работа электростатических сил во внешней цепи (A_1) равна работе электростатических сил между теми же полюсами внутри источника (A_2), взятой с противоположным знаком: $A_1 = -A_2$.

Так как работа электростатических сил по замкнутому пути равна нулю ($A_1 + A_2 = 0$), то полная работа всех сил по всей цепи в конечном счете равна работе только сторонних сил на том участке, где они действуют.

§ 50. Закон Ома для полной цепи

Для постановки перед учащимися учебной проблемы при изучении закона Ома для полной цепи можно использовать следующие разъяснения. Нормальная работа электрических ламп, двигателей и других потребителей тока возможна лишь при определенной силе тока в них. Возникает вопрос: от чего и как зависит сила тока в этих приборах при подключении их к источнику тока? Ответ на этот вопрос важен, так как служит основой для управления током в электрических цепях. Учащиеся пока лишь знают из курса VII класса, как определить силу тока на участке цепи, когда напряжение на нем известно.

Если же потребитель тока присоединен к источнику тока, то напряжение на нем заранее неизвестно: оно будет меняться при подключении к данному источнику различных потребителей. Это можно продемонстрировать на опыте.

Присоединив вольтметр к полюсам источника, замкнутого внешней цепью, содержащей реостат (рис. 90), фиксируют некоторое определенное напряжение. Увеличивая сопротивление включенной части реостата, показывают, что напряжение на полюсах источника при этом тоже изменяется. Значит, оно зависит не только от источника, но и от внешнего сопротивления.

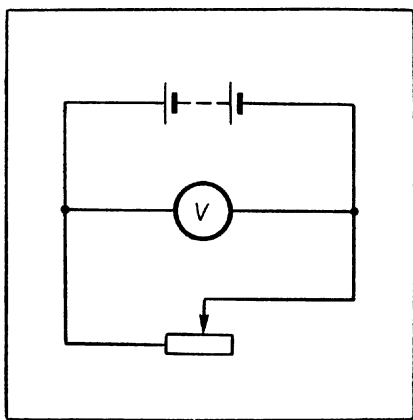


Рис. 90.

Для решения поставленной перед учащимися проблемы переходят к выводу закона Ома, который можно сделать на основе рассмотрения энергетических преобразований в цепи.

Как только цепь замыкают, тотчас начинается перемещение электрических зарядов. По внешнему участку цепи положительные заряды движутся под действием электростатического поля от положительного полюса источника к отрицательному. При этом приобретенная ими энергия расходуется из-за сопротивления внешней цепи на ее нагревание.

Внутри источника, где действуют сторонние силы, положительные заряды движутся от отрицательного полюса к положительному против сил электростатического поля. Так как внутренняя часть цепи (электролит, провода) также обладает сопротивлением, то энергия расходуется и внутри источника.

Работа электростатического поля во внешней цепи равна и противоположна по знаку работе против поля внутри источника. Как уже известно учащимся, полная работа электростатического поля во всей цепи равна нулю. Поэтому если никаких изменений в цепи, кроме нагревания, не происходит, то работа, совершенная сторонними силами в источнике, равна количеству теплоты, выделяющемуся во всей цепи: $A = Q$. (Здесь уместно вновь обратиться к приведенной выше механической модели электрической цепи и провести аналогию.)

Из курса VII класса известно, что количество теплоты, выделяемое током в проводнике,

$$Q = I^2 R_{\text{ц}} t,$$

где $R_{\text{ц}}$ — сопротивление всей цепи.

Следовательно, работа сторонних сил источника тока

$$A = I^2 R_{\text{ц}} t.$$

Но из определения э.д.с.

$$\mathcal{E} = \frac{A_{\text{стор}}}{q}$$

следует, что работа сторонних сил по переносу заряда q по всей цепи

$$A = \mathcal{E} q,$$

тогда

$$\mathcal{E} q = I^2 R_{\text{ц}} t.$$

Сокращая обе части равенства на $q = It$, получают:

$$\mathcal{E} = I R_{\text{ц}} \text{ или } I = \frac{\mathcal{E}}{R_{\text{ц}}}.$$

Так как полное сопротивление цепи $R_{\text{ц}}$ состоит из сопротивлений ее внешней R и внутренней r частей, то

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R + r}. \quad (1)$$

Получив формулу закона Ома для полной цепи, можно ответить на вопрос, от чего зависит сила тока в цепи.

Часто учащиеся, усвоив формулу закона Ома для полной цепи, все же недостаточно ясно представляют себе, что сила тока в цепи зависит от трех величин, две из которых (э.д.с. и внутреннее сопротивление) характеризуют источник,

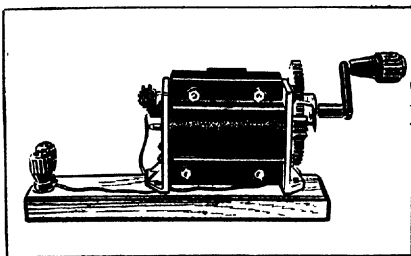


Рис. 91.

а третья зависит от самой внешней цепи. Чаще всего школьники недостаточно ясно понимают роль внутреннего сопротивления источника и тот факт, что напряжение на полюсах не постоянно и заранее не известно (в отличие от э.д.с.), а для данного источника оно существенно зависит от сопротивления внешней цепи. Они, например, затрудняются объяснить, почему лампочка, рассчитанная на напряжение 3,5 В, подключенная к долго работавшей батарейке для карманного фонаря, светит очень слабо (или совсем не светит), в то время как вольтметр, присоединенный к полюсам этой батарейки, показывает напряжение 4,5 В. Нужно отнестись с особым вниманием к подбору демонстрационных опытов и задач, дающих возможность разъяснить эти вопросы и тем самым способствующих более глубокому пониманию закона Ома для полной цепи.

Для того чтобы четко разграничить понятия э.д.с. источника и напряжения на его полюсах, замкнутых внешней цепью, целесообразно продемонстрировать следующий опыт.

К индукционному генератору, например, от полевого телефонного аппарата¹ (рис. 91) присоединяют осветительную лампу мощностью 10—15 Вт, рассчитанную на напряжение 127 В. При вращении якоря генератора лампа светится. Затем эту лампу заменяют лампочкой от карманного фонаря, рассчитанную на 2,5—3,5 В, и обнаруживают, что свечения в этом случае не наблюдается.

Анализ показанного опыта, на первый взгляд парадоксального, проводят следующим образом.

Любой потребитель тока (в данном случае лампа) работает в нормальном режиме, если через него проходит ток, на который он рассчитан. Сила тока во внешней цепи зависит от напряжения из ней. Напряжение на лампе при данной э.д.с. источника определяется соотношением между сопротивлением лампы и источника тока.

Действительно,

$$\mathcal{E} = IR + Ir, \text{ или } IR = \mathcal{E} - Ir,$$

¹ Такие генераторы продают в магазинах учебно-наглядных пособий.

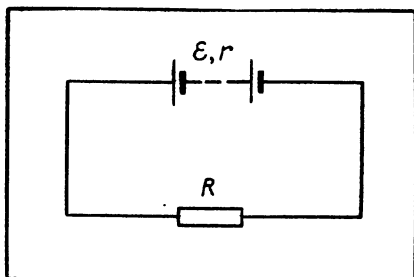


Рис. 92.

где IR — напряжение на внешней цепи, а Ir — напряжение на внутреннем сопротивлении источника. Если сопротивление внешней цепи велико по сравнению с внутренним сопротивлением источника, то $IR > Ir$.

В первом опыте сопротивление лампы $R_1 > r$, и поэтому напряжение на ней было достаточно для ее свечения.

Во втором случае сопротивление лампочки от карманного фонаря $R_2 \ll r$, поэтому напряжение на ней оказывается меньшим, чем необходимо для ее свечения. Значительное напряжение приходится на внутреннюю часть цепи. В этом случае напряжение во внутренней части цепи Ir практически равно э.д.с. источника.

Следует иметь в виду, что при указанном источнике тока для описанного выше опыта можно использовать осветительную лампу лишь небольшой мощности (10—15 Вт), рассчитанную на напряжение 127 или 220 В. Если такой лампы не окажется, то можно взять неоновую лампу, мощность которой еще меньше.

Те же вопросы, что и в только что разобранном эксперименте, учащиеся могут уяснить при решении расчетных задач.

Задача 1. На рисунке 92 изображена схема электрической цепи. Во сколько раз уменьшится сила тока в этой цепи, если проводник сопротивлением R заменить проводником сопротивлением $3R$. Э.д.с. источника равна \mathcal{E} , а его внутреннее сопротивление $r = R$.

Эта задача интересна тем, что позволяет показать учащимся, как изменяется сила тока при изменении сопротивления внешней цепи. В данном случае сопротивление внешней цепи увеличилось в 3 раза, а сила тока уменьшилась только в 2 раза. Таким образом, здесь еще раз подчеркивается роль внутреннего сопротивления источника тока.

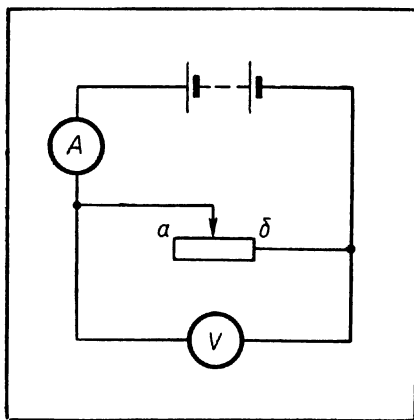


Рис. 93.

Задача 2. На рисунке 93 изображена схема электрической цепи. Если ползунок реостата двигать к концу б, то напряжение между его концами будет уменьшаться, а сила тока в нем — увеличиваться. Почему это происходит?

Особый интерес представляет рассмотрение предельных значе-

ний силы тока, которые можно получить, пользуясь данным источником. Так как величина тока в цепи при одном и том же источнике зависит только от сопротивления внешней цепи, то максимальное значение силы тока будет при $R \rightarrow 0$, а минимальное при $R \rightarrow \infty$.

Первому случаю соответствует короткое замыкание. Все приборы выключены, и полюса источника соединены проводником, сопротивление которого ничтожно мало по сравнению с внутренним сопротивлением самого источника ($R \ll r$):

$$I_{\max} = \frac{\mathcal{E}}{r}.$$

Как видно из формулы, сила тока при коротком замыкании определяется не только э.д.с. источника, но и его внутренним сопротивлением. Для источников со сравнительно большим внутренним сопротивлением (гальванические элементы) ток короткого замыкания невелик, и поэтому он для них не так опасен. Иная картина наблюдается для источников, обладающих очень малым внутренним сопротивлением (в свинцовых аккумуляторах имеет значение от 0,1 до 0,001 Ом). У них сила тока короткого замыкания очень велика и может вывести из строя источник. Особенно опасны короткие замыкания в осветительных сетях, питаемых от подстанций, э.д.с. которых измеряется сотнями вольт. Сила тока короткого замыкания в них может достигать нескольких тысяч ампер.

Второму предельному случаю соответствует разрыв цепи. При этом сила тока $I = 0$, напряжение внутри источника отсутствует, а напряжение между полюсами источника равно его э.д.с.

Оба предельных случая целесообразно рассмотреть также при решении задач.

Задача 1. Э.д.с. батарей аккумуляторов 12 В, а ее внутреннее сопротивление 0,02 Ом. Чему была бы равна сила тока короткого замыкания этого аккумулятора? Сравните полученные результаты с силой тока в осветительной лампе, рассчитанной на 220 В, если мощность лампы 60 Вт.

Задача 2. На рисунке 94 изображена схема электрической цепи. Определите показания амперметра и вольтметра для положений 1, 2 и 3 переключателя П. Э.д.с. источника 6 В, его внутреннее сопротивление $r = 1,5$ Ом, а сопротивление внешней цепи $R = 3,5$ Ом. Сопротивление подводящих проводов и амперметра очень мало, а сопротивление вольтметра велико.

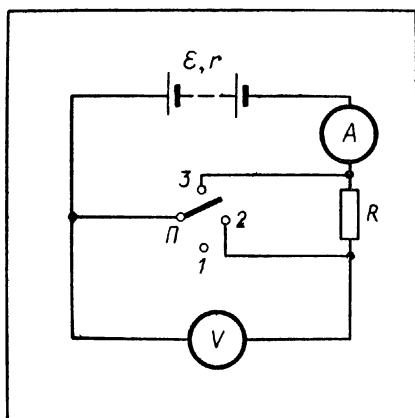


Рис. 94.

§ 51. Измерение напряжения и э. д. с.

При изучении закона Ома для замкнутой цепи должна быть проведена лабораторная работа по определению э.д.с. и внутреннего сопротивления источника тока.

В плане выполнения этой работы предлагается измерять э.д.с. источника с помощью вольтметра, присоединенного к его полюсам при разомкнутой цепи. Однако предварительно необходимо дать обоснование возможности измерить э.д.с. таким способом.

Можно следующим образом объяснить метод измерения э.д.с., указанный в описании к лабораторной работе.

Из формулы закона Ома для замкнутой цепи вытекает, что $\mathcal{E} = I(R + r)$. Если $R \gg r$, то внутренним сопротивлением можно пренебречь и тогда $\mathcal{E} = IR$. Из закона Ома для участка цепи известно, что IR — это напряжение на участке цепи с сопротивлением R . Значит, измерив напряжение на концах внешней цепи, сопротивление которой $R \gg r$, тем самым приблизительно измеряют э.д.с. источника. Ясно, что, чем больше сопротивление внешней цепи по сравнению с внутренним сопротивлением источника тока, тем более точный результат будет получен. Э.д.с. можно измерить точно, если сопротивление внешней цепи будет бесконечно велико, т. е. если цепь будет разорвана. Следовательно, э.д.с. равна напряжению между полюсами источника тока при разомкнутой цепи.

Но как измерить это напряжение? Ведь присоединив вольтметр к полюсам источника, тем самым замыкают цепь самым вольтметром. Следовательно, точно измерить э.д.с. с помощью вольтметра, действие которого связано с прохождением тока через него, невозможно. Но чем больше сопротивление вольтметра, тем его показания ближе к значению э.д.с. источника.

Точно измерить напряжение между полюсами источника при разомкнутой цепи можно с помощью электростатического вольтметра или электрометра (рис. 95). Стержень и корпус электрометра, к которым присоединяют полюса, изолированы друг от друга, поэтому при измерении напряжения цепь остается разомкнутой. Однако школьный демонстрационный электрометр — прибор весьма неточный. Кроме того, он рассчитан на сравнительно высокие напряжения (порядка нескольких сотен вольт) и для измерения малых напряжений вообще непригоден.

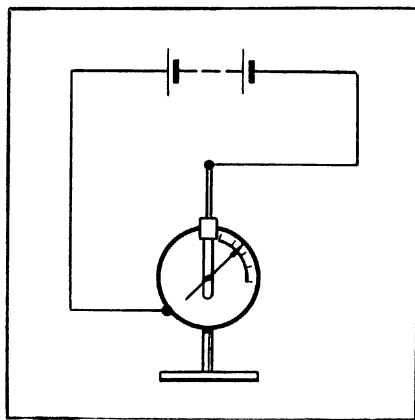


Рис. 95.

Чтобы учащиеся достаточно ясно представляли себе, насколько малая ошибка получается при измерении э.д.с. источника тока методом, указанным в лабораторной работе, целесообразно рассмотреть следующую задачу.

Задача. Какую ошибку в измерении э.д.с. источника тока допустят, если показание школьного лабораторного вольтметра, присоединенного к его полюсам, равное 4 В, принимают за э.д.с.? Сопротивление источника тока $r = 0,5$ Ом, а вольтметра $R = 200$ Ом.

Решение. Показание вольтметра U — это напряжение между его зажимами. Когда вольтметр присоединен к полюсам источника, то цепь замкнута, в ней идет ток и показание прибора будет меньше э.д.с. на величину напряжения внутри источника $U_0 = Ir$.

Силу тока I в цепи можно вычислить по показанию вольтметра и его сопротивлению:

$$I = \frac{U}{R}; \quad I = \frac{4 \text{ В}}{200 \text{ Ом}} = 0,02 \text{ А.}$$

Тогда $U_0 = 0,02 \text{ А} \cdot 0,5 \text{ Ом} = 0,01 \text{ В}$, и э.д.с. источника тока

$$\mathcal{E} = U + U_0; \quad \mathcal{E} = 4 \text{ В} + 0,01 \text{ В} = 4,01 \text{ В.}$$

Таким образом, относительная ошибка при измерении э.д.с. составляет

$$\frac{\Delta \mathcal{E}}{\mathcal{E}} = \frac{0,01 \text{ В}}{4,01 \text{ В}} \approx 0,0025 \text{ или } 0,25\%.$$

Заметим, что цена деления лабораторного вольтметра равна 0,2 В. Следовательно, ошибка в 0,01 В не может быть обнаружена данным прибором, поскольку она ниже цены деления.

После решения задачи можно обратить внимание учеников на следующее. По принципу действия вольтметр не отличается от амперметра: в обоих приборах угол поворота рамки пропорционален силе тока, который через нее проходит. Следовательно, вольтметр (так же как и амперметр) по существу измеряет силу тока. Но его шкала проградуирована таким образом, что на ней указана величина, пропорциональная силе тока, — произведение силы тока на сопротивление самого вольтметра (IR). Поэтому-то прибор и показывает напряжение на нем: $U = IR$, т. е. фактически вольтметр измеряет напряжение на самом себе. Для того чтобы узнать напряжение на любом участке цепи, нужно вольтметр присоединить к нему так, чтобы напряжения на них были равны, т. е. параллельно этому участку.

Для закрепления и углубления знаний учащихся по законам постоянного тока, а также по закономерностям последовательного и параллельного соединений проводников, изучаемых в VII

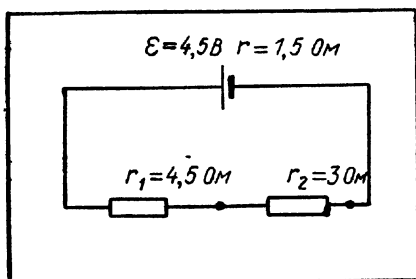


Рис. 96.

классе, целесообразно решить ряд задач. В их число желательно включить задачи на расчет дополнительных сопротивлений к вольтметрам и шунтов к амперметрам, позволяющих расширить пределы шкал этих приборов. Полезна задача на определение силы тока и напряжений на отдельных участках цепи, а также изменений этих величин при подключении параллельно одному из этих участков проводника с некоторым сопротивлением.

Задача. Имеется цепь (рис. 96). Определите силу тока в проводнике с сопротивлением r_3 и напряжение на нем. Чему будут равны сила тока в этом проводнике и напряжение на нем, если параллельно ему подключить проводники с сопротивлением $r_3 = 2 \text{ Ом}$?

Желательно также в число отобранных задач по данной теме включить и такие, в которых требуется рассчитать работу и мощность тока, количество теплоты, выделяемое на отдельных участках цепи. Такого типа задачи приведены в учебном пособии «Физика, 9».

Глава XI

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК В МЕТАЛЛАХ

§ 52. Введение

Изучение электрического тока в различных средах ведут на основе классической электронной теории. Это повышает научный уровень изучения как данной темы, так и электродинамики в целом.

Большое значение в формировании мировоззрения учащихся имеет изучение механизма проводимости различных сред, природы носителей заряда и характера их движения в этих средах, что дает возможность углубить представления о строении вещества, полученные учащимися при изучении молекулярной физики.

Рассмотрение процессов электропроводности знакомит учащихся с физическими основами электроники — одним из наиболее эффективных и перспективных направлений научно-технического прогресса. Но содержание темы не ограничивается физическими основами электроники, в ней рассматривается устройство и действие таких приборов, как вакуумный диод и электронно-лучевая трубка, термистор, фоторезистор, полупроводниковый диод и др. Это определяет большое политехническое значение данной темы.

И наконец, при изучении тока в различных средах закладываются основы для понимания устройства и действия ряда приборов и установок, которые учащиеся будут изучать в курсе физики X класса, таких, как вакуумный фотоэлемент, рентгеновская трубка, газоразрядный счетчик элементарных частиц, выпрямитель, ламповый радиоприемник, генератор незатухающих колебаний, радиолокационная установка и др.

В основу изучения тока в различных средах положена единая концепция, основанная на сопоставлении характера зависимости силы тока от напряжения и механизма проводимости в этих средах.

Электрический ток в различных средах существенно отличается как носителями заряда, так и характером их движения. В то же время электрический ток во всех средах имеет общую черту — он представляет собой упорядоченный поток заряженных частиц. В связи с этим целесообразно при изучении тока в каждой новой среде сравнивать его с током в других средах.

Это определяет единый план изучения тока в каждой из сред: вначале выясняют природу носителей зарядов, затем характер их движения, далее зависимость силы тока от напряжения (вольт-амперную характеристику) и, наконец, принцип действий приборов, устройств и технологических процессов, основанных на закономерностях тока в этих средах.

Изучение механизма проводимости в различных средах имеет специфические трудности. Невозможно показать учащимся ни самих носителей зарядов, ни характера их движения. Эти трудности можно частично преодолеть, если максимально использовать учебные кинофильмы, в которых средствами мультипликации условно показан характер движения носителей зарядов в различных средах. Кроме того, во всех этих фильмах показаны многие примеры применения приборов и устройств, основанных на этих закономерностях.

Изучение темы должно широко опираться на демонстрационный и лабораторный эксперимент.

Начинать изучение темы целесообразно с тока в металлах. Обусловлено это рядом причин: во-первых, это позволяет осуществить преемственную связь с курсом физики VII класса; во-вторых, при изучении тока в металлах выводят закон Ома для участка цепи на основе электронной теории, что дает возможность использовать следствия из этого вывода при изучении тока в других средах; в-третьих, вольт-амперная характеристика для металлов наиболее простая.

§ 53. Экспериментальные основы электронной теории

Основная задача темы состоит в ознакомлении учащихся с элементами классической электронной теории, выводом на ее основе закона Ома для участка цепи. В этой же теме рассматривают

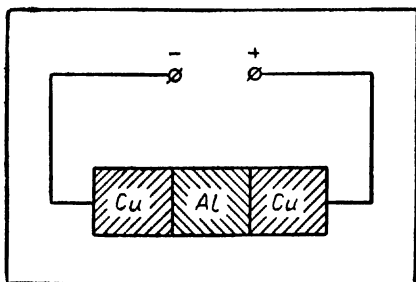


Рис. 97.

металлах обусловлен не ионами вещества, полезно привести следующие конкретные данные. По трем хорошо отшлифованным цилиндрам — медному, алюминиевому и медному (рис. 97) в течение одного года пропускали ток. За это время через цилиндры прошло $3,5 \cdot 10^6$ Кл электричества. В опыте использовали ток, питающий трамвайную сеть.

Представляет интерес решение задачи, в которой можно рассчитать, какое произошло бы изменение массы, например алюминиевого цилиндра, если бы ток в опыте Рике осуществлялся движением ионов.

Для такого расчета необходимо знать массы атомов меди ($m_{\text{Cu}} = 1,05 \cdot 10^{-25}$ кг) и алюминия ($m_{\text{Al}} = 0,45 \cdot 10^{-25}$ кг) и иметь в виду, что при образовании кристаллов каждый атом меди теряет один электрон, а атом алюминия — два электрона. Расчет показывает, что изменение массы цилиндров было бы настолько значительно, что оно должно было бы обязательно обнаружиться. Вместе с тем даже при очень высокой точности измерения никакого изменения в массах цилиндров не было обнаружено.

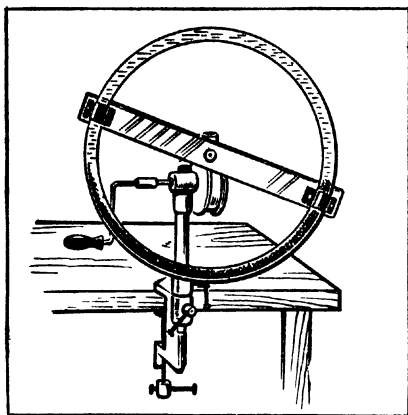


Рис. 98.

такие важные явления, как сверхпроводимость, которая в последние годы приобрела не только теоретический, но и практический интерес.

Как известно, природа носителей заряда в металлах обоснована классическими опытами Э. Рике, Л. И. Мандельштама — Н. Д. Папалекси и Р. Толмена — Т. Стюарта.

При объяснении опыта Рике, устанавливающего, что ток в

Опыт Рике позволяет сделать заключение, что ток в металлах осуществляется не ионами, а частицами, совершенно одинаковыми для меди и алюминия, т. е. электронами.

Прямые доказательства электронной природы тока в металле дали опыты Л. И. Мандельштама — Н. Д. Папалекси (1912) и Р. Толмена — Т. Стюарта (1916).

Идею этих опытов учащимся можно объяснить с помощью модели. Кольцеобразную стеклянную трубку, наполненную водой,

приводят в быстрое вращение (рис. 98). При торможении кольца жидкость в нем продолжает движение. Оно особенно хорошо заметно, если в жидкости плавают какие-либо частицы: чаинки, опилки и др.

Целесообразно также использовать кинокольцовку «Инерционный ток в металлах», в которой средствами мультипликации показана идея опытов, позволяющих ввести представления о свободных электронах в металле и электронном газе.

Учащимся необходимо разъяснить, что представление об электронном газе — это некоторая приближенная модель явления, в которой допускают известные упрощения. Они сводятся к следующему: электронный газ ведет себя подобно идеальному газу, к которому применимы положения молекулярно-кинетической теории; движения электронов происходят по законам классической механики; взаимодействий электронов друг с другом не учитывают.

§ 54. Вывод закона Ома для участка цепи

Основной вопрос темы — вывод закона Ома для участка цепи из электронной теории.

До изучения этого вопроса целесообразно рассмотреть с учащимися различие в понятиях «скорость распространения электрического тока» и «скорость упорядоченного перемещения электронов».

Когда в металле создается электрическое поле, свободные электроны получают ускорение в направлении действия электрических сил. Поэтому на тепловое движение электронов накладывается упорядоченное их перемещение в определенном направлении. Уместно для пояснения использовать такое образное сравнение: движение электронов в электрическом поле напоминает дрейф льдин во время ледохода, когда они, двигаясь беспорядочно, сталкиваясь друг с другом и непрерывно меняя свою скорость, увлекаются водными и воздушными течениями в определенном направлении.

Применяя это сравнение, можно говорить о «дрейфе» электронов в электрическом поле в направлении действия на них электрических сил.

При разъяснении понятия о «дрейфе» электронов желательно показать кинокольцовку «Электрический ток в металлах».

Легко оценить величину средней скорости упорядоченного движения электронов, v , е. скорости их дрейфа. Очевидно, что именно этой скоростью v определяется сила тока. Чем больше эта скорость (средняя скорость дрейфа электронов под действием электрического поля), тем больше их пройдет через поперечное сечение проводника в единицу времени. Поэтому для оценки величины средней скорости дрейфа электронов надо установить, какая количественная связь существует между силой тока и этой скоростью.

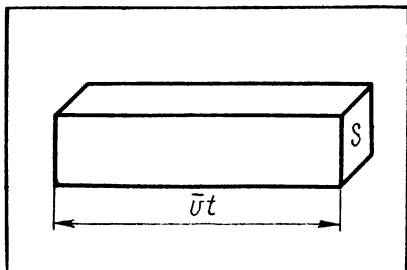


Рис. 99.

Для этого рассматривают металлический проводник с площадью поперечного сечения S (рис. 99). За некоторый промежуток времени через это сечение успеют пройти все электроны, которые находятся от него на расстоянии, не превышающем $\bar{v}t$. Эти электроны находятся в мысленно выделенном объеме:

$$V = S\bar{v}t.$$

Если концентрация свободных электронов в данном металле равна n , то число их в объеме V равно nV . За время t они перенесут заряд

$$q = enV.$$

Следовательно, сила тока в проводнике

$$I = \frac{q}{t} \quad \text{или} \quad I = \frac{enV}{t}.$$

Подставив вместо объема его значение, получают:

$$I = Sen\bar{v}. \quad (1)$$

Сила тока, как и следовало ожидать, пропорциональна средней скорости дрейфа электронов \bar{v} .

По формуле (1) можно рассчитать скорость \bar{v} , если известна сила тока, проходящего через данный проводник с площадью сечения S . Для этого, конечно, нужно знать еще и концентрацию свободных электронов в данном металле.

Для большинства металлов концентрация свободных электронов лежит в пределах 10^{28} — 10^{29} м⁻³. В частности, для меди $n = 9 \cdot 10^{28}$ м⁻³.

Рассчитаем среднюю скорость упорядоченного движения электронов, например, в медном проводнике площадью сечения 1 мм² при силе тока 10 А:

$$\begin{aligned} \bar{v} &= \frac{I}{neS}; \\ \bar{v} &= \frac{10 \text{ А}}{9 \cdot 10^{28} \text{ м}^{-3} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл} \cdot 10^{-6} \text{ м}^2} \approx \\ &\approx 7 \cdot 10^{-4} \text{ м/с, или } \bar{v} = 0,7 \text{ мм/с.} \end{aligned}$$

Эта скорость в миллиарды раз меньше средней скорости теплового движения электронов, которая для меди имеет значение порядка 1000 км/с.

Итак, получили вывод о том, что скорость дрейфа электронов очень мала.

Например, для перемещения электронов при такой скорости всего лишь на 5 м потребовалось бы время

$$t = \frac{5\text{ м}}{0,7 \cdot 10^{-3} \frac{\text{м}}{\text{с}}} \approx 7000\text{ с} \approx 2\text{ ч.}$$

Между тем хорошо известно, что скорость «распространения» электрического тока очень велика. Ведь стоит повернуть выключатель, как лампочка, находящаяся в нескольких десятках метров от него, загорается «мгновенно». Вообще при замыкании электрической цепи все приборы в ней начинают действовать практически одновременно. Это означает, что свободные электроны в проводнике увлекаются в упорядоченное движение одновременно на всех участках цепи — и в нити лампочки, и возле выключателя.

Отсюда следует, что скорость распространения тока и скорость упорядоченного перемещения носителей тока — это совершенно разные понятия. Когда говорят об огромной скорости распространения тока в проводниках, то имеют в виду, что она относится к распространению действия электрического поля на заряды в проводнике. Оно увлекает в упорядоченное и очень медленное движение почти мгновенно один за другим электроны, находящиеся в различных точках проводника, даже очень удаленных друг от друга. И эта передача действия поля от одних зарядов к другим происходит с огромной скоростью. В любой же точке проводника электроны перемещаются полем с очень малой скоростью, измеряемой обычно долями миллиметров в секунду.

Электрическое поле распространяется со скоростью, близкой к 300 000 км/с. Эту скорость и имеют в виду, когда говорят о скорости «распространения» тока.

Целесообразно предложить учащимся для самостоятельного решения задачу, в которой надо сравнить время дрейфа электронов и время распространения электрического тока. Например, рассчитать, за сколько времени произойдет распространение электрического тока по проводам, соединяющим Москву с Владивостоком, расстояние между которыми примерно 10 000 км. На сколько переместятся за это время электроны под действием электрического поля, если электроны движутся по медному проводнику сечением 4 мм² при силе тока 0,1 А?

Рассмотренные вопросы подготавливают учащихся к усвоению вывода закона Ома для участка цепи.

Так, формула (1), представляющая собой одно из логических звеньев этого вывода, усваивается учащимися предварительно. Тем самым трудности изучения этого вопроса оказываются разделенными.

Далее для вывода закона Ома выясняют, как средняя скорость дрейфа электронов может быть вычислена независимо от формулы (1).

Между двумя соударениями с ионами электроны под действием электрического поля движутся ускоренно. При каждом соударении

с ионами приобретаемая ими скорость v уменьшается до нуля. Поэтому средняя скорость равноускоренного движения электрона

$$\bar{v} = \frac{v}{2}.$$

Скорость в конце свободного пробега $v = at$ и $\bar{v} = \frac{at}{2}$, где τ — промежуток времени между двумя соударениями.

Ускорение a находят из второго закона Ньютона:

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

Значит, средняя скорость

$$\bar{v} = \frac{eEt}{2m}.$$

Учитывая, что для однородного поля $E = \frac{U}{l}$, где U — напряжение на концах проводника длиной l , можно записать:

$$\bar{v} = \frac{e\tau U}{2ml}.$$

Подставив выражение для средней скорости в формулу (1), получают зависимость силы тока от напряжения:

$$I = \frac{e^2 n \tau S}{2ml} U. \quad (2)$$

Масса m и заряд электрона e — это универсальные постоянные величины; для данного проводника l и S также величины постоянные. Остается лишь отметить, что концентрация электронов в металлах (n) не зависит от напряжения (U) и в широком интервале температур остается постоянной.

Что касается промежутка времени между двумя соударениями электрона с ионами τ , то эта величина зависит от скорости теплового движения электронов и скорости, приобретаемой ими под действием электрического поля. Последняя скорость пренебрежимо мала (доли мм/с) и может не учитываться в сравнении с огромной скоростью теплового движения (порядка тысяч км/с).

Поэтому можно считать, что время свободного пробега не зависит от напряжения U , влияющего лишь на скорость дрейфа. Оно зависит только от температуры и, следовательно, при данной температуре остается величиной постоянной.

Значит, в выражении (2)

$$\frac{e^2 n \tau S}{2ml} = \text{const}. \quad (3)$$

В этом случае из выражения (2) следует, что сила тока прямо пропорциональна напряжению U . Поэтому вольт-амперная ха-

рактеристика металлического проводника — прямая линия (рис. 100).

Величина, обратная коэффициенту пропорциональности в выражении (2), равная отношению $\frac{U}{I}$, очевидно, представляет собой сопротивление проводника R .

Из сравнения выражения, полученного для R , с формулой $R = \rho \frac{l}{S}$ видно, что

$$\rho = \frac{2m}{e^2 n \tau}. \quad (4)$$

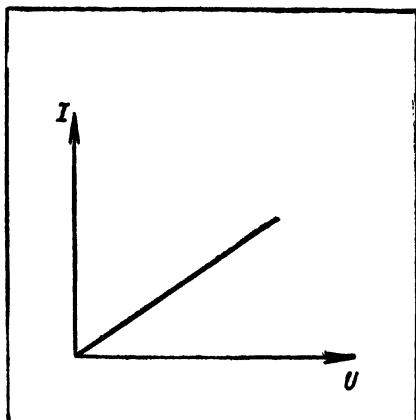


Рис. 100.

Заметим, что при выводе закона Ома были сделаны некоторые упрощения. В частности, не было учтено максвелловское распределение скоростей теплового движения электронов.

При внесении в указанный выше вывод уточнений на основе распределения Максвелла было получено для удельного сопротивления выражение, которое отличается от выражения (4) только численным значением коэффициента. Однако различие в значениях коэффициента не влияет на вид зависимости удельного сопротивления от величин, характеризующих электронный газ. Вместе с тем эти уточнения, требующие значительного усложнения вывода, не привели бы к существенным поправкам, которые даются лишь квантовой теорией.

Как показывает исследование преподавания физики в IX классе, самостоятельное воспроизведение всей логики вывода закона Ома вызывает затруднение у некоторых учащихся. Тем не менее очень важно, чтобы учитель тщательно разъяснил учащимся всю логику рассуждений. Этот вывод в отличие от экспериментального, известного еще из VII класса, дает возможность выяснить ряд важных фактов.

Можно показать, при каких условиях справедлив закон Ома для участка цепи, т. е. выяснить границы его применимости. Последнее, как известно, имеет большое значение для формирования мировоззрения учащихся.

В самом деле, закон Ома выполняется, когда выражение (3) — величина постоянная, т. е. если n и τ не зависят от U . Это справедливо в широких пределах для металлов. Далее, при изучении электрического тока в других средах анализ этого выражения позволит пояснить причины отступления от закона Ома в вакууме и газах.

Выражение (4) показывает, как связано удельное сопротивление вещества — макроскопическая величина — с атомарными вели-

чинами, характерными для электронного газа в данном веществе.

Оно позволяет также предсказать существование зависимости удельного сопротивления от температуры, так как от нее зависит время свободного пробега τ .

Эксперимент подтверждает наличие такой зависимости, однако только качественно. Получить правильную количественную зависимость сопротивления от температуры на основе классической электронной теории невозможно, что говорит о ее ограниченности. Это связано с теми упрощениями, которые были допущены в модели электронного газа, используемой для вывода закона Ома. Полностью совпадающие с экспериментом выводы можно получить лишь на основе квантовой теории.

Следует также иметь в виду, что время свободного пробега τ неодинаково для различных электронов, движущихся с различными скоростями. Поэтому для определения его среднего значения необходимо учитывать распределение электронов по скоростям — классическое или квантовое.

Важно, чтобы следствиями, полученными при выводе закона Ома, учащиеся умели пользоваться, даже если не все они смогут самостоятельно воспроизвести всю логику вывода. Последнее, по-видимому, требовать от всех учащихся не обязательно.

Для лучшего усвоения формулы (4) (ею в дальнейшем придется пользоваться неоднократно) можно предложить произвести расчет, который дает возможность оценить время (τ) свободного пробега электронов в металле, например в меди:

$$\tau = \frac{2m}{e^2 n \rho};$$
$$\tau = \frac{2 \cdot 9 \cdot 10^{-31} \text{ кг}}{1,6^2 \cdot 10^{-38} \text{ Кл}^2 \cdot 9 \cdot 10^{28} \text{ м}^{-3} \cdot 1,7 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}} \approx 4 \cdot 10^{-14} \text{ с}.$$

§ 55. Зависимость электрического сопротивления от температуры

Из выражения (4), полученного при выводе закона Ома, следует, что сопротивление металлов должно зависеть от температуры. Напомнив об этом учащимся, обращаются к эксперименту, чтобы проверить справедливость этого утверждения.

Демонстрационный опыт можно поставить с помощью самодельного прибора (рис. 101), состоящего из стальной спирали (диаметр 0,3 мм, длина 0,5 м), которую включают в цепь последовательно с индикатором — автомобильной лампочкой (6 В, 21 Вт). При нагревании спирали спиртовкой по ослаблению яркости свечения лампочки делают вывод о том, что сопротивление металлов с повышением температуры увеличивается.

Можно рекомендовать еще и опыт, в котором в качестве исследуемого проводника используют нить осветительной лампы. Для

подготовки лампы к демонстрации ее баллон отрезают в суженной части с помощью накалинной проволоки. Цепь собирают по схеме, указанной на рисунке 102. В качестве источника тока берут аккумулятор или батарейку карманного фонаря. Индикатором служит демонстрационный гальванометр. Сопротивление реостата регулируют так, чтобы гальванометр дал полное отклонение стрелки на всю шкалу, когда нить лампы находится при комнатной температуре.

Предварительно нуль гальванометра с помощью коррекционного винта устанавливают в крайнее правое положение.

Опыт достаточно хорошо удается с любой лампой, но наиболее удачно демонстрация проходит с лампой 150 Вт (220 В).

Изменение сопротивления легко заметить, если нить лампы опустить в горячую воду. Если нить нагреть с помощью пламени спиртовки или спички, стрелка гальванометра отклонится почти на половину шкалы.

Для характеристики зависимости сопротивления от температуры у различных металлов вводят температурный коэффициент сопротивления:

$$\alpha = \frac{R_t - R_0}{R_0 \Delta T} \quad (5)$$

Интересно привести таблицу значений температурных коэффициентов сопротивления для чистых металлов и сплавов.

Металл	Температурный коэффициент, K^{-1}	Сплав	Температурный коэффициент, K^{-1}
Серебро	0,0037	Латунь	0,0015
Алюминий	0,0038	Нихром	0,0001
Цинк	0,0037	Никелин	0,0001
Медь	0,0043	Манганин	0,00003
Свинец	0,0042	Константан	0,00002

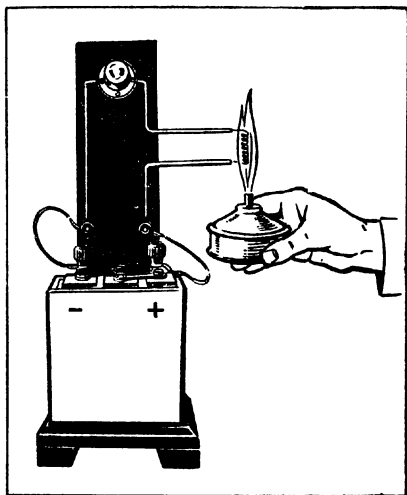


Рис. 101.

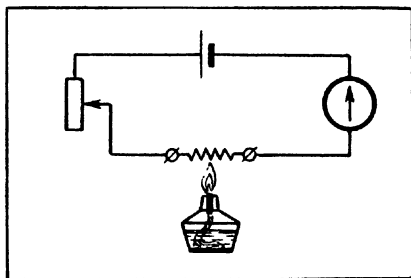


Рис. 102.

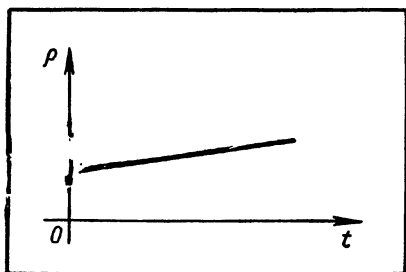


Рис. 103.

от их состава. Отсюда следует, что сопротивление сплавов меньше изменяется при нагревании. Существуют такие специальные сплавы, сопротивление которых практически не изменяется при нагревании. Таковы, например, сплавы константан и манганин. У константана α примерно в 200 раз меньше, чем у меди. Проводники из таких сплавов употребляют для изготовления точных измерительных приборов, а также эталонов сопротивления.

Так как сопротивление проводника может быть выражено через его размеры и удельное сопротивление ($R_t = \rho_t \frac{l}{S}$ и $R_0 = \rho_0 \frac{l}{S}$), то из формулы (5) получают:

$$\rho_t = \rho_0(1 + \alpha \Delta T).$$

Итак, между сопротивлением металлических проводников и их температурой существует линейная зависимость. Графически эта зависимость изображена на рисунке 103.

Зависимость сопротивления металлических проводников от температуры используют в различных измерительных и автоматических устройствах. Наиболее важным из них является термометр сопротивления.

Рассказав учащимся об устройстве термометра сопротивления, отмечают преимущества, которыми он обладает по сравнению с жидкостными: им можно пользоваться как при очень низких,

так и при высоких температурах, причем с большой точностью — до тысячных долей градуса.

В качестве экспериментальной задачи полезно построить вольт-амперную характеристику нити осветительной лампы по данным опыта, который проводится учителем на демонстрационном столе. Этот график может быть получен с помощью следующей простой установки,

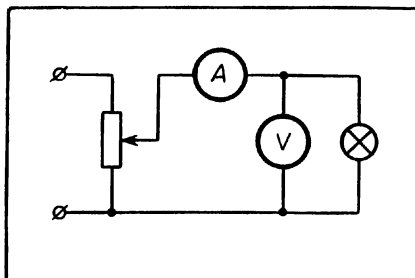


Рис. 104.

схема которой приведена на рисунке 104. Вместо потенциометра может быть использован лабораторный автотрансформатор (Латр).

Достаточно получить значения тока через каждые 50 В, чтобы выявить характер зависимости.

Ниже приведена вольт-амперная характеристика (рис. 105) для лампочки мощностью 100 Вт (220 В).

Полученный график следует проанализировать, поставив перед учащимися ряд вопросов.

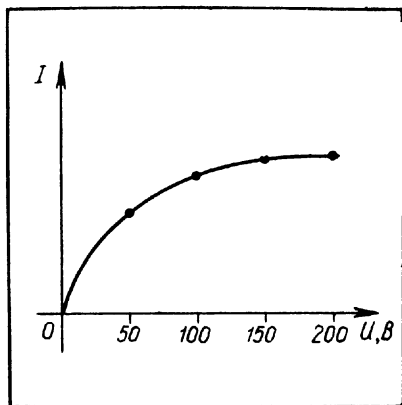


Рис. 105.

1. Почему в данном опыте получают вольт-амперную характеристику в виде кривой линии, хотя ранее было установлено, что вольт-амперная характеристика для металлов — прямая линия?

2. Как можно объяснить отклонение от закона Ома (нелинейная зависимость I от U) в рассмотренном опыте, используя для этого формулу

$$I = \frac{e^2 n \tau S}{2 m l} U?$$

3. Сравните сопротивление лампы при напряжении 50 В и 200 В, определив их по графику, полученному из опыта.

4. Определите температуру нити при напряжении 200 В (сопротивление при комнатной температуре, мало отличающееся от сопротивления при 0° С, учитель измеряет омметром и сообщает учащимся).

§ 56. Сверхпроводимость

Интерес к явлению сверхпроводимости в современной науке значительно возрос, так как появились перспективы его практического применения. Оказалось, что некоторые сплавы, например ниобий, цирконий, титан и др., обладают свойством сохранять свою сверхпроводимость при больших значениях силы тока.

Это резко расширило возможность практического использования эффекта сверхпроводимости. Тем более, что техника получения жидкого гелия, используемого для охлаждения, значительно усовершенствовалась.

Замечательные свойства сверхпроводников, такие, как отсутствие тепловых потерь при прохождении по ним сильных токов, могут найти применение в передаче энергии на расстояние. Сейчас уже действуют электрические генераторы со сверхпроводящей обмоткой.

Широкое применение для создания сверхмощных магнитных полей получили соленоиды из сверхпроводящего материала, по которому без потерь протекает очень сильный ток.

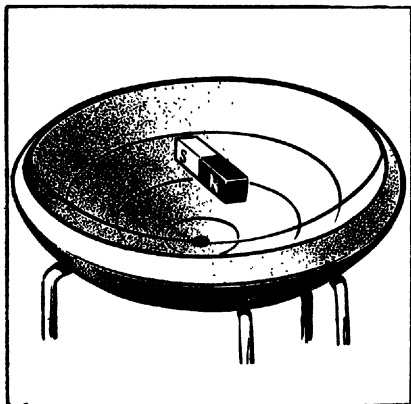


Рис. 106.

Рассказывая учащимся об истории открытия сверхпроводимости Гейке Камерлинг-Оннесом (1853 — 1926), желательно привести также описание опыта, поставленного в 1943 г. Владимиром Константиновичем Аркадьевым (1884—1953).

Опыт ставили со свинцовым кольцом, помещенным в жидкий гелий. Когда к кольцу приближали или удаляли от него магнит, то в нем возникал индукционный ток, который циркулировал несколько суток, т. е. столько времени, сколько мож-

но было поддерживать низкую температуру, несмотря на кратковременное существование электрического поля, вызвавшего этот ток.

В аналогичном опыте, поставленном в последнее время, никакого уменьшения тока в кольце не было отмечено через 2,5 года после его начала.

Другой вариант опыта Аркадьева (рис. 106) с магнитом, парящим над сверхпроводящей чашей с жидким гелием, описан в учебном пособии. Для объяснения опыта требуется знание правила Ленца. Поэтому в учебном пособии он описан в связи с изучением вихревых индукционных токов.

В этих опытах электроны, двигаясь по проводнику, не теряли энергии. Это интересный пример инерционного движения, для поддержания которого не требуется действия сил электрического поля.

Здесь уместно еще раз напомнить учащимся, что источник тока необходим лишь для того, чтобы восполнять потери энергии электронами при их столкновении с ионами кристаллической решетки металлов.

Глава XII

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК В ЖИДКОСТЯХ

§ 57. Природа электрического тока в жидкостях

Основное содержание темы тесно связано со знаниями, которые учащиеся получают в курсе химии. Поэтому такие вопросы, как электролитическая диссоциация, выяснение природы носителей тока в водных растворах или расплавах электролитов и практические применения электролиза (электрометаллургия, гальванотехника и др.), на уроках физики рассматривают в порядке

повторения и установления связи со знаниями учащихся по химии. Для такого повторения целесообразно использовать учебный кинофильм «Электролиз и его применение», в котором средствами мультипликации пояснены процесс диссоциации и движение ионов при электролизе.

При выяснении природы электрического тока в жидкостях желательно показать также опыт, подтверждающий, что электрический ток в растворах электролитов осуществляется движением ионов обоих знаков в противоположных направлениях.

Движение ионов в растворах электролитов можно сделать видимым благодаря тому, что некоторые ионы сообщают раствору определенную окраску. Проводят такой опыт.

Фильтровальную бумагу, пропитанную раствором поваренной соли, укрепляют на стеклянной пластинке (см. цветную вклейку III). На нее накладывают две узкие полоски такой же бумаги, но смоченные одна раствором медного купороса, другая — раствором двуххромовокислого калия. Первую полоску соединяют с положительным, а вторую — с отрицательным электродом источника тока.

При создании между электродами электрического поля у катода наблюдают появление желтой полосы и расширение ее в сторону анода. У анода появляется синяя полоса, которая расширяется к катоду. Эту синюю окраску сообщают раствору ионы меди, а желтую — ионы кислотного остатка.

Другой вариант этого же опыта подробно описан в литературе по демонстрационному эксперименту [ДЭ, II, опыт 74].

Как и при изучении электрического тока в других средах, далее выясняют вопрос о возможности применения к току в жидкостях закона Ома. Для этого вновь привлекают и анализируют уже известную учащимся формулу:

$$I = \frac{e^2 n \tau S}{2 m l} U.$$

Как было выяснено на уроках химии, образование ионов и их концентрация (n) не зависят от электрического поля, следовательно, и от приложенного к раствору электролита напряжения (U). При данной температуре время свободного пробега ионов (τ) также постоянно. Значит, выражение $\frac{e^2 n \tau S}{2 m l}$ в этом случае величина постоянная. Следовательно, вольт-амперная характеристика для растворов электролитов представляет собой прямую линию.

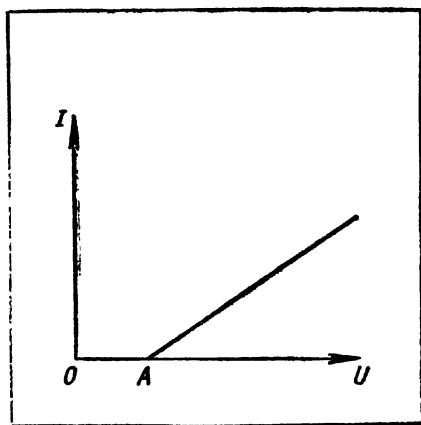


Рис. 107,

Если бы не э.д.с. поляризации, возникающая при прохождении тока через раствор электролита, вольт-амперная характеристика электролита была бы такой же, как для металлического проводника. Поляризация электродов вызывает «сдвиг» вольт-амперной характеристики: прямая графика не проходит через начало координат (рис. 107). Отрезок OA соответствует э.д.с. поляризации. Учителю нужно иметь это в виду и дать учащимся соответствующие разъяснения, если у них возникнут вопросы по этому поводу.

§ 58. Закон Фарадея

По сложившейся традиции в учебниках физики средней школы излагают отдельно два закона для электролиза, носящие имя **М а й к л а Ф а р а д е я** (1791—1867). Первый из них рассматривали как полученное из опыта утверждение

$$m = kIt \text{ или } m = kq,$$

где k — некая константа для данного вещества, называемая его электрохимическим эквивалентом.

Второй закон Фарадея формулировали с помощью понятия химического эквивалента. Он содержал утверждение, сделанное на основе анализа табличных данных электрохимических и химических эквивалентов (полученных, разумеется, экспериментально):

$$\frac{k}{x} = \text{const},$$

где x — химический эквивалент вещества, равный отношению его атомной массы к валентности ($x = \frac{A}{z}$).

И лишь затем оба закона сводили к одному объединенному:

$$m = \frac{1}{F} \frac{A}{z} q,$$

где F — величина постоянная для всех веществ, т. е. универсальная постоянная.

Тот факт, что F — универсальная постоянная, вытекает из следующего: при выделении на электроде любого вещества, масса которого в граммах равна химическому эквиваленту ($m = \frac{A}{z}$), через раствор электролита проходит одно и то же количество электричества q , численно равное универсальной постоянной F .

Такой метод изложения, разумеется, возможен. Но в связи с тем, что учащиеся ко времени изучения этой темы уже знакомы с элементами электронной теории, нет необходимости вести их по историческому пути открытия закона Фарадея. После выявления природы носителей тока и механизма проводимости электролитов закон Фарадея может быть получен коротким и более современным путем.

Каждый ион, который в процессе электролиза нейтрализуется на электроде и выделяется на нем в виде нейтральных атомов, имеет определенную массу. Но вместе с тем он переносит через электролит определенный заряд. Поэтому и масса выделившегося вещества, и количество прошедшего электричества пропорциональны числу ионов, которые подходят к данному электроду.

Масса выделившегося вещества

$$m = m_a N,$$

где m_a — масса атома (выраженная в кг), а N — число ионов, нейтрализующихся на данном электроде.

Как известно, масса атома в килограммах равна молярной массе M данного вещества, деленной на число атомов в ней, т. е. на число Авогадро N_A :

$$m_a = \frac{M}{N_A}.$$

Тогда

$$m = \frac{MN}{N_A}. \quad (1)$$

Число ионов N , проходящих через раствор электролита к данному электроду, можно найти следующим образом: каждый одновалентный ион несет заряд, равный заряду электрона e или, если валентность иона равна z , кратный ему ez .

Все количество электричества, переносимое N ионами:

$$q = zeN.$$

Отсюда

$$N = \frac{q}{ze}.$$

Подставив значение N в выражение (1), получают:

$$m = \frac{M}{N_A ze} q, \quad (2)$$

т. е. математическое выражение объединенного закона Фарадея.

В правой части выражения (2) все величины, кроме q , являются постоянными для данного вещества. Поэтому формулу можно записать в следующем виде:

$$m = kq, \quad (3)$$

где

$$k = \frac{M}{N_A ze}. \quad (4)$$

Закон Фарадея формулируют так: масса вещества, выделившегося на электроде при прохождении электрического тока, пропорциональна количеству прошедшего через раствор электричества.

Смысл коэффициента k , называемого электрохимическим эквивалентом данного вещества, выясняют из выражения (3):

$k = \frac{m}{q}$. Следовательно, коэффициент k численно равен массе вещества в килограммах, выделяемой при прохождении 1 кулона электричества. Далее из выражения (4) видно, что электрохимический эквивалент вещества зависит от его молярной массы и валентности (остальные величины — N_A и e , входящие в формулу (4), — универсальные постоянные). Значит, электрохимические эквиваленты неодинаковы не только для различных веществ, но и для одного и того же вещества в разных соединениях, в которых оно обладает различной валентностью.

Так, например, из расплава хлористой меди (CuCl), в которой медь одновалентна, при прохождении каждого кулона электричества выделяется $0,658 \cdot 10^{-6}$ кг меди; а из раствора CuSO_4 , где медь двухвалентна, — только $0,329 \cdot 10^{-6}$ кг меди; в первом случае $k = 0,658 \cdot 10^{-6}$ кг/Кл, а во втором $k = 0,329 \cdot 10^{-6}$ кг/Кл, т. е. в два раза меньше.

Полученное из электронной теории выражение для закона Фарадея включает в себя содержание того, что при историческом подходе формулировалось в виде двух законов.

Из сказанного видно, что вывод закона Фарадея из электронных представлений не только более короткий и приводит сразу к одному объединенному закону, но он обладает еще и тем преимуществом, что избавляет от необходимости вводить лишнее понятие химического эквивалента.

§ 59. Определение заряда одновалентного иона

Одним из важнейших выводов, сделанных на основании закона Фарадея, было определение заряда одновалентного иона, или, что то же, заряда электрона.

Переписав формулу закона Фарадея следующим образом:

$$eN_A = \frac{M}{mz} q,$$

можно показать, что при $m = M$ и $z = 1$, $eN_A = F$. Другими словами, произведение двух универсальных постоянных является тоже универсальной постоянной. Величина F равна количеству электричества, которое должно пройти через раствор электролита, чтобы на электроде выделился 1 моль одновалентного вещества. Эту универсальную постоянную, называемую числом Фарадея, определяют экспериментально на основании формулы $m = kq$, используя значения электрохимического эквивалента вещества (k) и его молярной массы (M). Она равна $9,65 \cdot 10^4$ Кл/моль.

Зная число Фарадея (F) и число Авогадро (N_A), определяют заряд одновалентного иона, т. е. заряд электрона:

$$e = \frac{F}{N_A}; \quad e = \frac{9,65 \cdot 10^4 \frac{\text{Кл}}{\text{моль}}}{6,02 \cdot 10^{23} \frac{1}{\text{моль}}} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{Кл}.$$

Любой двухвалентный ион переносит заряд, в два раза больший, чем одновалентный, трехвалентный — в три раза больший и т. д. Но никогда не бывает, чтобы один ион переносил заряд, содержащий дробную часть от заряда одновалентного иона.

Этот вывод, полученный из закона Фарадея, впервые в истории физики привел к мысли о том, что заряд одновалентного иона ($e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл) представляет собой наименьшее (элементарное) количество электричества, существующее в природе. Любой электрический заряд состоит из целого числа элементарных зарядов, т. е. имеет дискретный характер.

Вывод о существовании в природе элементарного электрического заряда был сделан Германом - Людвигом - Фердинандом Гельмгольцем (1821—1894) в конце прошлого века (1881 г.), когда в науке еще не существовало представления о дискретности электрического заряда и об электроны.

В речи Гельмгольца, посвященной памяти Фарадея, впервые прозвучала идея о существовании в природе элементарной порции электричества.

«Если мы допускаем существование химических атомов, то мы принуждены заключить отсюда далее, что также и электричество, как положительное, так и отрицательное, разделяется на определенные элементарные количества, которые играют роль атомов электричества».

В настоящее время эти выводы не вызывают сомнений. Значение элементарного заряда, вычисленное на основании закона электролиза, совпадает со значением заряда электрона, которое в дальнейшем было получено при исследовании ряда других явлений.

Глава XIII

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК В ВАКУУМЕ

§ 60. Условия существования тока в вакууме

Когда говорят о токе в вакууме, то имеют в виду высокий вакуум. Для создания такого вакуума необходимо разрежение, при котором в оставшемся газе средняя длина свободного пробега молекул больше размеров сосуда или расстояния между электродами в сосуде. Следовательно, если в сосуде создан вакуум, то молекулы в нем почти не сталкиваются между собой и пролетают свободно межэлектродное пространство. При этом они испытывают соударения лишь с электродами или со стенками сосуда. Очевидно, что разрежение, необходимое для достижения такого вакуума, зависит не только от давления газа, но и от размеров сосуда, в котором он находится. Например, для расстояния между электродами в 10 см высокий вакуум достигается при давлении газа в сосуде от 10^{-3} мм рт. ст. и ниже. Полезно подчеркнуть, что даже при достижении высокого вакуума, например, при $p = 10^{-7}$ мм рт. ст.

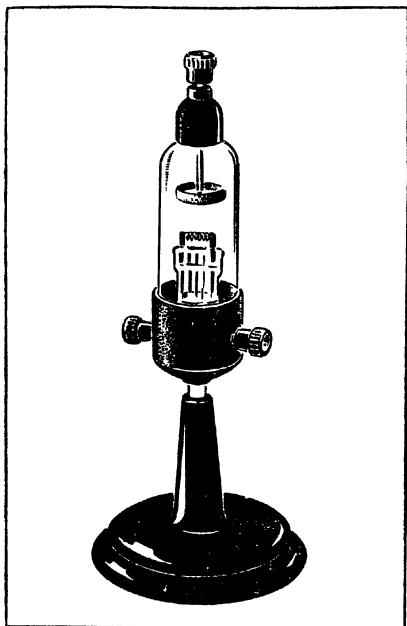


Рис. 108.

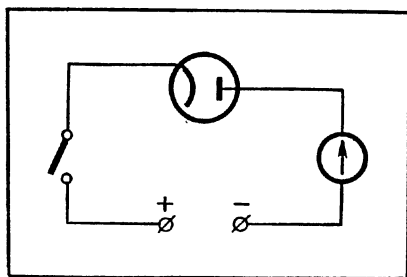


Рис. 109.

в 1 см^3 газа еще содержится несколько миллиардов молекул. В настоящее время удалось достичь сверхвысокого вакуума, при котором давление воздуха, оставшегося в сосуде, составляет 10^{-12} мм рт. ст.

Для выяснения условия существования тока в вакууме следует поставить опыт с вакуумным диодом. В качестве такого прибора используют вакуумный диод с термокатодом прямого накала, выпускаемый Главучтехпромом (рис. 108). В этой лампе давление оставшегося воздуха 10^{-5} мм рт. ст., т. е. в лампе создан высокий вакуум.

Необходимо прежде всего продемонстрировать, что вакуум становится проводящей средой только при внесении в него свободных носителей заряда, например при термоэлектронной эмиссии. Включив диод в цепь с демонстрационным гальванометром (рис. 109), легко показать, что, пока катод не накален, тока в цепи лампы нет. Для того чтобы обосновать, что с раскаленного катода лампы вылетают частицы, заряженные отрицательно, ставят следующий опыт [ДЭ, I, с. 122].

Укрепляют на стержне электрометра один из дисков (рис. 110),

а второй, с изолирующей рукояткой, кладут на первый диск. Корпус электрометра и верхний диск соединяют между собой и заземляют. Включают цепь накала и устанавливают ярко-красное свечение катода. Проводником на изолирующей ручке (из комплекта к электрометрам) соединяют на короткое время вывод анода лампы с нижним конденсаторным диском. Электрометр при этом получает небольшой заряд, который недостаточен для отклонения стрелки. После этого поднимают верхний диск, что приводит к значительному изменению емкости прибора и возрастанию разности потенциалов между стрелкой и корпусом. Вследствие этого стрелка заметно откло-

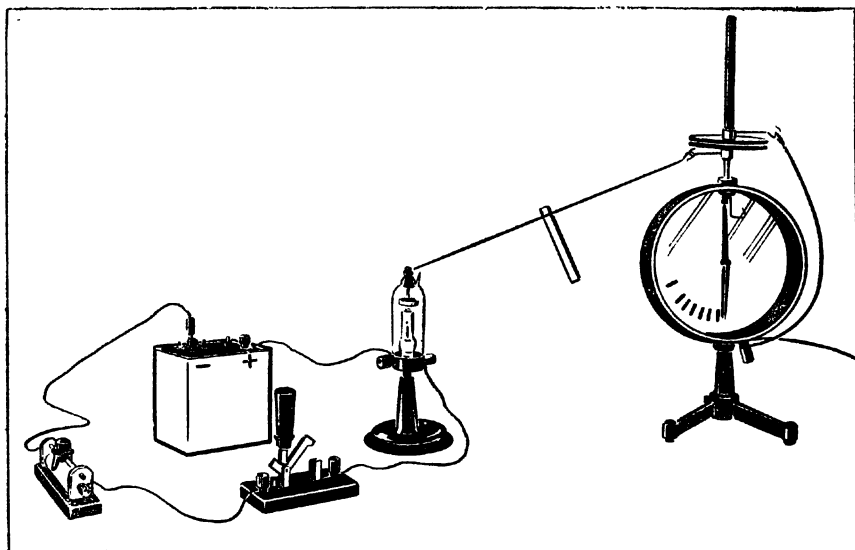


Рис. 110.

няется. С помощью заряженной палочки определяют знак заряда электрометра и устанавливают, что стержень получил отрицательный заряд. Если при повторном проведении опыта накалить нить до ярко-оранжевого свечения, то отклонение стрелки электрометра увеличится. Это еще раз подтверждает, что заряд на аноде получается за счет термоэлектронной эмиссии. Таким образом, этот опыт дает возможность установить связь между температурой катода и появлением заряда на аноде.

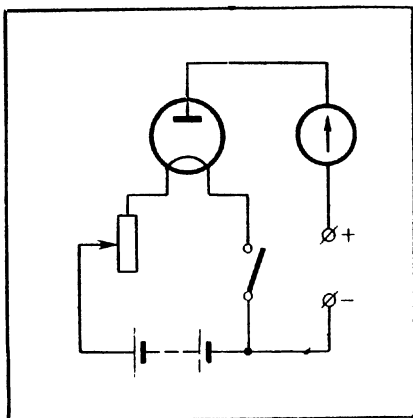


Рис. 111.

После демонстрации термоэлектронной эмиссии показывают, как при помощи этого явления можно получить электрический ток, если между электродами вакуумного диода будет создано электрическое поле. Для этого собирают цепь по схеме, указанной на рисунке 111.

При включенном анодном напряжении постепенно увеличивают накал катода. В цепи возникает ток, который быстро растет по мере увеличения температуры нити. Обращают внимание учащихся на то, что в данном опыте положительный полюс источника напряжения подключен к аноду, а отрицательный — к нити накала

и что только при таком включении возможен ток в цепи. Показывают отсутствие тока, когда к аноду подключен отрицательный полюс, а к катоду — положительный.

Эти опыты объясняют на основе понятия работы выхода. В учебном пособии «Физика, 9» вместо термина «работа выхода» говорится в описательном плане об энергии связи электрона с кристаллом.

По мере увеличения температуры катода растет число электронов, энергия которых становится достаточной для совершения работы выхода. Поэтому при достижении высокой температуры значительное число электронов вылетает из катода в межэлектродное пространство, и в цепи появляется заметный ток. Уместно провести аналогию между интенсивным испарением жидкости при ее нагревании и электронной эмиссией накаливаемого металла, рассматривая последнюю как «испарение» электронов из металла.

§ 61. Вольт-амперная характеристика вакуумного диода

Зависимость силы тока от напряжения для вакуумных приборов может быть выяснена на примере двухэлектродной электронной лампы. Вначале следует рассмотреть процессы, которые происходят при накаленном катоде и при отсутствии поля между электродами. Объясняют, что электроны, вылетающие из катода, образуют вокруг него своеобразное электронное облако.

Через некоторое время после того как катод накалился, наступает динамическое равновесие—число вылетающих из катода и влетающих в него обратно электронов за единицу времени одинаково. После установления динамического равновесия, несмотря на непрерывный вылет электронов, число их в облаке не меняется.

Здесь уместно продолжить аналогию между эмиссией электронов и испарением жидкости. Между жидкостью и ее насыщающим паром устанавливается динамическое равновесие, после чего, несмотря на продолжающееся испарение, плотность насыщающего пара не меняется. С повышением температуры число молекул, ежесекундно вылетающих из жидкости, увеличивается. После этого вновь наступает динамическое равновесие, но уже при большей плотности паров.

Для изучения зависимости силы тока от напряжения собирают цепь по схеме (рис. 112), которую вычерчивают на доске. Плавной регулировки напряжения достигают при помощи потенциометра, который включен в анодную цепь. Источником анодного напряжения служит

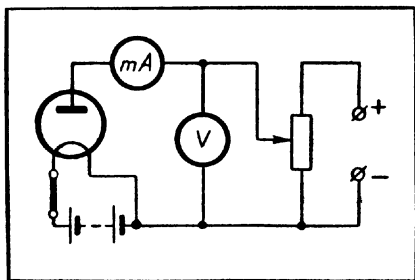


Рис. 112.

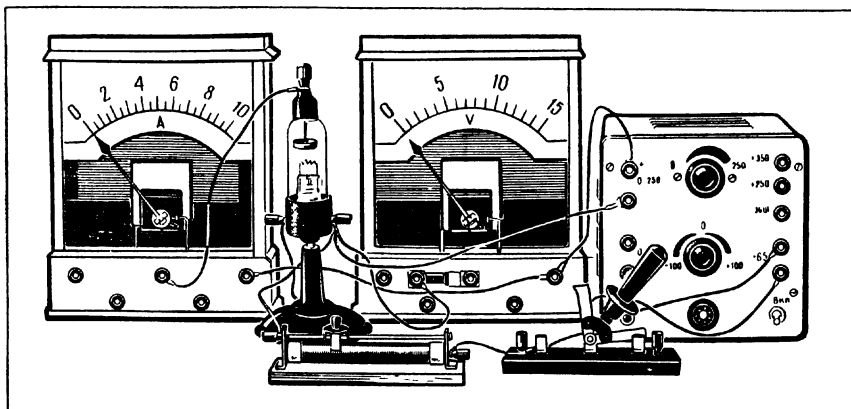


Рис. 113

кенотронный выпрямитель. Больше всего подходит для этой цели выпрямитель с регулятором напряжения (ВУП-1 или ВУП-2). В этом случае отпадает необходимость в потенциометре. Выпрямитель удобен еще и тем, что в нем есть специальные выводы для питания цепи накала.

На рисунке 113 показана установка для изучения зависимости силы тока от напряжения с использованием в качестве источника регулируемого напряжения выпрямителя ВУП-1. Силу тока измеряют в условных единицах гальванометром со шкалой на 10 делений.

Собранную установку следует рассмотреть несколько подробнее, выделив в ней цепь накала и анодную цепь. Надо разъяснить функцию каждой цепи, указав, что и как зависит от тока накала и от анодного напряжения.

По результатам изучения зависимости силы тока от напряжения строят вольт-амперную характеристику диода. Для этого на доске чертят координатные оси с соответствующим обозначением и сетку для таблицы. Устанавливают средний ток накала (ярко-красное свечение нити) и, последовательно изменяя напряжение через каждые 10 В, записывают в таблицу значения напряжений и соответствующие им значения силы тока в условных единицах. Ниже приведена таблица для одного из опытов с указанной выше аппаратурой.

Напряжение, В	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Сила тока в условных единицах	0,2	0,5	2,3	4,4	6,2	7,2	8	8	8	8

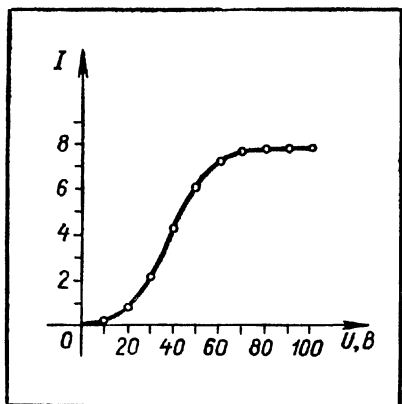


Рис. 114.

По полученным данным строят график (рис. 114).

Анализируя график, обращают внимание учащиеся на то, что с увеличением напряжения сначала ток увеличивается, потом рост тока замедляется и, наконец, величина тока перестает увеличиваться, хотя напряжение продолжает расти. На последний факт учащиеся сами обратят внимание при измерениях. Разъясняют, что горизонтальному участку графика соответствует явление насыщения, и определяют силу тока насыщения.

Следует сравнить полученный график с вольт-амперной характеристикой металлического проводника и отметить их различие. Это даст возможность более контрастно подчеркнуть особенность зависимости силы тока от напряжения для вакуумного диода — нелинейный характер этой зависимости.

После этого переходят к рассмотрению механизма проводимости диода и объяснению экспериментально полученной зависимости силы тока от напряжения.

Вокруг накаливаемого катода создается пространственный заряд — электронное облако. Если в межэлектродном пространстве создать поле, напряженность которого направлена от анода к катоду, то электроны, заряженные отрицательно, устремятся из облака к аноду, что нарушит динамическое равновесие, которое существовало между числом электронов, вылетающих из катода и влетающих в него обратно. Действие поля аналогично ветру, который, удаляя пары над жидкостью, нарушает существовавшее динамическое равновесие между испарением и конденсацией (в случае насыщающего пара).

По мере роста напряжения все большая часть электронов будет двигаться к аноду и все меньшая часть их возвращаться в катод. Вследствие этого анодный ток будет расти. При достаточно большом напряжении электронное облако около катода настолько уменьшится, что оно уже не сможет препятствовать движению электронов непосредственно из катода к аноду. Теперь все электроны, вылетающие из катода, будут достигать анода. Если после этого повысить напряжение, то ток уже не будет расти, так как при данной температуре нет резервов для его увеличения. Следует, однако, иметь в виду, что последний вывод справедлив лишь для катодов из чистых металлов.

Рассмотренные процессы можно проиллюстрировать рисунком, который даст возможность связать отдельные участки вольт-ампер-

ной характеристики с состоянием электронного облака (рис. 115).

Пространственный заряд, созданный электронами, на небольшом расстоянии от катода (порядка долей миллиметра) является причиной нелинейной зависимости силы тока от напряжения в вакуумном диоде. Этот заряд создает поле, которое тормозит движение электронов, вылетающих из катода. Причем тормозящее действие этого поля уменьшается с увеличением анодного напряжения, так как по мере увеличения анодного напряжения уменьшается величина пространственного заряда. Это и служит причиной нелинейной зависимости силы тока от напряжения для вакуумного диода в интервале напряжений от нуля до насыщения.

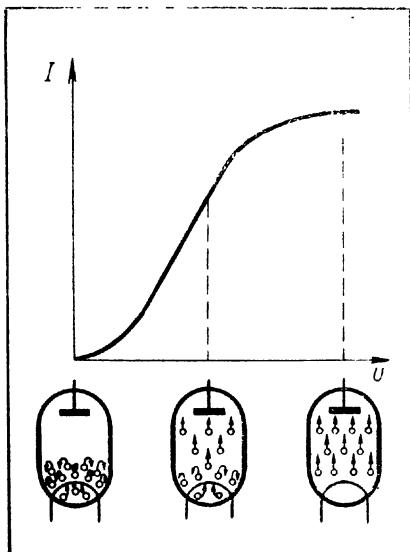


Рис. 115.

Отмечают, что вакуумный диод благодаря свойству пропускать ток лишь в одном направлении применяют для выпрямления переменного тока. Диоды, которые используют для выпрямления переменного тока, называют кенотронами. Если при установке зависимости силы тока от напряжения был использован кенотронный выпрямитель, то на этот факт следует обратить внимание учащихся.

Так как механизм термоэлектронной эмиссии недоступен для непосредственного наблюдения, то целесообразно использовать возможности условного показа этого явления средствами мультимедии. С этой целью может быть использован учебный кинофильм «Диод». В нем не выделены отдельные фрагменты, но, несмотря на это, фильм желательно показать по частям.

Первая половина фильма посвящена устройству диода и работе термокатода. Ее целесообразно показать после объяснения механизма термоэлектронной эмиссии.

Вторая половина кинофильма посвящена зависимости силы тока от напряжения и явлению односторонней проводимости диода. Эту половину фильма также следует показать после изучения соответствующего учебного материала. Необходимо обратить внимание, что в кинофильме применена имитация диода, а не реальная лампа. Учащиеся должны понимать, что реальное электронное облако недоступно для визуального наблюдения.

Учащиеся более глубоко и прочно усвоят особенности тока в вакууме, если после изучения всех рассмотренных вопросов

обобщить пройденный материал, сравнивая природу и закономерности тока в вакууме и тока в металлическом проводнике.

Это сравнение проводят в беседе путем постановки перед учащимися соответствующих вопросов. Ряд вопросов рассматривает и обобщает сам учитель. В этой беседе устанавливают, что для обеих сред электрический ток представляет собой движение электронов под действием электрического поля, но что ток в вакууме отличается от тока в металле по характеру движения электронов. Ток в металле существует одновременно с беспорядочным движением электронов. Электроны движутся, непрерывно «сталкиваясь» с ионами кристаллической решетки металла и меняя направление своего движения. Вследствие этого средняя дрейфовая скорость электронов в направлении действия сил поля очень мала. Даже для самых сильных полей, которые могут быть созданы в металлическом проводнике при максимально допустимом его нагреве, эта скорость имеет значение порядка 10^{-3} — 10^{-4} м/сек.

В вакуумном диоде электроны летят от катода к аноду ни с чем не сталкиваясь и под действием поля их скорость непрерывно увеличивается. В результате этого скорость электронов у анода достигает очень больших значений. Даже в маломощных лампах радиоприемников скорость электронов у анода имеет значение порядка нескольких тысяч километров в секунду. Таким образом, скорость направленного движения электронов в вакуумном диоде в десятки миллиардов раз больше средней скорости направленного движения электронов в металле.

Для металла сила тока определяется законом Ома. Ток в вакуумном диоде не подчиняется закону Ома. Вольт-амперные характеристики для металла и вакуума существенно отличаются.

Если в цепи с осветительной лампой или электроплиткой поменять направление тока, то сила тока в этой цепи не изменится, не изменится и интенсивность действия тока — лампа и плитка будут также накалены. Проводимость металлов не зависит от направления тока в них. Диод пропускает ток только в одном направлении. При изменении направления тока в цепи с диодом ток прекращается. Для получения тока в металле достаточно создать лишь поле в нем, так как свободные электроны всегда есть в металле. Для создания тока в вакууме наличия поля между электродами диода недостаточно. Необходимо еще каким-нибудь видом эмиссии обеспечить проводимость межэлектродного промежутка, т. е. проводимость вакуума несамостоятельная.

§ 62. Электронно-лучевая трубка

Познакомиться с устройством и принципом действия электронно-лучевой трубки удобно с помощью осциллографической трубки Л0709А с электростатическим управлением. Эта трубка удобна тем, что весь ее баллон прозрачен и сквозь него видны пластины отклоняющей системы и электронный прожектор. Экран трубки имеет

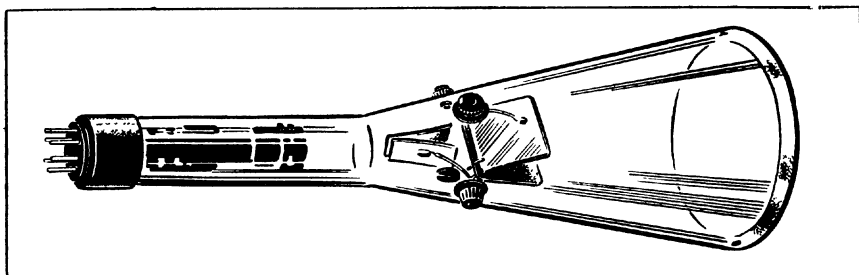


Рис. 116.

достаточно большие размеры. Трубка может работать от сравнительно невысокого напряжения.

Для проведения опытов с этой трубкой необходимо изготовить соответствующую демонстрационную установку. Такая установка разработана в Институте общего и политехнического образования АПН РСФСР. Первоначально она была рассчитана на напряжение 2000 В¹, а затем переделана на более низкое напряжение [ДЭ, II, стр. 140]. На рисунке 116 изображен общий вид этой демонстрационной электронно-лучевой трубки, а на рисунке 117 дана схема питания трубки для получения электронного пучка, а также для его фокусировки и регулировки яркости светящегося пятна на экран. Резисторы R_3 , R_4 , R_5 , R_6 служат для предотвращения накопления зарядов на отклоняющих пластинах вследствие попадания на них рассеянных электронов. Накопление зарядов на пластинах привело бы к искажениям в отклонении электронного луча.

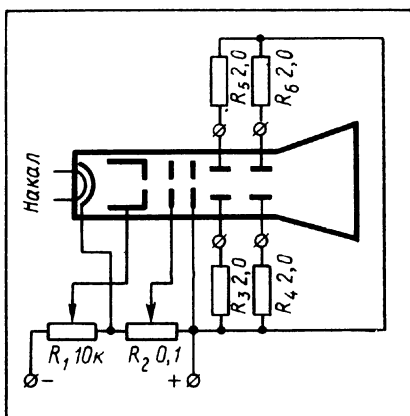


Рис. 117.

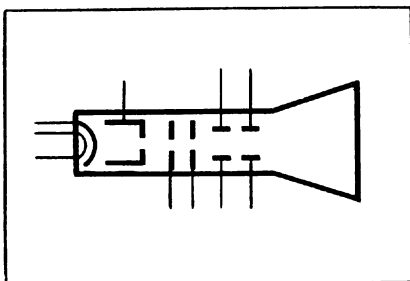


Рис. 118.

¹ См.: Шахмаев Н. М. Основные демонстрации при изучении электромагнитного поля. М., 1960, с. 96.

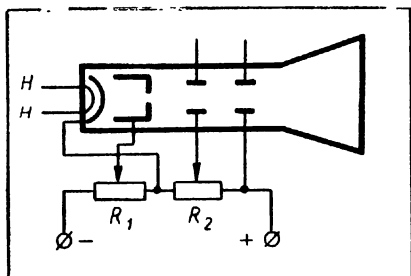


Рис. 119.

По трубке можно показать лишь последовательность их расположения. После того как трубку подключают к источнику напряжения, можно будет показать свечение нити накала.

После объяснения устройства электронно-лучевой трубки ее подключают к соответствующим клеммам выпрямителя ВУП-2. Вычерчивают простейшую схему питания трубки (рис. 119) и объясняют, как подводят необходимые напряжения к электродам электронного прожектора и как они могут изменяться. Обращают внимание, что на управляющий электрод подают отрицательный потенциал по отношению к катоду.

Подключают выпрямитель к сети и наблюдают появление на экране светящегося пятнышка. Поворачивая ручки потенциометров, показывают, как управляют яркостью и фокусируют луч. Яркость регулируют управляющим электродом. Изменяя величину отрицательного потенциала управляющего электрода по отношению к катоду, можно в различной степени ослабить интенсивность пучка, т. е. регулировать число электронов, вылетающих из его отверстия, и тем самым изменять яркость свечения тех мест экрана, в который попадает пучок электронов.

Из управляющего цилиндра электроны вылетают слегка расходящимся пучком. Пучок еще больше расширяется от взаимного отталкивания электронов. На экране же необходимо получить достаточно малое светящееся пятнышко с диаметром порядка долей миллиметра. Для этого надо сфокусировать пучок электронов.

Электронный луч фокусируется при помощи электрического поля между анодом и фокусирующим электродом. Так как потенциал анода больше потенциала фокусирующего электрода, то силовые линии поля будут направлены от анода к фокусирующему электроду (рис. 120). В каждой точке поля на электроны действует сила, направленная по касательной к силовой линии в данной точке. Электроны, влетающие в фокусирующий цилиндр вдоль его оси 1, движутся с ускорением, не меняя направления движения, так как в этом случае сила, с которой поле действует на электрон, совпадает с направлением его скорости. На электроны, влетающие в цилиндр под углом к оси 2, действует сила F , не совпадающая с направлением их скорости. Горизонтальная составляющая этой силы

Для объяснения устройства электронно-лучевой трубки чертят на доске ее условное схематическое обозначение (рис. 118) или показывают плакат. Схематическое изображение окажет существенную помощь при изучении электронно-лучевой трубки, так как не все ее части можно рассмотреть. Например, трудно выделить детали электронно-оптической системы.

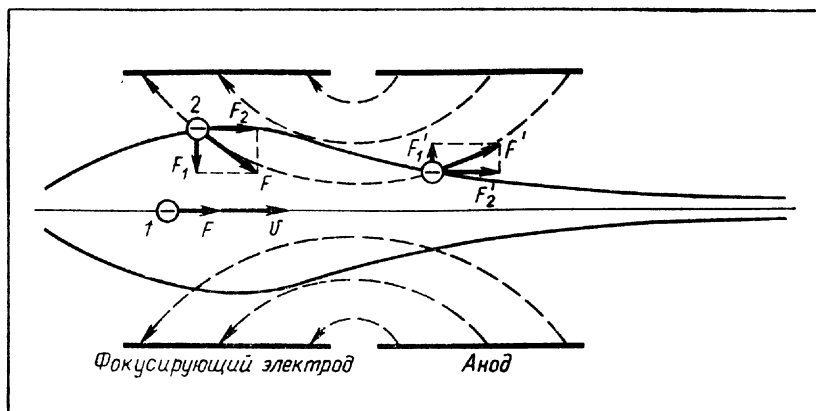


Рис. 120.

увеличивает скорость электрона, а вертикальная составляющая F_1 искривляет его траекторию. Причем искривление направлено к оси цилиндра. Таким образом, под действием электрического поля расходящийся пучок в конце фокусирующего цилиндра станет сходящимся. Этот пучок попадает во второй цилиндр (анод), где вертикальная составляющая силы, действующей на электрон F_1' , направлена в сторону от оси к поверхности цилиндра. Под действием этой силы траектория электронов искривляется, но уже в другую сторону, причем величина искривления значительно меньше, чем в фокусирующем цилиндре. Горизонтальная составляющая скорости электронов все время увеличивается, и поэтому во втором цилиндре она будет гораздо больше, чем в первом, а величина смещения заряженных частиц в электрическом поле обратно пропорциональна их скорости. Двигаясь быстрее, электрон меньшее время находится под действием сил поля, и поэтому траектория искривляется меньше, чем в первом цилиндре. В результате этого получается пучок электронов, сходящийся под небольшим углом.

Изображение светящегося пятна на экране будет минимальным (луч хорошо сфокусирован), если электронный пучок будет сходиться на экране трубки. Луч фокусируется изменением напряжения между фокусирующим электродом и анодом с помощью потенциометра R_2 (см. рис. 119). Если подвижный контакт потенциометра находится в правом крайнем положении, то напряжение между этими электродами равно нулю и они не оказывают фокусирующего действия. Если подвижный контакт потенциометра находится в левом крайнем положении, то напряжение между фокусирующим электродом и анодом и соответственно напряженность поля в каждой точке между ними максимальны. В результате фокусирующее действие этих электродов наибольшее. Плавно поворачивая ручку потенциометра, получают необходимую фокусировку луча.

Катод вместе с управляющим и фокусирующим электродами и анодом называют электронной пушкой (или электронным прожектором). Ее функция состоит в том, чтобы создать сфокусированный пучок электронов определенной интенсивности. При нормальной работе электронной пушки в центре экрана получается яркое пятнышко диаметром в доли миллиметров. Этим обеспечивают исходные условия для основной работы электронно-лучевой трубки, которая состоит в отклонении электронного пучка под действием различных электрических сигналов. В результате отклонения луча светящееся пятнышко «прочерчивает» на экране график, характеризующий этот процесс.

Удобно показать управление электронным лучом, используя дополнительные клеммы выпрямителя, с которых можно получить регулируемое напряжение ± 100 В. Подключив эти клеммы выпрямителя к пластинам горизонтальной развертки, показывают отклонение луча влево и вправо. Таким же образом показывают отклонение луча в вертикальном направлении. Одновременно показывают, что величина смещения луча от центра пропорциональна напряжению, приложенному к отклоняющим пластинам, и что луч отклоняется в сторону пластины, к которой подключен положительный полюс источника.

В случае отсутствия выпрямителя напряжение для отклонения луча можно создать сухой анодной батареей и потенциометром или используя напряжение постоянного тока от школьного электро-распределительного щита. В последнем случае напряжение надо брать через фильтр (из конденсаторов и дросселя). При пользовании щитом отпадает необходимость в потенциометре.

Если к пластинам отклоняющей системы подключить регулируемое переменное напряжение, то на экране будет наблюдаться светящаяся горизонтальная (или вертикальная) линия. Длина этой линии зависит от приложенного напряжения.

Можно показать отклонение электронного луча при помощи магнитного поля. Подносят магнит к горловине трубки между электронным прожектором и отклоняющей системой и наблюдают смещение светящейся точки. Меняя направление полюсов магнита, показывают отклонение ее в противоположном направлении. Отклонение электронных пучков магнитным полем будет рассматриваться после изучения силы Лоренца в теме «Магнитное поле тока».

Существуют электронно-лучевые трубки с электростатическим и магнитным управлением.

Следует сообщить учащимся, что электронно-лучевые трубки широко применяют в электронных осциллографах, телевизорах (см. цветную вклейку IV) и многих других электронных устройствах.

Целесообразно показать учебный кинофильм «Электронно-лучевая трубка», состоящий из двух частей общей продолжительностью 20 мин. Этот фильм ценен тем, что дает наглядные представления о таких явлениях, демонстрация которых в школьных условиях затруднена или совсем невозможна. Фильм следует демон-

стрировать по частям после изучения соответствующего материала. Первая часть фильма в основном посвящена устройству трубки, получению и формированию электронного луча, устройству отклоняющей системы и управлению лучом. Средствами мультипликации все это удалось показать в динамике. В этой части также кратко показан процесс изготовления электронно-лучевых трубок.

Глава XIV

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК В ГАЗАХ

§ 63. Несамостоятельный разряд в газах

Изучение электрического разряда в газе позволяет расширить и углубить знания учащихся по основам электронной теории, познакомиться с применением газового разряда в технике.

Весь учебный материал данной темы можно разделить на ряд логически завершенных частей, расположенных в следующей последовательности: 1) самостоятельный разряд в газе, 2) самостоятельный разряд (включая и понятие о плазме), 3) виды самостоятельного разряда при атмосферном давлении и их применение, 4) самостоятельный разряд при пониженном давлении. Ионные электровакуумные приборы.

Изучение самостоятельного разряда в газах следует начать с обобщения известных учащимся фактов, которые дают возможность сделать вывод о ничтожной электропроводности газов в обычных условиях.

Далее показывают, что при некоторых условиях можно заметно повысить электропроводность газа. Достаточно подействовать пламенем спички на воздух около заряженного электроскопа, как он сразу же разряжается. Из этого опыта делают вывод, что под действием пламени воздух теряет свои изоляционные свойства, т. е. в нем появляются свободные заряды. Воздух, как и другие газы, можно сделать электропроводным и при воздействии на него ультрафиолетового, рентгеновского и радиоактивного излучений.

Выясняют, каким образом под действием указанных выше факторов среди нейтральных частиц газа появляются заряженные частицы и какова их природа.

Для отрыва электрона от атома необходима определенная энергия, называемая энергией ионизации. Она различна для различных атомов. В таблице, помещенной ниже, указана энергия ионизации для атомов некоторых веществ.

Вещество	Гелий	Неон	Аргон	Азот	Кислород	Водород	Литий	Калий	Цезий
Энергия ионизации эВ	24,5	21,5	15,7	14,5	13,6	13,6	5,39	4,33	3,89

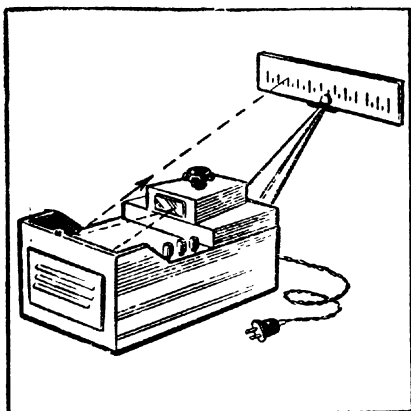


Рис. 121.

Как видно из таблицы, меньше всего энергии требуется для ионизации атомов одновалентных щелочных металлов. Это объясняется тем, что один из электронов этих атомов находится на внешней, наиболее удаленной от ядра орбите и влияние положительного заряда ядра на него ослаблено экранирующим действием электронов внутренних оболочек. Наиболее прочно связаны с ядрами атомов электроны заполненных оболочек инертных газов. Поэтому энергия ионизации для этих атомов имеет наибольшее значение.

После выявления природы носителей заряда в газах можно перейти к изучению вольт-амперной характеристики для самостоятельного разряда.

Очень слабая проводимость газа, создаваемая таким ионизатором, как пламя спиртовки или газовой горелки, требует для постановки опытов по изучению зависимости тока от напряжения чувствительного гальванометра (порядка 10^{-8} А/дел) и источника высокого напряжения постоянного тока. Чувствительность школьного демонстрационного гальванометра, выпускаемого в настоящее время Главучтехпромом, составляет $5 \cdot 10^{-5}$ А/дел, поэтому для опыта необходим зеркальный гальванометр. Такой гальванометр в настоящее время разработан и выпускается промышленностью (рис. 121).

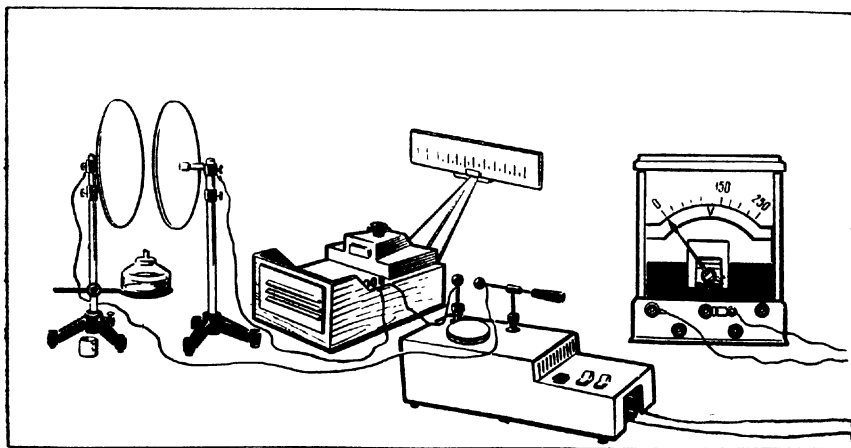


Рис. 122.

Выпрямитель высокого напряжения также выпускается промышленностью.

Для изучения зависимости силы тока от напряжения в газе собирают установку, изображенную на рисунке 122. Зажигают горелку и получают пламя средней интенсивности. Создав поле между электродами, обнаруживают возникновение тока и увеличение его с ростом напряжения. График, построенный по результатам этого опыта, представляет собой вольт-амперную характеристику несамостоятельного разряда в газе (рис. 123).

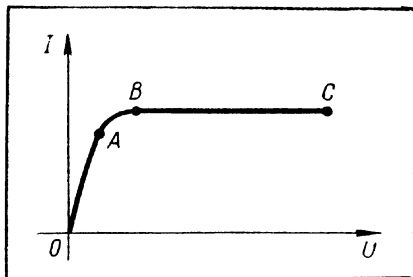


Рис. 123.

Ионизатор (пламя) определенной интенсивности каждую секунду создает в пространстве между электродами некоторое число ионов и электронов. Столько же ионов и электронов, соединяясь между собой, образуют нейтральные атомы. Такое динамическое равновесие существует до тех пор, пока между электродами нет электрического поля. Как только между электродами будет создано поле, сразу же на частицы, несущие заряды разного знака, начнут действовать силы, направленные в противоположные стороны. Поэтому наряду с беспорядочным движением, заряженные частицы будут перемещаться в направлении действия на них электрического поля. Это их упорядоченное движение под действием электрического поля и представляет собой ток в газе.

По мере увеличения напряжения между электродами растет и напряженность поля между ними, а следовательно, увеличиваются силы, действующие на заряженные частицы. Вследствие этого все большее их число из каждую секунду образуемых ионизатором достигает электродов. Это приводит к тому, что сила тока растет прямо пропорционально напряжению (участок OA графика).

Когда под действием поля большая часть заряженных частиц, из каждую секунду создаваемых ионизатором, будет достигать электродов, резервы для дальнейшего роста тока уменьшатся и прямая пропорциональность между током и напряжением нарушится (участок AB графика).

Когда же резервы для роста тока полностью исчерпаются, т. е. все каждую секунду создаваемые ионы будут достигать электродов, рост тока прекратится — наступит насыщение (участок BC), при этом рекомбинация заряженных частиц прекратится.

После достижения насыщения дальнейшее увеличение силы тока возможно лишь путем увеличения интенсивности ионизатора. Усиливают пламя горелки и наблюдают возрастание тока.

§ 64. Самостоятельный разряд в газах

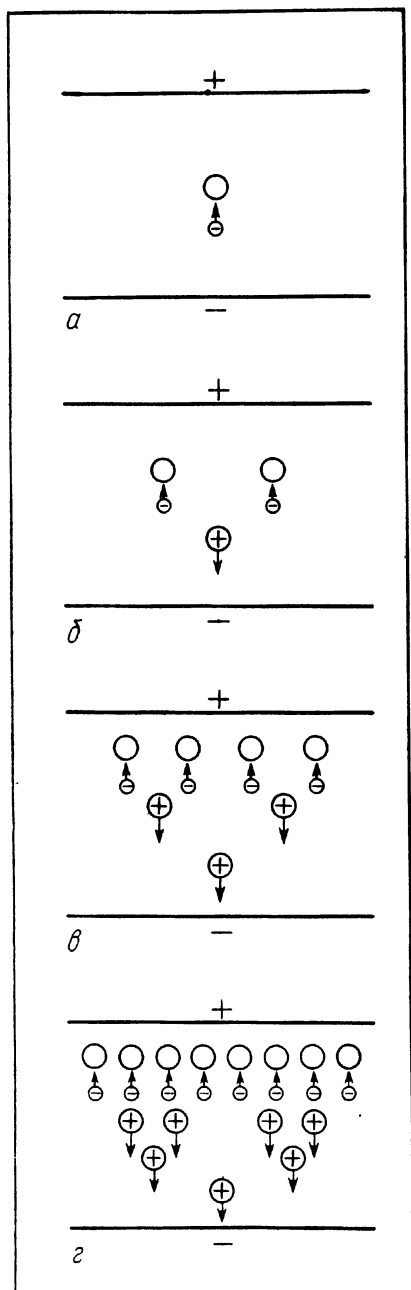


Рис. 124.

Для изучения самостоятельного разряда в газе используют ту же установку, что и при изучении несамостоятельного разряда (см. рис. 122), однако, чтобы достичь необходимой в этом случае напряженности электрического поля, сближают электроды (до расстояния в несколько миллиметров) и увеличивают напряжение до максимального значения. Ссылаясь на формулу $E = \frac{U}{l}$, объясняют, почему напряженность поля при этом повышается.

Исследуя зависимость силы тока от напряжения, обнаруживают, что после насыщения, начиная с некоторого значения напряжения (6—8 кВ), сила тока вновь начинает возрастать и затем резко увеличивается. Одновременно с этим между электродами проскакивают искры.

Длина свободного пробега электронов в газе при атмосферном давлении мала. Поэтому при сравнительно небольшой напряженности электрического поля электроны сталкиваются с атомами, не успевая накопить значительной энергии от ускоряющего действия поля. Таким образом, при движении электронов в направлении к положительному электроду расходуется значительная часть энергии поля, которая превращается в энергию хаотического движения атомов. В этом одна из причин малой электропроводности газов при атмосферном давлении. Но если напряженность поля возрастает

настолько, что за время свободного пробега электрон успеет приобрести энергию, достаточную для того, чтобы при столкновении с атомом выбить из него электрон, т. е. ионизовать его, то наступит качественно новое явление — резкое возрастание тока в цепи, сопровождающееся свечением газа.

Чтобы объяснить причину этого явления, рассматривают движение одного электрона на пути к положительному электроду. При столкновении с атомом (рис. 124, а) электрон теряет значительную часть своей энергии на его ионизацию, но в результате этого образуется еще один электрон и положительный ион, т. е. вместо одной заряженной частицы — три (два электрона и один ион; рис. 124, б). Эти два электрона, двигаясь в сильном поле, при столкновении с атомами ионизуют их, в результате чего образуются еще два иона и два электрона (рис. 124, в). При дальнейшем движении этих электронов и столкновении их с атомами станет восемь электронов (рис. 124, г), а затем шестнадцать и т. д. Таким образом, число электронов, а следовательно, и ионов будет расти в геометрической прогрессии — лавинообразно. Причем лавина электронов порождается одним электроном, возникшим вследствие действия ионизатора. Так как в объеме газа ионизатор каждую секунду создает много таких первичных электронов, то ток резко возрастает.

Поясняя рисунок 124, следует предупредить учащихся, что он иллюстрирует лишь некоторое приближение к истинной картине рассматриваемого процесса и характеризует в основном количественную сторону явления.

Следует более подробно остановиться на условии возникновения самостоятельного разряда. Это тем более важно, что данный вопрос трактуется не всегда правильно. Например, в ряде пособий роль электронов и ионов в процессе лавинного нарастания тока отождествляется, возникновение самостоятельного лавинного разряда рассматривается как начало самостоятельного разряда.

Если после возникновения ионизации атомов при соударении их с электронами, не повышая напряжения, изолировать газовый промежуток между электродами от действия ионизатора, то ток почти сразу прекратится. Следовательно, и на этой стадии разряд еще не самостоятельный, хотя в нем и образуются заряженные частицы. Чтобы объяснить, почему возникновение ионизации атомов при соударении их с электронами не является достаточным условием для перехода самостоятельного разряда в самостоятельный, необходимо несколько подробнее выяснить роль электронов и ионов в образовании лавин.

Так как средняя длина свободного пробега электронов больше, чем у ионов, то, двигаясь под действием электрического поля, электроны от столкновения до столкновения приобретают гораздо большую кинетическую энергию, чем ионы. Поэтому, когда при увеличении напряженности поля энергия электронов достигает необходимой для ионизации атома величины, энергия ионов будет

далеко не достаточной для этого. В основном именно электроны, а не ионы служат источником лавин заряженных частиц.

Следовательно, если в газе окажется хотя бы один электрон, то под действием сильного поля может начаться лавинообразное нарастание числа заряженных частиц в газе, но ток при этом будет кратковременным: лавина электронов перенесет определенный заряд к аноду, а лавина положительных ионов — соответствующий заряд к катоду; пространство между электродами освободится от заряженных частиц, и ток прекратится.

Разъяснив это, следует уточнить роль положительных ионов в образовании лавин заряженных частиц. Достигая катода, ионы бомбардируют его. Если при этом их энергия больше работы выхода электронов из катода, то возникает электронная эмиссия, которая может привести к новому качественному изменению в газовом разряде, так как создаются условия, при которых он сам себя поддерживает: электроны, возникающие вследствие эмиссии, служат источниками новых лавин электронов и ионов, а ионы, достигая катода, выбивают из него новые электроны, т. е. разряд продолжается после прекращения действия ионизатора (самостоятельный разряд).

Следует иметь в виду, что для перехода несамостоятельного разряда в самостоятельный недостаточно просто возникновения эмиссии электронов при ударах ионов о катод. Необходимо, чтобы интенсивность этой эмиссии была достаточной для поддержания разряда. Самостоятельный разряд наступает лишь тогда, когда каждый электрон, выбитый из катода ионами, проходя через разрядный промежуток, создает в результате образования лавин такое же число ионов, которое необходимо для выбивания из катода одного нового электрона.

Напряжение, при котором начинается рассмотренный выше процесс, называют напряжением возникновения самостоятельного разряда (напряжение «зажигания» разряда). Это напряжение — одна из существенных характеристик ионных электровакуумных приборов. Его величина зависит от природы газа, давления, расстояния между электродами, материала катода.

Вопросы, связанные с переходом несамостоятельного разряда в самостоятельный, удобно обобщить, рассматривая вольт-амперную характеристику этого перехода. Чертят график (рис. 125), показывающий общий характер зависимости силы тока от напряжения для газа, и

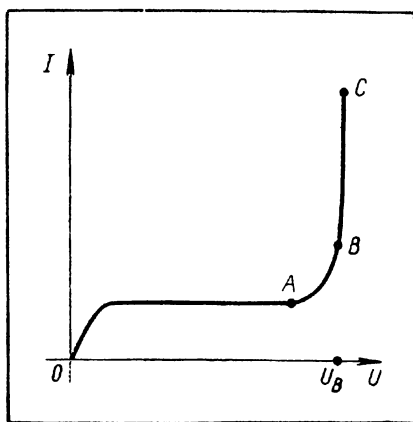


Рис. 125.

рассматривают особенности отдельных его участков. Весь участок OA соответствует несамостоятельному разряду, участок AB — переходной форме разряда (несамостоятельному лавинному разряду) и участок BC — самостоятельному разряду. Обращают внимание, что на участке BC сила тока резко возрастает даже при незначительном увеличении напряжения. Точка B соответствует напряжению возникновения самостоятельного разряда.

После изучения самостоятельного разряда рассматривают его разновидности при атмосферном давлении: искровой, коронный и дуговой. Наряду с выяснением условий возникновения и особенностей этих видов разряда следует подробно рассмотреть их применения: электроискровую обработку металлов, различные виды дуговой сварки, электрофильтр. Желательно также познакомить учащихся со способом устранения потерь на коронный разряд в высоковольтных линиях электропередач.

Для иллюстрации рассматриваемых видов разряда и их применений целесообразно наряду с демонстрационным экспериментом [(ДЭ, II, опыты 85—87)] использовать учебные кинофильмы «Электроискровая обработка металлов» (10 мин.) и «Электрическая сварка металлов» (10 мин.).

§ 65. Понятие о плазме

В процессе самостоятельного разряда между электродами образуется низкотемпературная плазма. Следовательно, изучая самостоятельный разряд, учащиеся фактически знакомятся с некоторыми свойствами плазмы (значительная концентрация заряженных частиц, высокая проводимость и др.). Поэтому целесообразно ввести понятие о плазме именно в этом месте курса. При этом начать изучение плазмы можно с разъяснения того, что ионизованный газ, получаемый в процессе самостоятельного разряда, представляет собой особое состояние вещества, которое называют плазмой.

Газ можно привести в состояние плазмы также при нагревании его до высокой температуры. Рассчитаем температуру, при которой средняя кинетическая энергия молекул будет достаточной для их ионизации при столкновениях.

Энергия ионизации, например, молекул водорода $E_{\text{и}} = 15,4$ эВ или $E_{\text{и}} = 15,4 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}$ Дж. Следовательно, условие ионизации для водорода:

$$\frac{3}{2} kT \geq E_{\text{и}}.$$

Отсюда

$$T \geq \frac{2}{3} \frac{E_{\text{и}}}{k}; \quad T \geq 10^4 \text{ К}.$$

Чем выше температура, тем выше степень ионизации плазмы. При 160 000 К водородная плазма полностью ионизована, т. е. все

составе уже отсутствуют нейтральные атомы или молекулы. При температуре порядка миллиона градусов любое вещество находится в состоянии плазмы. Все звезды, в том числе и Солнце, состоят из плазмы, так как в их недрах температура достигает десятков и сотен миллионов градусов.

Различают холодную и горячую плазму. Деление это весьма условно. До нескольких десятков тысяч градусов плазму считают холодной, а при температурах порядка миллиона градусов и выше — горячей. Газоразрядная плазма представляет собой холодную плазму.

Плазма — это ионизованный газ с достаточно высокой концентрацией заряженных частиц, содержащий практически равное количество положительных и отрицательных зарядов во всех частях объема. При этом в очень малых объемах плазмы временно могут быть незначительные отклонения от этого равенства.

Важно подчеркнуть, что слабоионизованный газ нельзя отнести к плазме. Пока число заряженных частиц в газе мало, электрическое поле, созданное ими, почти не влияет на характер движения отдельных заряженных частиц. Поэтому слабоионизованный газ мало чем отличается от обычного газа. Плазма — это такая газовая среда, в которой концентрация заряженных частиц настолько велика, что поле, созданное ими, уже существенно влияет на характер движения отдельных заряженных частиц. При этом в каждой небольшой части объема газа заряды одного знака препятствуют как удалению зарядов противоположного знака, так и приближению зарядов того же знака. Таким образом, высокая концентрация заряженных частиц создает условие для того, чтобы во всех частях объема было одинаковое количество положительно и отрицательно заряженных частиц, что характерно для плазмы.

При наиболее благоприятных условиях для самостоятельного разряда, когда давление в газе составляет 0,001—20 мм рт. ст., концентрация заряженных частиц доходит до 10^{13} см⁻³. Например, в водородной плазме при давлении 1 мм рт. ст. концентрация электронов составляет 10^{11} см⁻³. Большая концентрация заряженных частиц обуславливает одно из важных свойств плазмы — ее высокую электропроводность.

Применение плазмы в МГД-генераторах может быть рассмотрено на факультативных занятиях, причем после того, как будут изучены индукционные генераторы.

§ 66. Электрический разряд в газах при пониженном давлении

Электрический разряд в разреженных газах демонстрируют с помощью специально приспособленной для этих целей трубки. Необходимое напряжение создается высоковольтным выпрямителем; можно пользоваться также индукционной катушкой или электрофорной машиной.

Перед началом демонстрации напоминают учащимся, что для самостоятельного разряда в газе при атмосферном давлении (искро-

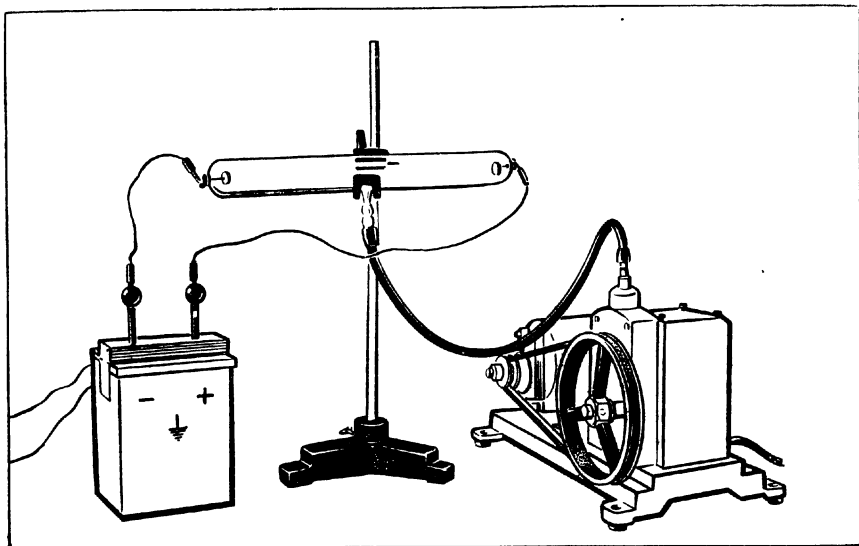


Рис. 126.

вой и коронный разряды) необходимо создать высокую напряженность поля, чтобы при малой длине свободного пробега электроны успевали приобрести достаточную энергию для ионизации атомов или молекул при столкновении с ними. Но такую же энергию электрон может приобрести и при малой напряженности поля, если расстояние свободного пробега будет соответствующим образом увеличено. Следовательно, понизив давление газа и тем самым увеличив длину свободного пробега электронов, можно создать самостоятельный разряд в газе при сравнительно небольшом значении напряженности электрического поля.

Собирают установку (рис. 126) и включают выпрямитель в сеть. Начинают откачивать воздух, и через некоторое время между электродами трубки возникает светящийся разряд в виде малинового извивающегося жгута. Обращают внимание на возникновение разряда, несмотря на то что расстояние между электродами трубки значительно больше расстояния между выводами выпрямителя. Следовательно, опыт подтверждает сделанный ранее вывод, что в разреженных газах самостоятельный разряд наступает при меньшей напряженности поля, чем в газах при атмосферном давлении.

По мере дальнейшего уменьшения давления канал разряда, постепенно расширяясь, заполняет почти все сечение трубки, а около катода появляется темное пространство. При давлении 4—5 мм рт. ст. можно выделить две основные части тлеющего разряда: катодное темное пространство и положительный светящийся столб, который заполняет все остальное пространство до анода. Для наблюдения фарадеева темного пространства и тлеющего

свечения нужно еще снизить давление, что не всегда удается осуществить при помощи насоса Комовского.

Основное внимание следует уделить рассмотрению процессов, происходящих в катодном темном пространстве и положительном светящемся столбе. Предварительно объясняют, как при помощи тонких электродов в виде проволочек, впаянных вдоль трубки, можно установить распределение потенциала между электродами (см. цветную вклейку III).

При атмосферном давлении поле между электродами однородно; потенциал изменяется с расстоянием от катода к аноду по линейному закону. При возникновении тлеющего разряда падение потенциала на единицу длины оказывается неодинаковым в различных частях трубки. Наибольшее падение потенциала, а следовательно, и наибольшая напряженность поля создаются возле катода, так как положительные ионы, движущиеся к катоду, образуют около него пространственный заряд, являющийся причиной высокого положительного потенциала и большой напряженности поля в этой области разряда. Поэтому электроны, вылетающие из катода, сразу оказываются в сильном поле, которое увеличивает их энергию до значения, достаточного для ионизации атомов при столкновении. В свою очередь положительные ионы, двигаясь к катоду, на этом же участке приобретают необходимую энергию для выбивания из катода электронов. Таким образом, создаются условия для возникновения самостоятельного разряда при сравнительно невысоком общем напряжении и большом расстоянии между электродами.

Так как около катода электроны очень быстро приобретают значительную энергию, то в этой области разряда в основном происходят соударения, приводящие не к возбуждению атомов, а к их ионизации. В этом и состоит, главным образом, причина очень незначительного излучения света этим участком разряда. Поэтому рядом со светящимся столбом он выглядит темным.

Среди приборов, основанных на применении тлеющего разряда, большой интерес представляет неоновая лампа — простой и удобный прибор для школьного эксперимента. С ее помощью можно показать возникновение самостоятельного разряда, а также связанное с ним резкое возрастание тока и свечение газа; напряжение, при котором возникает и прекращается самостоятельный разряд; необходимость ограничивающего резистора для предотвращения дугового разряда в конкретной конструкции газоразрядного прибора; различие в режиме работы неоновой лампы и лампы накаливания при одинаковом изменении подводимого к ним напряжения.

Неоновые лампы не нуждаются в особых пусковых устройствах. Для их работы не требуется источника высокого напряжения (они рассчитаны, как правило, на обычное напряжение электросети). Наиболее подходящими для демонстрации опытов являются неоновые лампы марок ТН-20 (рабочее напряжение 220 В) и ТН-30 (127 В). Они имеют размеры обычных осветительных ламп накаливания.

Неоновая лампа представляет собой прибор тлеющего разряда с холодным катодом (см. цветную вклейку III). Баллон лампы заполнен неоном при давлении 2—5 мм рт. ст. (для понижения рабочего напряжения к неону добавляют немного аргона). Электроды покрывают веществом с малой работой выхода для облегчения электронной эмиссии при сравнительно слабых ускоряющих полях. Для обеспечения необходимой напряженности поля при небольших напряжениях расстояние между электродами делают малым—порядка 1 мм. Электроды соединяют с цоколем лампы, как и в лампе накаливания. Так как неоновая лампа работает в режиме самостоятельного разряда, то для ограничения силы тока в цепи последовательно с электродами включают резистор, который в лампах ТН-20 и ТН-30 помещен внутри цоколя. Например, для лампы ТН-20 его сопротивление равно 8,2 кОм. Без ограничивающего резистора тлеющий разряд может перейти в дуговой, вследствие чего может быть выход из строя лампы и короткое замыкание в цепи.

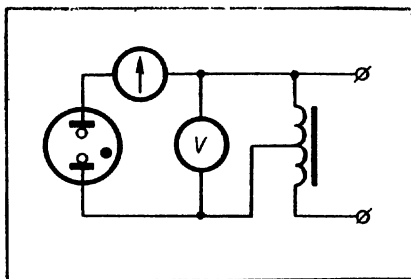


Рис. 127.

Для изучения работы неоновой лампы ее подключают к источнику с регулируемым напряжением переменного тока (Латр или электрораспределительный щит) согласно схеме, изображенной на рисунке 127.

Сначала, по мере увеличения напряжения, никаких признаков газового разряда не наблюдается, так как ток несамостоятельного разряда слишком мал, чтобы его можно было обнаружить демонстрационным гальванометром. При достижении примерно 120 В (для лампы ТН-20) возникает тлеющее свечение и одновременно скачком возрастает сила тока. При дальнейшем повышении напряжения яркость свечения и сила тока в цепи увеличиваются, а с понижением напряжения они соответственно уменьшаются. Лампа гаснет, и сила тока становится практически равной нулю при напряжении на несколько вольт меньшем, чем напряжение, при котором возникает самостоятельный разряд.

Неоновую лампу применяют в различных цепях сигнализации. В этом случае она указывает на наличие или отсутствие определенного напряжения в цепи. Ее оранжево-красный свет хорошо виден при очень малой потребляемой мощности (примерно 1 Вт), что для сигнальных ламп — существенное достоинство.

Трубки с тлеющим разрядом широко применяются для светящихся реклам и др. (см. цветную вклейку III).

Глава XV

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК В ПОЛУПРОВОДНИКАХ

§ 67. Электрические свойства полупроводников

Для того чтобы объяснить учащимся происхождение названия «полупроводники», к изучению которых они приступают, целесообразно рассмотреть таблицу удельных сопротивлений трех групп материалов — металлов, полупроводников и диэлектриков.

Удельные сопротивления материалов

Металлы	Ом · м (при 20°C)	Полупровод- ники	Ом · м (при 20°C)	Диэлектрики	Ом · м (при 20°C)
Серебро	$1,6 \cdot 10^{-8}$	Теллур	$2,5 \cdot 10^{-3}$	Стекло	$2 \cdot 10^{11}$
Медь	$1,7 \cdot 10^{-8}$	Германий	$5,0 \cdot 10^2$	Фарфор	$3 \cdot 10^{12}$
Алюминий	$2,8 \cdot 10^{-8}$	Селен	$10^2 - 10^4$	Эбонит	$2 \cdot 10^{13}$
Сталь	$1,2 \cdot 10^{-7}$	Бор	$6 \cdot 10^3$	Смола	$5 \cdot 10^{14}$
Константан	$4,8 \cdot 10^{-7}$	Кремний	$1,0 \cdot 10^4$	Сера	$1 \cdot 10^{15}$
Нихром	$1,1 \cdot 10^{-6}$	Закись меди	$1,0 \cdot 10^7$	Парафин	$3 \cdot 10^{16}$

Как видно из таблицы, удельные сопротивления полупроводников при комнатной температуре имеют значения, которые находятся в широком интервале, от 10^{-3} до 10^7 Ом · м. Они занимают промежуточное положение между металлами и диэлектриками.

К полупроводникам относится огромное большинство веществ, составляющих примерно 4/5 объема земной коры. Это ряд элементов, большинство минералов, различные окислы, сульфиды, теллуриды и другие химические соединения.

Начать изучение полупроводников необходимо с опытов, показывающих их наиболее характерные свойства, а именно, что сопротивление полупроводников резко изменяется под влиянием некоторых внешних воздействий [ДЭ, II, опыты 55 и 59].

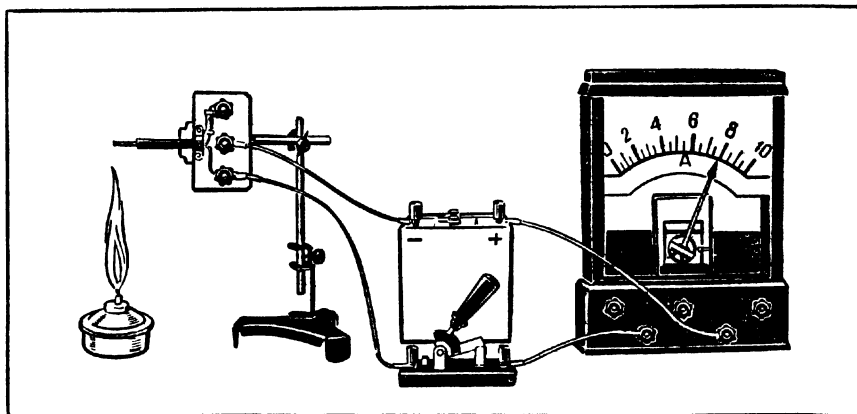


Рис. 128.

Включив термистор (из комплекта полупроводниковых приборов) в цепь, содержащую аккумулятор и гальванометр (рис. 128), показывают, что стрелка гальванометра отклоняется незначительно, т. е. сила тока в цепи мала. Это значит, что полупроводник при комнатной температуре имеет большое сопротивление.

Нагревая полупроводник вначале просто рукой, обращают внимание учащихся на то, что стрелка заметно отклоняется, а при нагревании полупроводника электрической плиткой или пламенем спиртовки стрелка отклоняется почти на всю шкалу гальванометра. Это показывает, что при нагревании удельное сопротивление полупроводников значительно уменьшается. Если же охладить полупроводник, например, опустив его в стакан с холодной водой, его сопротивление увеличится.

При температуре, близкой к абсолютному нулю, все полупроводники становятся диэлектриками.

После проведения опыта следует напомнить, что у металлов наблюдается значительно более слабая зависимость сопротивления от температуры. Причем их температурные коэффициенты сопротивления имеют противоположный знак. Целесообразно сравнить два графика: зависимость сопротивления металлов от температуры и подобный график для полупроводников. Их следует изобразить на одних и тех же координатных осях (рис. 129).

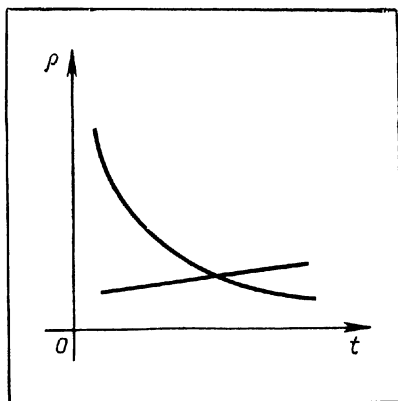


Рис. 129.

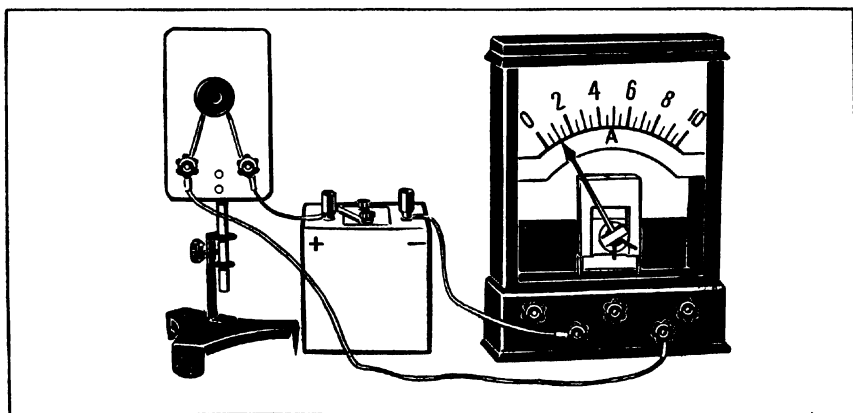


Рис. 130.

Следующий опыт, который ставят с фоторезистором (рис. 130), показывает зависимость сопротивления полупроводников от освещенности. Широкое применение полупроводников в автоматике объясняется именно этой высокой чувствительностью их сопротивления к внешним воздействиям.

Казалось бы, что замечательного в том, что, нагревая или охлаждая полупроводник, мы можем сделать его сопротивление таким же, как у металлов или у изоляторов. Ведь если нам нужен материал с большим или малым сопротивлением, мы можем взять либо металл, либо диэлектрик. Но в том-то и дело, что для многих автоматических устройств важно не то, какое сопротивление имеет проводник, а то, что оно очень чувствительно к внешним воздействиям. На изменение внешних условий полупроводник реагирует значительным изменением сопротивления, а следовательно, и силы тока в цепи. А это можно использовать для автоматического включения или, наоборот, выключения необходимых устройств.

Желательно показать учащимся, например, как работает простейшее полупроводниковое термореле, схема которого приведена на рисунке 131. Это реле может быть использовано, в частности, для сигнализации о том, что в электропечи достигнута заданная температура. Когда температура в печи, в которую помещают

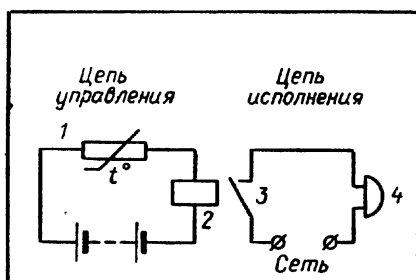


Рис. 131.

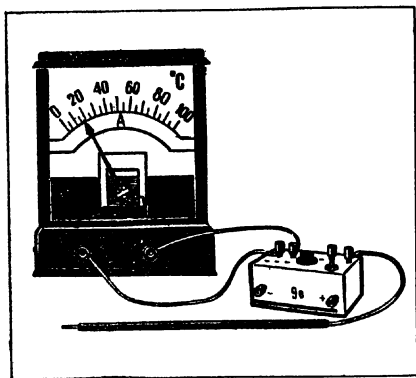


Рис. 132.

термистор 1, низка, по цепи проходит слабый ток, недостаточный для срабатывания электромагнитного реле 2. Но как только температура в печи достигнет необходимого значения, сила тока в цепи возрастет до такой величины, при которой реле срабатывает.

При этом замыкаются контакты 3, включающие цепь, содержащую сигнализатор — звонок или лампу 4.

Термисторы используют также для создания очень чувствительных термометров (рис. 132). Благодаря высокому удельному сопротивлению размер термистора может быть очень мал (несколько миллиметров или даже десятых долей его). Поэтому он быстро принимает температуру окружающей среды и может быть применен для измерения температуры отдельных участков человеческой кожи, листьев растений и т. д.

Чувствительность термосопротивлений очень велика и позволяет измерять изменения температуры на одну миллионную градуса.

Для закрепления знаний учащихся по рассмотренным вопросам полезны упражнения, примеры которых приведены ниже.

1. В цепь включены последовательно лампочка и термистор. Почему лампочка загорается не сразу, а через некоторое время после замыкания цепи?

2. Для уменьшения пускового тока в момент включения некоторых механизмов в цепь включают реостат, который затем постепенно выводят. Иногда вместо реостата для этой цели используют термистор. В чем заключается преимущество такой замены?

3. На рисунке 133 приведена схема простейшего фотореле. Объясните его действие.

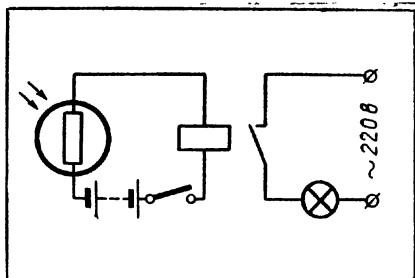


Рис. 133.

§ 68. Собственная проводимость полупроводников

Для объяснения свойств полупроводников, установленных экспериментально, необходимо перейти к рассмотрению механизма их электропроводности.

Природа носителей тока в полупроводниках та же, что и в металлах, т. е. ток в них создается движением электронов. Это следует из того, что при прохождении тока через полупроводники никакого изменения в их составе не происходит. Но в механизме проводимости имеются различия. Их можно выяснить при рассмотрении собственной проводимости полупроводников, например, кристаллов германия или кремния. Для объяснения механизма электронной и дырочной проводимости в средней школе приходится пользоваться известным из курса химии понятием ковалентной (или парноэлектронной) связи.

Изложение вопроса об электронной и дырочной проводимости достаточно хорошо известно из учебной и методической литературы. Для этого рассматривают кристаллическую решетку германия или кремния не в объемном, а в плоском виде (рис. 134). Желательно только при объяснении дырочной проводимости обратить внимание учащихся на то, как надо понимать процесс движения «дырок».

В той паре атомов, откуда внешним воздействием — нагреванием или поглощением света — электрон был переведен в свободное состояние, появляется избыточный положительный заряд, который можно рассматривать как положительный ион (рис. 135). Тепловое движение атомов кристалла приводит к тому, что какой-либо электрон из ближайших соседних атомов переходит к данному иону.

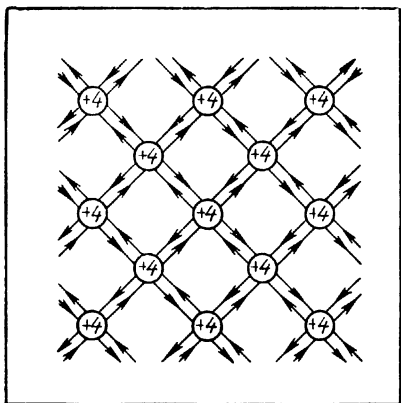


Рис. 134.

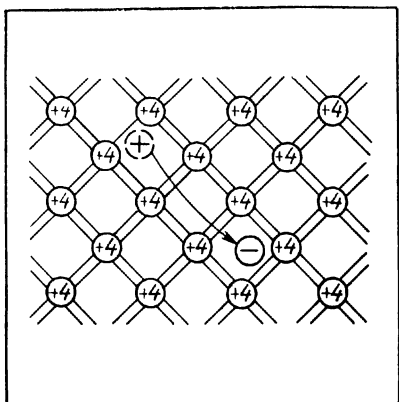


Рис. 135.

Тогда положительным ионом оказывается соседний атом, откуда был «захвачен» электрон. Такой процесс происходит многократно.

Перемещение этого положительного заряда внутри кристалла, которое отражает происходящее в действительности движение электронов от одного атома в другому, называют движением дырок.

Легко видеть, что возникновение дырок в кристалле создает дополнительные возможности для переноса заряда. При создании в полупроводнике электрического поля дырки перемещаются преимущественно в том направлении, куда двигались бы положительные заряды.

Итак, необходимо подчеркнуть, что термин *«дырочная проводимость»* представляет собой другой способ описания механизма электропроводности, осуществляемой движением связанных электронов между соседними атомами.

Теперь появляется возможность объяснить зависимость сопротивления полупроводников от температуры и освещения.

Большая чувствительность сопротивления полупроводников к внешним воздействиям объясняется тем, что для разрыва ковалентных связей и образования свободных электронов и дырок требуется сравнительно с диэлектриками небольшая энергия.

При абсолютном нуле свободные электроны в полупроводнике отсутствуют, и потому при этой температуре он — изолятор. Но уже при комнатной температуре в результате теплового движения атомов парноэлектронные связи разрываются и появляются свободные электроны и дырки. С повышением температуры или освещенности концентрация носителей зарядов резко возрастает (по экспоненциальному закону).

Итак, в создании электрического тока в полупроводниках участвуют не только свободные электроны, но и электроны, осуществляющие парноэлектронные связи между атомами.

§ 69. Примесная проводимость полупроводников

При изучении примесной проводимости полупроводников необходимо прежде всего объяснить учащимся, почему небольшие доли примесей очень значительно увеличивают их проводимость.

В этом можно убедить учащихся, произведя несложный расчет.

В 1 м^3 кремния содержится примерно 10^{28} атомов. Концентрация свободных электронов в нем при комнатной температуре составляет $n = 10^{17} \text{ м}^{-3}$. Следовательно, на каждые сто миллиардов атомов кремния приходится один свободный электрон (у металлов примерно на каждый атом приходится один свободный электрон).

В 1% примеси мышьяка содержится 0,01 часть от 10^{28} , т. е. 10^{26} атомов в 1 м^3 . Если считать, что каждый атом мышьяка дает один свободный электрон, то концентрация свободных электронов, связанных с примесью, составляет 10^{26} м^{-3} . Она в $\frac{10^{26}}{10^{17}}$, т. е. в миллиард раз больше, чем концентрация электронов в чистом кремнии. Опираясь на выражение $\rho = \frac{2m}{e^2 n \tau}$, можно утверждать, что во столько же раз соответственно уменьшается удельное сопротивление полупроводника.

Итак, введением соответствующей примеси можно значительно увеличить число свободных электронов в полупроводнике. Число же дырок при этом не увеличивается. В таком полупроводнике свободные электроны являются основными (рис. 136), т. е. представленными в подавляющем большинстве носителями заряда, а «дырки» — неосновными. Кремний с примесью мышьяка становится электронным полупроводником (полупроводником n -типа).

Точно так же можно получить в кристалле полупроводника дополнительно дырку, введя в кристаллическую решетку атом, имеющий на внешней орбите только три электрона. Например, при введении в кремний атомов бора ковалентные связи не будут полностью

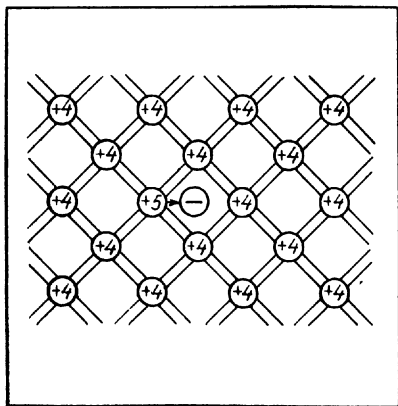


Рис. 136.

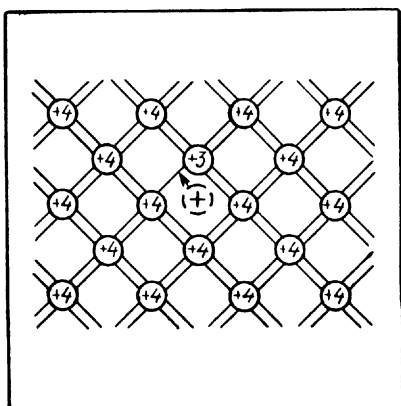


Рис. 137.

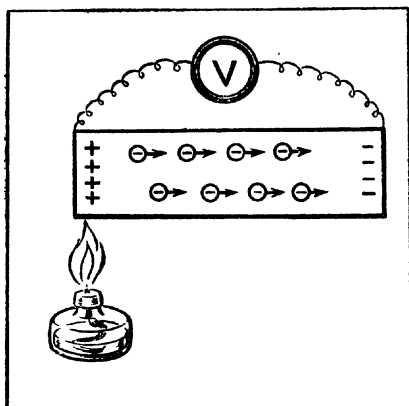


Рис. 138.

Как известно, знак заряда, которым осуществляется ток в проводнике, определяется по эффекту Холла. В средней школе этот метод неприемлем, так как с самим эффектом учащихся не знакомят. В школе может быть поставлен опыт, в котором знак основных носителей заряда в полупроводнике можно определить по направлению тока, который возникает в полупроводниковом стержне при нагревании одного из его концов [ДЭ, II, опыт 62]. Идея этого опыта очень проста.

Нагревают полупроводник, имеющий форму стержня (рис. 138). По мере нагревания одного из его концов возрастает концентрация основных носителей, связанных с примесной проводимостью, в нагретом конце стержня. Благодаря диффузии основные носители заряда начнут перемещаться к холодному концу стержня, и оба конца стержня зарядятся: один положительно, другой отрицательно. Холодный конец получит заряд, соответствующий знаку основных носителей в данном полупроводнике — электронов либо дырок. С помощью вольтметра, включенного к концам стержня, определяют знак заряда холодного конца стержня, а тем самым и тип данного полупроводника.

Для проверки усвоения учащимися механизма собственной и примесной проводимости можно поставить перед ними такие вопросы:

1. Как объяснить, почему уменьшается удельное сопротивление полупроводников с повышением температуры?

2. Имеется полупроводниковая пластинка с примесной проводимостью. Как опытным путем определить, электронной или дырочной проводимостью она обладает?

3. Какая валентность должна быть у примеси к германиевому полупроводнику, чтобы он обладал: а) электронной проводимостью, б) дырочной

завершены, так как атом бора будет прочно связан с тремя атомами кремния, а четвертая связь атома кремния не будет заполнена (рис. 137).

При этих условиях какой-либо электрон соседнего атома может оторваться и заполнить недостающую связь у иона, а сам этот атом превратится в положительный ион и т. д. Таким образом, дырка будет «блуждать» по кристаллу. Дырочная проводимость в таком полупроводнике преобладает над электронной, т. е. дырки в нем являются основными носителями заряда (полупроводник *p*-типа).

проводимостью? Пользуясь таблицей периодической системы элементов Д. И. Менделеева, назовите элементы, подходящие для примеси в обоих случаях.

§ 70. Односторонняя проводимость контактного слоя

Среди физических свойств, присущих полупроводникам, наиболее важные применения получили особые свойства контактов между полупроводниками с различными типами проводимости (n — p -переход).

Объяснение n — p -перехода целесообразно начать с опытов, выявляющих его свойства.

Включают в цепь полупроводниковый диод. Ученикам при этом нужно пояснить, что диод представляет собой полупроводник, в котором введением соответствующих примесей созданы две примыкающие друг к другу области с проводимостями n - и p -типа.

Из опыта видно, что при одном и том же напряжении, приложенном к такому полупроводниковому устройству, в одном направлении идет значительный ток, а в другом — он практически отсутствует. Это показывает, что контакт полупроводников n - и p -типа обладает особым свойством: его сопротивление в одном направлении значительно больше, чем в другом (в тысячи раз!).

Перед учащимися возникает учебная проблема: выяснить причину этого свойства n — p -перехода.

Ниже приведен возможный вариант объяснения этого вопроса. Рассматривают, что происходит на границе между электронным и дырочным полупроводниками, т. е. на так называемом n — p -переходе, когда он не присоединен к источнику тока.

Электроны в полупроводнике n -типа, являющиеся там основными носителями тока, участвуют в тепловом движении и диффундируют через границу в полупроводник p -типа, где их концентрация значительно меньше. Точно так же дырки будут диффундировать из дырочного полупроводника в электронный. Это происходит подобно тому, как атомы растворенного вещества диффундируют из крепкого раствора в слабый при их соприкосновении.

В результате диффузии приконтактная область обедняется основными носителями тока: в полупроводнике n -типа уменьшается концентрация электронов, а в полупроводнике p -типа — концентрация дырок (рис. 139). Поэтому сопротивление приконтактной области оказывается очень большим.

Диффузия электронов и дырок через n — p -переход приводит к тому, что электронный проводник, из которого уходят электроны, заряжается положительно, а дырочный — отрица-

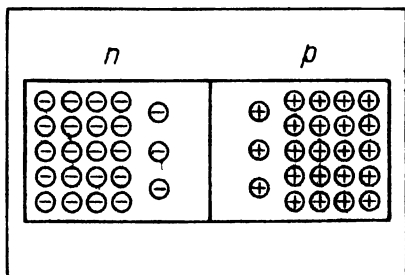


Рис. 139.

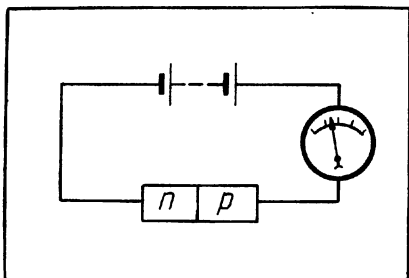


Рис. 140.

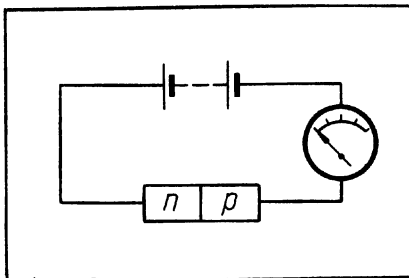


Рис. 141.

тельно. Возникает двойной электрический слой, создающий электрическое поле, которое препятствует дальнейшей диффузии свободных носителей тока через контакт полупроводников. При некоторой разности потенциалов между двойным заряженным слоем дальнейшее обеднение приконтактной области основными носителями прекращается.

Присоединяют теперь полупроводник, содержащий $n - p$ -переход, к источнику тока так, чтобы его электронная область соединялась с отрицательным, а дырочная — с положительным полюсом источника.

В этом случае электрическое поле, созданное источником тока, направлено так (рис. 140), что оно будет перемещать основные носители тока в каждой из областей полупроводника (электроны в одной и дырки в другой) к $n - p$ -переходу. Приконтактная область будет обогащаться основными носителями тока, т. е. область, обедненная зарядами, будет сужаться, и ее сопротивление уменьшится. Через контакт будет проходить заметный ток. Направление тока, который возникает, когда n -область соединена с отрицательным, а p -область с положительным полюсом источника, называют пропускным.

Если же присоединить электронный полупроводник к положительному, а дырочный — к отрицательному полюсу источника, то, наоборот, основные носители тока в каждом полупроводнике будут двигаться от контакта в противоположные стороны. Приконтактная область расширится, и ее сопротивление значительно увеличится (рис. 141). Ток через переходный слой будет очень мал. Это направление тока называют запирающим.

Ток в запирающем направлении создается движением лишь неосновных носителей, которые движутся к $n - p$ -переходу. Так как их концентрация очень мала, то и сила тока в запирающем направлении очень незначительна.

На основе приведенного объяснения делают вывод: контакт двух полупроводников с различными видами проводимости обладает свойством хорошо проводить ток в одном направлении и прак-

тически не проводить ток в противоположном направлении, т. е. имеет одностороннюю проводимость.

При объяснении механизма собственной и примесной проводимости, а также свойств $n - p$ -перехода целесообразно использовать учебный кинофильм «Полупроводники и их применения в технике» (второй и третий фрагменты).

§ 71. Полупроводниковый диод

Знания свойств $n - p$ -перехода учащиеся смогут применить при изучении полупроводникового диода и его вольт-амперной характеристики.

Современные диоды изготавливают чаще всего из германия или кремния, в которых благодаря соответствующим примесям создаются соприкасающиеся между собой области с электронной и дырочной проводимостью. Учащимся следует объяснить, как это осуществляется.

Если, например, на пластинку германия с электронной проводимостью наплавить каплю индия (рис. 142), то поверхностный слой германия, в который проникнут на некоторую глубину атомы индия, станет дырочным полупроводником. Тогда между областями германия с электронной и дырочной проводимостью возникает $n - p$ -переход.

Воспользовавшись настенной таблицей «Диод», показывают устройство одного из германиевых диодов.

Далее рассматривают вольт-амперную характеристику диода (рис. 143). Обращают внимание на то, что сила тока в проходном направлении с увеличением напряжения растет очень быстро. В запирающем же направлении сила тока очень мала и почти не изменяется с ростом напряжения.

Из вольт-амперной характеристики диода следует, что для него не справедлив закон Ома; сила тока, проходящего через диод, находится в более сложной зависимости от напряжения (зависимость нелинейная), чем следует из закона Ома.

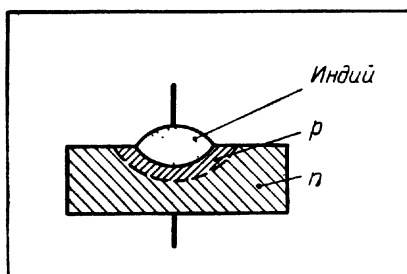


Рис. 142.

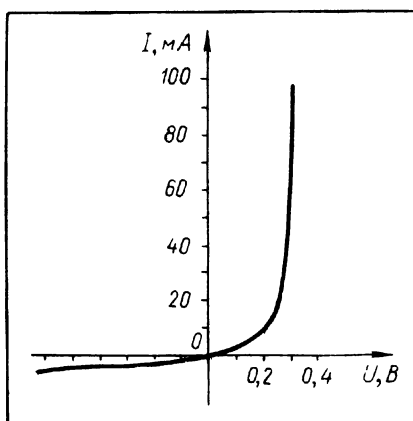


Рис. 143.

Как уже известно учащимся, закон Ома справедлив только в том случае, если от напряжения зависит лишь скорость дрейфа носителей заряда, а не их концентрация. В данном случае быстрый рост силы тока в проходном направлении объясняется не только ростом скорости дрейфа, но и тем, что с увеличением напряжения растет еще и концентрация носителей тока в приконтактной области. В запирающем же направлении ток исчезающе мал, потому что он обусловлен движением неосновных носителей зарядов, концентрация которых ничтожна.

Учащимся сообщают, что полупроводниковые диоды изготавливают как для выпрямления слабых, так и очень сильных токов. Первые широко применяют в радиотехнических устройствах — радиоприемниках, магнитофонах, телевизорах. Диоды, рассчитанные на сильные токи, используют для выпрямления переменных токов, питающих электродвигатели трамваев, электровозов и др.

Полупроводниковые устройства уже в настоящее время широко применяют в современной радиотехнике, автоматике, телемеханике и других областях науки и техники.

Исключительно малые размеры полупроводниковых приборов (иногда всего лишь в несколько миллиметров), долговечность, связанная с тем, что их свойства мало меняются со временем, возможность легко изменять их электропроводность, а также многие другие ценные свойства открывают новые перспективы применения полупроводников в недалеком будущем.

Академик Абрам Федорович Иоффе (1880—1960), работы которого по изучению свойств полупроводников и их применений получили мировое признание, предвидел возможности решения с их помощью многих важных технических проблем. Он писал: «Можно предвидеть, что с помощью полупроводников будут разрешены такие фундаментальные задачи, как прямое превращение тепловой и солнечной энергии в электрическую, а также электрической в механическую и обратно без помощи машин... Самые совершенные радиоприемники и самая сложная аппаратура для сигнализации, автоматике и телеуправления будут иметь ничтожные габариты и стоить во много раз дешевле».

Приведенные ниже упражнения помогут учащимся лучше усвоить вольт-амперную характеристику диода и его свойства.

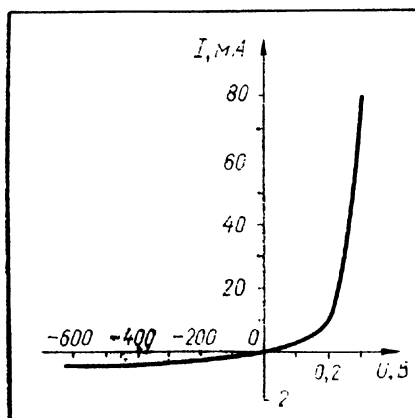


Рис. 144.

1. На рисунке 144 изображена вольт-амперная характеристика полупроводникового диода. Определите: а) какая часть характеристики относится к пропускному направлению;

б) к запирающему направлению; в) чему равно внутреннее сопротивление диода в пропускном направлении (при напряжении 0,3 В) и в запирающем направлении (при напряжении 600 В).

2. В двух одинаковых закрытых коробках находится: в одной — полупроводниковый диод, а в другой — небольшой реостат. Концы приборов в каждом ящике выведены наружу и присоединены к клеммам. Как определить, в какой из коробок находится диод?

В заключение темы полезно провести сопоставление свойств полупроводников и металлов. Сравнение можно провести по следующим вопросам: природа носителей заряда; зависимость сопротивления от температуры; концентрация носителей тока и ее зависимость от температуры.

Глава XVI

МАГНИТНОЕ ПОЛЕ В ВАКУУМЕ

§ 72. Введение

Электромагнетизм занимает одно из центральных мест в разделе «Основы электродинамики». Электромагнитные явления рассматривают в трех темах: «Магнитное поле тока», «Электромагнитная индукция» и «Магнитные свойства вещества».

Особенности изучения магнитного поля состоят в следующем.

Учебный материал относится к большому периоду развития физики — от Эрстеда до Эйнштейна, в течение которого физические воззрения в корне изменялись, причем не один раз. Это отразилось на методике изучения электромагнетизма в средней школе, в которой традиционная трактовка вопросов (часто устаревшая) смешивалась с современными представлениями.

В теме рассматривают образование магнитного поля тока и действие магнитного поля на ток. Эти явления описываются разными законами: первые — законом Био — Савара — Лапласа, вторые — законом Ампера и силой Лоренца.

При изучении магнитного поля школьники знакомятся с новым для них понятием о вихревом характере магнитного поля, узнают о том, что магнитные силы \vec{F}_m действуют не вдоль вектора магнитной индукции \vec{B} , характеризующего поле, а перпендикулярно ему: $\vec{F}_m \perp \vec{B}$ (в отличие от электрического поля, где $\vec{F}_e \parallel \vec{E}$).

Магнитное поле представляет собой релятивистский эффект. Его образование вызывается движением электрических зарядов относительно выбранной системы отсчета. В теме разъясняют роль относительности движения в электромагнитных явлениях, что служит подготовкой учащихся к усвоению учения Максвелла об электромагнитном поле.

Здесь развиваются представления учащихся о принципе близкодействия. Движущиеся электрические заряды взаимодействуют через магнитное поле. Это действие распространяется с конечной

скоростью, равной скорости света в вакууме. Электромагнитное поле материально. Магнитное поле является его составляющей. «Самым увлекательным предметом во времена моего учения, — писал А. Эйнштейн, — была теория Максвелла. Переход от сил дальнего действия к полям, как основным величинам, делал эту теорию революционной»¹.

Свойства магнитов объясняют на основе законов электродинамики. При описании явлений электромагнетизма используют только одну силовую характеристику магнитного поля — магнитную индукцию \vec{B} (а не \vec{H}). Поэтому измерение магнитной индукции производят при помощи контуров с током, а не магнитной стрелки.

Изучение электромагнетизма на микрофизическом уровне позволяет ввести некоторые магнитные характеристики атомов и электронов: магнитный момент атома, орбитальный и спиновый магнитные моменты электрона. Эти знания необходимы в дальнейшем для рассмотрения магнитных свойств вещества и магнитного поля в веществе.

Прикладная часть учебного материала охватывает следующие вопросы: применение магнитного поля в физических исследованиях атомного строения вещества и атомных частиц (в земных условиях и космосе), принципы устройства и действия электрических приборов и машин, электро- и радиоустройств и сооружений.

§ 73. Взаимодействие токов. Магнитное поле

Основные опыты по взаимодействию токов уже известны учащимся из курса физики VII класса. Их можно повторить. Здесь же сопоставляют взаимодействия двух неподвижных зарядов и двух токов. Обращают внимание на то, что электрические и магнитные силы² имеют разную природу и описываются неодинаковыми законами. Термин «магнитные силы» имеет историческое происхождение, так как впервые они были введены для объяснения взаимодействия магнитов.

Исходным является опыт по взаимодействию параллельных токов. Для этого берут металлические ленты (например, от конденсатора), сложенные в три слоя. Длина лент 1—1,5 м, ширина 3 см. Ленты включают в электрическую цепь один раз параллельно друг другу (рис. 145, а), а другой — последовательно (рис. 145, б). Обращают внимание на три стороны явления: токи одного направления взаимно притягиваются (сравнить — неподвижные одноименные заряды отталкиваются), а противоположных направлений

¹ Эйнштейн А. Собрание научных трудов. Т. IV. М., 1967, с. 270.

² Везде, где далее идет речь об электрических и магнитных силах, имеется в виду действие электрического или магнитного поля соответственно на неподвижные или движущиеся заряды относительно некоторой выбранной системы отсчета.

отталкиваются (сравнить — неподвижные разноименные заряды притягиваются); взаимодействие не зависит от материала проводников (медь, сталь и др.) и от вида источников тока (аккумулятор, электрическая машина постоянного тока, термобатарея и т. п.).

Можно поставить опыты по взаимодействию катушек с токами (плоскими; длинными) и обнаружить тот же эффект. Остается определить величину взаимодействия параллельных токов. Вывод соответствующей формулы в средней школе не предусмотрен. Однако можно иллюстрировать ее на опыте с взаимодействием линейных участков прямоугольных рамок с токами (рис. 146).

Рамки состоят из нескольких десятков витков тонкой изолированной проволоки. В цепь каждой рамки включают амперметр и желателен отдельный источник тока (аккумулятор). Величину взаимодействия (силу) определяют с помощью неравноплечих весов.

Последовательные этапы опыта приводят к следующим результатам:

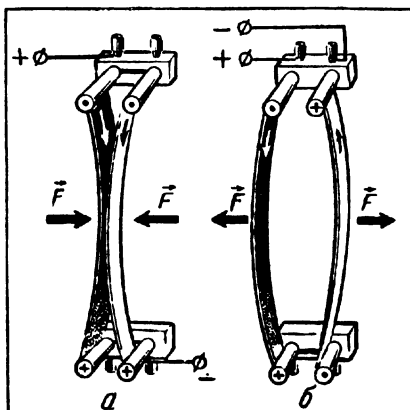


Рис. 145.

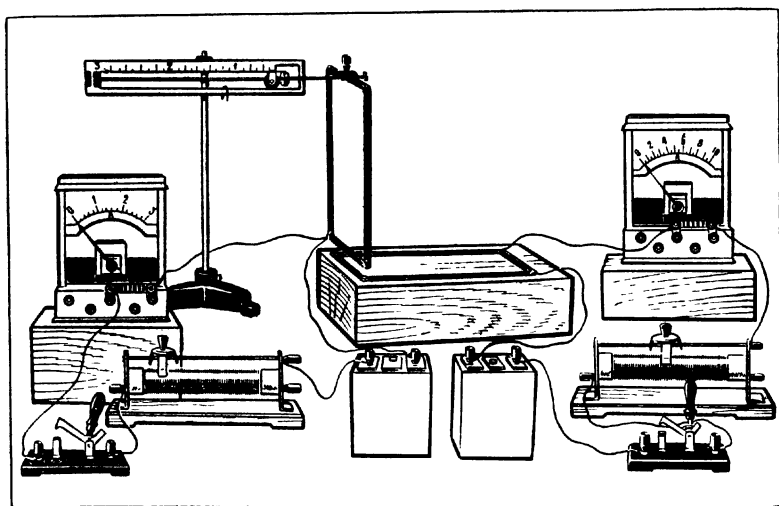


Рис. 146.

при изменении силы тока в одной рамке обнаруживают: $F_m \sim I_1$;

при изменении силы тока в другой рамке получают: $F_m \sim I_2$;
изменение длины проводников (рамки устанавливают так, чтобы взаимодействовали их длинные стороны) позволяет выяснить, что $F_m \sim l$;

изменяя в целое число раз расстояние между взаимодействующими сторонами рамок, получают: $F_m \sim \frac{1}{R}$.

Таким образом, приходят к выводу:

$$F_m \sim \frac{I_1 I_2}{R} l$$

или при переходе к равенству получают выражение для магнитной силы:

$$F_m = k \frac{I_1 I_2}{R} l.$$

Поясняют следующее.

Проводники — бесконечно длинные и ничтожно малого кругового сечения. Практически проводники берут такими, чтобы их длина была во много раз больше, а диаметр поперечного сечения во много раз меньше расстояния между ними.

Магнитная сила обратно пропорциональна первой степени расстояния между проводниками с токами (сравнить с законом Кулона для неподвижных точечных электрических зарядов).

Магнитная сила \vec{F}_m действует со стороны одного бесконечно длинного проводника с током на участок длиной l другого также бесконечно длинного проводника с током (рис. 147). Формула справедлива для действия каждого из проводников с током на другой.

Силы \vec{F}_{12} и \vec{F}_{21} равны, приложены к разным проводникам с токами и направлены в противоположные стороны (третий закон Ньютона). Однако это лишь частный случай. Для взаимодействия элементов тока ($I \Delta l$) третий закон Ньютона неприменим: магнитные силы не равны по величине и не противоположны по направлению.

Формула для магнитной силы $F_m = k \frac{I_1 I_2}{R} l$ справедлива для взаимодействия проводников с токами в вакууме, где коэффициент k в Международной системе единиц равен $2 \cdot 10^{-7}$ Н/А². Их магнитное

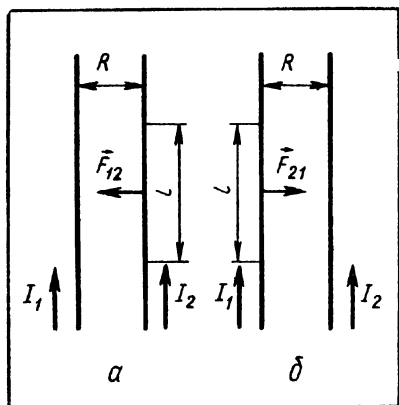


Рис. 147.

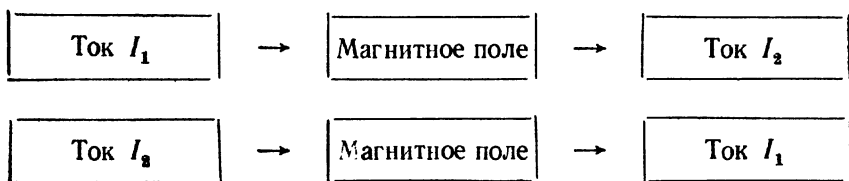
взаимодействие принято для метрологического определения единицы силы тока — ампер.

Если $I_1 = I_2 = 1\text{А}$, $l = R = 1\text{ м}$, то

$$F_m = 2 \cdot 10^{-7} \frac{\text{Н}}{\text{А}^2} \cdot \frac{1\text{А} \cdot 1\text{А} \cdot 1\text{м}}{1\text{м}} = 2 \cdot 10^{-7}\text{Н}.$$

Повторяют определение единицы силы тока — ампер, изученное в VII классе.

Взаимодействия токов передаются через магнитные поля по следующей схеме:



Каждый проводник с током создает свое магнитное поле, а последнее действует на другой проводник с током. Подчеркивают активное действие самого магнитного поля, как реально существующего материального объекта.

Магнитное действие передается не мгновенно, а в конечное время, последовательно от точки к точке, со скоростью, равной скорости света в вакууме $c = 3 \cdot 10^8$ м/с. Если, например, расстояние между контурами с токами равно 30 см, то время, в течение которого передается силовое магнитное действие от одного контура к другому (с токами),

$$t = \frac{0,3\text{ м}}{3 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}}} = 10^{-9}\text{с}.$$

Это время практически незаметно, но оно все же конечно.

Позже будет показано, что проводники никакой роли в магнитном взаимодействии не играют. Взаимодействуют магнитными силами только движущиеся заряды, т. е. токи. Поэтому говорят о магнитном взаимодействии токов. С помощью проводников (контуров) лишь обнаруживают магнитные взаимодействия токов.

§ 74. Магнитная индукция

Ставят учебную проблему: если ток образует магнитное поле, то каковы его характеристики, например силовая (магнитная индукция) и энергетическая (плотность энергии магнитного поля). При введении понятия магнитной индукции определяют ее величину и направление, а также выясняют вихревой характер магнитного поля.

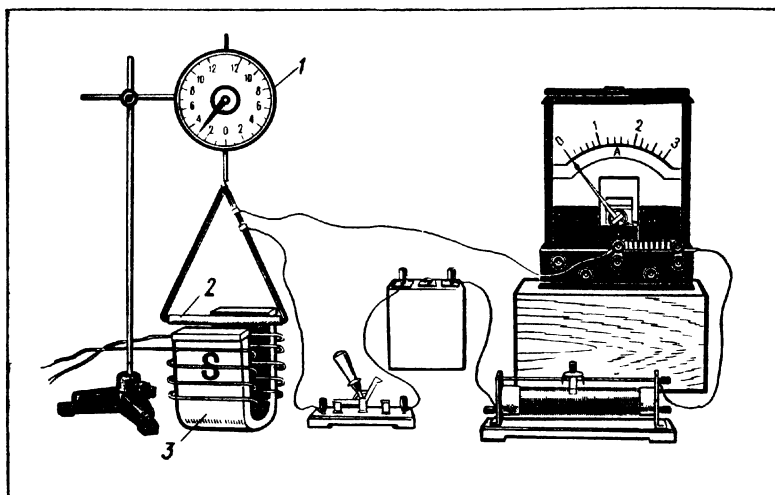


Рис. 148.

Понятие магнитной индукции может быть введено различными способами: по действию магнитной силы на элемент тока, момента силы на рамку с током, магнитного поля на движущийся заряд, с помощью явления электромагнитной индукции и др. Выбор способа введения этого понятия зависит от логики изложения раздела электромагнетизма.

Рассмотрим два способа.

I. Для определения величины магнитной силы, действующей на ток, можно провести следующий эксперимент.

К динамометру 1 (рис. 148) на проводниках подвешивают медный стержень 2, так, чтобы он расположился горизонтально между полюсами электромагнита 3. Стержень через амперметр, реостат и ключ соединяют с источником тока.

При замыкании ключа стержень опускается вниз (для этого подбирают направление тока в стержне слева направо). Магнитную силу \vec{F}_m , действующую со стороны магнитного поля электромагнита на ток в стержне, измеряют по шкале динамометра. Последовательные этапы опыта приводят к следующим результатам:

при изменении силы тока в стержне устанавливают: $F_m \sim I$;
изменяя длину стержня с током (петельки, на которых лежит стержень, сближают или удаляют), обнаруживают: $F_m \sim l$;

при изменении интенсивности магнитного поля, в котором находится стержень с током (изменяют силу тока в электромагните), получают: $F_m \sim B$.

Таким образом, приходят к выводу:

$$F_m = kIlB.$$

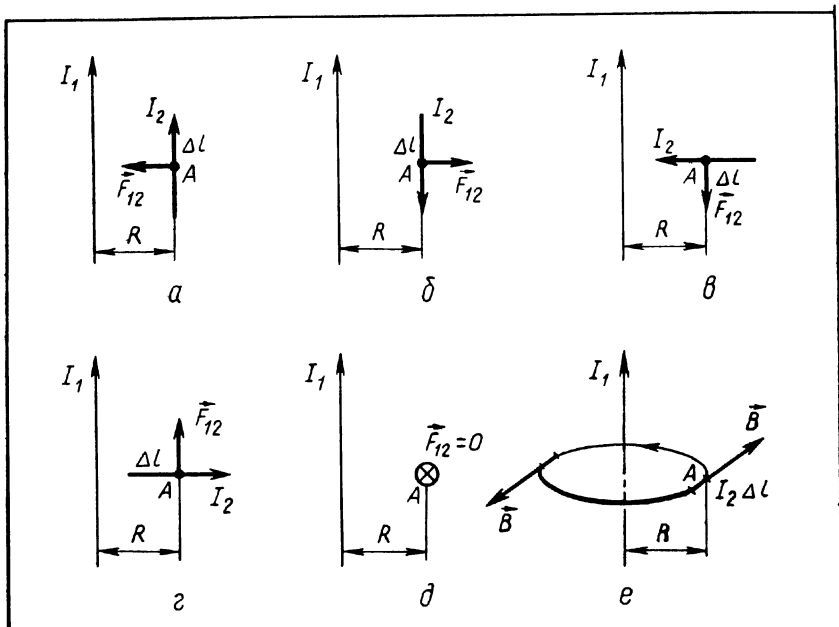


Рис. 149.

В Международной системе единиц коэффициент пропорциональности $k = 1$. Поэтому

$$F_m = IIB.$$

Величина \vec{B} характеризует само магнитное поле и называется магнитной индукцией. Магнитная индукция — векторная величина.

Надо выяснить, как направлена магнитная индукция, и показать, что магнитная сила перпендикулярна магнитной индукции. Ниже приведено объяснение, идея которого предложена академиком И. К. Кикоиным.

Рассматривают действие магнитного поля прямого тока I_1 на элемент тока $I_2 \Delta l$, находящегося на расстоянии R от первого тока. Объяснение состоит из ряда логических шагов.

1. Токи параллельны и направлены в одну сторону. Магнитная сила в точке A направлена справа налево (рис. 149, а). Сила \vec{F}_{12} перпендикулярна направлению тока I_2 .

2. Токи параллельны, направление тока I_2 противоположно. Магнитная сила в точке A направлена слева направо (рис. 149, б).

Опять сила \vec{F}_{12} перпендикулярна направлению тока I_2 .

3. Элемент тока $I_2 \Delta l$ повернут так, что он теперь в точке A перпендикулярен току I_1 . Теперь магнитная сила направлена вниз (рис. 149, в) и снова перпендикулярна направлению тока I_2 .

4. Если направление тока I_2 изменить на противоположное,

то сила \vec{F}_{12} будет направлена вверх (рис. 149, г) и также перпендикулярна направлению тока I_2 .

Во всех четырех случаях \vec{F}_m перпендикулярна направлению тока I_2 , но направление этой силы различное. Не может же направление магнитной индукции \vec{B} тока I_1 в точке A зависеть от того, как расположен проводник с током I_2 . Значит, \vec{B} и \vec{F}_m не совпадают по направлению. Как же направлена магнитная индукция \vec{B} ?

5. Элемент тока $I_2 \Delta l$ расположен перпендикулярно плоскости рисунка (рис. 149, д). Опыт показывает, что в этом случае магнитная сила в точке A равна нулю (!). Магнитное поле существует, а магнитная сила $\vec{F}_m = 0$. Очевидно, вектор \vec{B} , характеризующий магнитное поле тока I_1 в точке A , направлен вдоль элемента тока $I_2 \Delta l$ тогда, когда магнитная сила $\vec{F}_m = 0$. Это может служить правилом для определения направления \vec{B} .

6. Кольцевой контур с током I_2 охватывает прямолинейный проводник с током I_1 (рис. 149, е). Каждый элемент этого контура и элемент тока $I_2 \Delta l$ расположены так, как в предыдущем случае, т. е. перпендикулярно току I_1 , и в таком положении, что магнитная сила $\vec{F}_m = 0$. Тогда магнитная индукция \vec{B} тока I_1 на расстоянии R от него направлена вдоль элементов тока, т. е. по касательной к окружности, как показано на рисунке. Отсюда следует вывод: магнитная индукция прямого тока в любой точке пространства вокруг него направлена по касательной к окружности, лежащей в плоскости, перпендикулярной току.

Каждая такая окружность представляет собой линию магнитной индукции, а их совокупность изображает магнитное поле прямого тока. Следует подчеркнуть два важных обстоятельства: магнитное поле прямого тока симметрично относительно тока; линии магнитной индукции тока замкнуты (сравнить с силовыми линиями электрического поля — они имеют начало и конец) — магнитное поле вихревое.

Для определения направления линий магнитной индукции можно ввести правило правого винта.

Учащимся известно, что линии магнитного поля электромагнита направлены от северного полюса к южному. Здесь надо уточнить, что эти линии и есть линии магнитной индукции, вдоль которых направлен вектор \vec{B} . Как видно из опыта (см. рис. 148), направления тока I , векторов магнитной индукции \vec{B} и магнитной силы \vec{F}_m взаимно перпендикулярны. Магнитную силу определяют по формуле Ампера:

$$F_m = I \Delta l B.$$

В общем случае вектор магнитной индукции может составлять некоторый угол α с направлением тока. Тогда формула Ампера принимает вид:

$$F_m = I \Delta l B \sin \alpha.$$

(Этот случай подробно рассмотрен в учебном пособии «Физика, 9», § 120). Отсюда магнитная индукция

$$B = \frac{F_m}{I \Delta l \sin \alpha}.$$

Если $I = 1 \text{ А}$, $\Delta l = 1 \text{ м}$ и $\sin \alpha = 1$ ($\alpha = \frac{\pi}{2}$), то по модулю $B = F_m$.

Делают вывод: магнитная индукция измеряется той силой, с которой магнитное поле действует на единицу длины проводника с током, равным единице, если магнитная индукция и проводник с током взаимно перпендикулярны. Следует особо подчеркнуть, что в этом случае $|\vec{B}| = |\vec{F}_m|$, но $\vec{B} \perp \vec{F}_m$.

Далее вводят единицу магнитной индукции. Если $F_m = 1 \text{ Н}$, то магнитная индукция B также равна единице. Следовательно, магнитная индукция равна единице, если на проводник длиной 1 м с током 1 А магнитное поле действует с силой в 1 Н при условии, что магнитная индукция в данной точке и проводник с током взаимно перпендикулярны. Единица магнитной индукции B равна:

$$\frac{1 \text{ Н}}{1 \text{ А} \cdot 1 \text{ м}} = 1 \frac{\text{Н}}{\text{А} \cdot \text{м}}.$$

Эту единицу магнитной индукции можно выразить в том виде, в котором она обычно применяется:

$$\frac{\text{Н}}{\text{А} \cdot \text{м}} = \frac{\text{Н} \cdot \text{м}}{\text{А} \cdot \text{м}^2} = \frac{\text{Дж}}{\text{А} \cdot \text{м}^2} = \frac{\text{К} \cdot \text{В}}{\text{А} \cdot \text{м}^2} = \frac{\text{А} \cdot \text{с} \cdot \text{В}}{\text{А} \cdot \text{м}^2} = \frac{\text{В} \cdot \text{с}}{\text{м}^2}.$$

Единицу, равную произведению $\text{В} \cdot \text{с}$, называют вебером (Вб), названа она в честь немецкого физика Вильгельма Эдуарда Вебера (1804—1891).

Из предыдущего следует, что

$$1 \frac{\text{Н}}{\text{А} \cdot \text{м}} = 1 \frac{\text{Вб}}{\text{м}^2}.$$

Эту единицу магнитной индукции в честь известного изобретателя в области электротехники и радиотехники Никола Тесла (1856—1943) называют тесла (Т).

II. Для определения направления и единицы магнитной индукции \vec{B} можно использовать также поведение рамки с током в магнитном поле. Пучок изолированной проволоки соединяют с источником постоянного тока. Рядом с ним помещают на оси маленькую рамку (или плос-

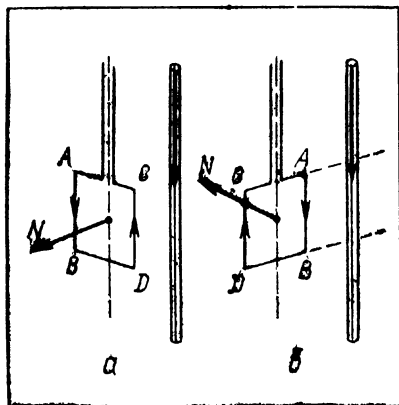


Рис. 150.

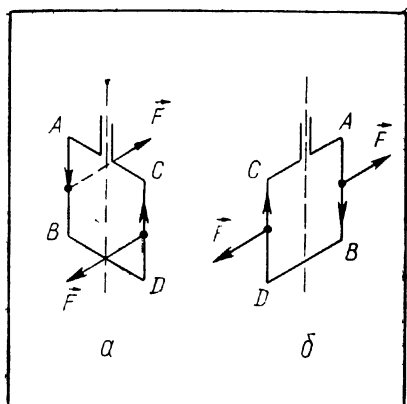


Рис. 151.

кую катушку) с током (рис. 150, а). Нормаль к рамке с током условились считать положительной, если она направлена к наблюдателю, когда он видит ток в рамке текущим против часовой стрелки.

При включении тока в рамку она в любой точке магнитного поля всегда поворачивается так, что жгут проволоки и рамка располагаются в одной плоскости (рис. 150, б). Направление положительной нормали к плоскости рамки указывает на направление магнитной индукции. На последнем рисунке

положительная нормаль направлена от читателя.

На действии магнитного поля на рамку с током основано устройство и работа электроизмерительных приборов и электрических двигателей.

Важно подчеркнуть, что ось магнитной стрелки $S - N$ совпадает с положительной нормалью контура с током. Поэтому магнитная стрелка также указывает направление магнитной индукции (точнее, направление вектора магнитной напряженности \vec{H} , совпадающей в немагнитных средах с направлением магнитной индукции \vec{B}). В этом смысле магнитная стрелка эквивалентна рамке с током (кольцевому току).

Пользуясь способом введения магнитной индукции, использованным в учебном пособии («Физика, 9»), следует обратить внимание учащихся на такой вопрос:

Почему контур с током поворачивается в магнитном поле? Для этого удобнее рассмотреть прямоугольную рамку с током (рис. 150, 151).

Поворот рамки с током в магнитном поле нетрудно объяснить. Сторона AB рамки с параллельным током притягивается к прямому току, а сторона CD с антипараллельным током отталкивается от него. Образуются два момента сил относительно оси вращения рамки (рис. 151, а), под действием которых она поворачивается. Когда рамка с током установится в одной плоскости с прямым током, магнитные силы лишь растягивают рамку (рис. 151, б), но не вращают ее. На две другие стороны AC и BD рамки с токами, перпендикулярные прямому току, магнитные силы действуют также в противоположные стороны и только деформируют рамку.

Положительная нормаль к замкнутому контуру совпадает с направлением магнитной индукции внешнего поля тогда, когда магнитный момент, действующий на контур с током, равен нулю.

Величина же магнитной индукции определяется максимальным магнитным моментом, когда положительная нормаль контура с током перпендикулярна направлению магнитной индукции внешнего поля.

Дают определение единицы магнитной индукции — тесла. Для этого вводят понятие магнитного потока (потока магнитной индукции) $\Phi = BS$.

Разъясняют, что магнитный поток условно можно характеризовать числом линий индукции (или числом линий, пропорциональным магнитному потоку), пронизывающих контур с током в перпендикулярном к нему направлении. Измеряют магнитный поток в веберах. Магнитная индукция

$$B = \frac{\Phi}{S}.$$

Если магнитный поток $\Phi = 1 \text{ Вб}$, а площадь контура $S = 1 \text{ м}^2$, то магнитная индукция равна $1 \frac{\text{Вб}}{\text{м}^2} = 1 \text{ Т}$.

Тесла — магнитная индукция, при которой магнитный поток, пронизывающий поперечное сечение площадью 1 м^2 , равен 1 Вб .

Магнитные поля подчиняются принципу суперпозиции. Магнитная индукция в точке от нескольких магнитных полей равна геометрической сумме магнитных индукций, создаваемых этими полями в той же точке:

$$\vec{B} = \vec{B}_1 + \vec{B}_2 + \vec{B}_3 + \dots + \vec{B}_n = \sum_{i=1}^n \vec{B}_i.$$

Вводят понятие об однородном поле. Магнитное поле, во всех точках которого величина и направление магнитной индукции одинаковы, называют однородным. Приводят примеры однородных полей: между плоскими полюсами магнита, на оси длинной катушки с током, на небольшом участке земной поверхности.

§ 75. Магнитные поля различных контуров с токами и движущихся носителей зарядов

Для изучения магнитных полей, кроме магнитной стрелки, пользуются различными индикаторами учебного назначения (по типу зондов). Их применение в практике преподавания очень желательно. Используют зонд-индикатор, основанный на эффекте Холла или на явлении электромагнитной индукции либо другого типа.

Обнаруживают и сравнивают магнитные поля различных контуров с током: прямого, кольцевого, плоской и длинной катушки, тороида, магнитной ловушки.

Ниже описана методика показа некоторых опытов. Каждый из них проводят с зондом и магнитной стрелкой и результаты сравнивают.

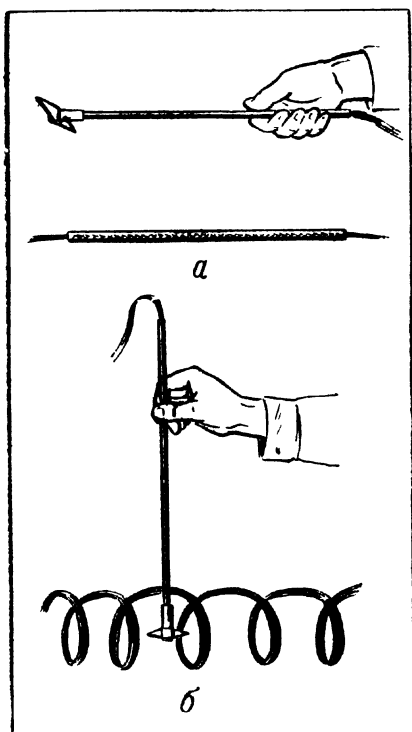


Рис. 152.

1. Повторяют известный опыт датского физика Ханса Кристиана Эрстеда (1777—1851) по изучению магнитного поля тока (рис. 152, а). Исследуют магнитное поле над проводником с током, под проводником, внутри контура, свернутого из проводника в виде кольца, около проводника, свернутого в бифиляр, изолированного проводника с током, помещенного по оси стальной трубки.

2. Изучают магнитное поле длинной катушки с током: внутри катушки на ее продольной оси (рис. 152, б); у концов катушки и вне ее.

3. Торцы длинной катушки заклеивают плотной бумагой. При пропускании тока явно обнаруживают магнитные полюса катушки — железные опилки в наибольшем количестве притягиваются к полюсам. Однако если катушку растянуть в прямой проводник, то магнитное поле сохраняется, а полюсов не обнаруживают. Делают вывод:

наличие полюсов обусловлено только конфигурацией контура с током.

4. Изучают магнитное поле тороида: на его оси, внутри тороида и вне его.

С целью развития знаний, полученных учащимися в курсе физики VII класса, можно рассмотреть опытные факты по обнаружению магнитного поля электрического тока, обусловленного движением различных носителей заряда в твердых телах (металлах), жидкостях (растворах электролитов) и газах (в разреженном состоянии).

Для этого анализируют опыт Мандельштама и Папалекси, а также опыт Эрстеда и на основе их делают вывод: магнитное поле металлического проводника с током обусловлено дрейфом носителей заряда в проводнике, т. е. электронов.

Обнаруживают магнитное поле, создаваемое током в растворе электролита. В последний опускают две контактные пластины из одинакового металла (например, медные) и соединяют их с источником тока. Разъясняют, что магнитное поле возникает при движении положительных и отрицательных носителей заряда — ионов.

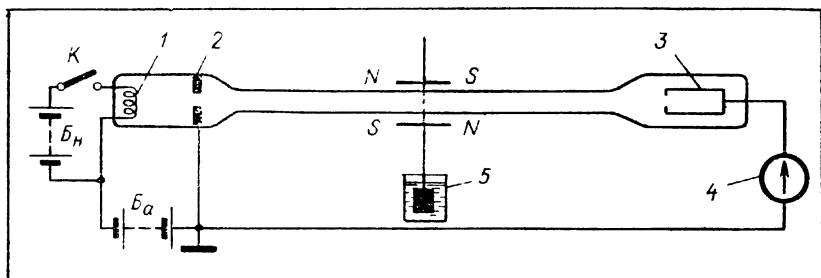


Рис. 153.

движущихся в противоположных направлениях. Их магнитные действия суммируются по принципу суперпозиции полей.

Газосветную трубку соединяют с клеммами высоковольтного источника тока. Ток в трубке, обусловленный направленным движением положительных и отрицательных ионов, а также электронов, образует магнитное поле. Опыт можно поставить и с ртутной лампой ПРК-2, включенной в цепь по известной схеме.

Делают общий вывод: любые направленно движущиеся носители электрического заряда — например, электроны и ионы — образуют магнитное поле.

Большое познавательное значение имеют опыты отечественных физиков Абрама Федоровича Иоффе (1880—1960) и Александра Александровича Эйхенвальда (1864—1944) по обнаружению магнитного поля соответственно электронного пучка (1911) и конвекционного тока (1901). Полезно сообщить учащимся следующие сведения.

Электроны, вылетающие с поверхности катода 1 (рис. 153), разгоняясь в сильном электрическом поле в промежутке 1—2, проходят через отверстие в аноде 2 и попадают с большой скоростью в узкую прямую часть трубки, а затем в цилиндр 3 и гальванометр 4. Тем самым электрическая цепь замыкается. При разомкнутой цепи обе маленькие магнитные стрелки расположены как угодно относительно магнитного поля Земли. На них магнитные действия со стороны этого поля взаимно скомпенсированы. При замыкании цепи обе магнитные стрелки поворачиваются в одну сторону, что можно проверить по правилу правой руки (вытянутые четыре пальца правой руки должны быть направлены против направления электронного потока).

Опыт показывает, что электронный поток в трубке создает такое же по величине магнитное поле (определяется по углу отклонения магнитных стрелок), как и ток в металлическом проводнике той же силы, что и создаваемый электронным пучком в вакуумной

трубке. Цилиндр в сосуде с жидкостью 5 является демпфером, гасящим колебания магнитных стрелок.

Следует разъяснить идею опытов А. А. Эйхенвальда по обнаружению магнитного поля конвекционных токов.

На основании опытов делают общий вывод.

Электрический ток представляет собой физическое явление, в котором упорядоченное движение зарядов органически связано с наличием магнитного поля.

Магнитное поле не зависит от природы носителей заряда. Учащимся полезно выполнить следующие упражнения:

1. Металлический стержень на изолирующей ручке заряжают от одной из клемм аккумулятора, а потом отключают от него. Как этим стержнем создать магнитное поле? Зависят ли результаты опыта от знака заряда на стержне?

2. Электрический ток в растворе электролита представляет собой два противоположно направленных потока: один из положительных, а другой из отрицательных ионов. Почему же такой ток создает магнитное поле?

3. Металлический проводник и раствор электролита соединены последовательно и через них пропускают электрический ток. Образуют ли они одинаковые магнитные поля? Ведь в металлическом проводнике движутся только свободные электроны, а в растворе электролита — два потока противоположно заряженных ионов.

§ 76. Относительность движения и электромагнитные явления

Представляет огромный познавательный интерес роль относительного движения носителей заряда в электромагнитных явлениях.

Ставят учебную проблему: всегда ли неподвижные заряды образуют электрическое поле, а движущиеся заряды электрическое и магнитное поля; не зависит ли результат эксперимента от условий его проведения? Рассматривают следующий мысленный эксперимент.

Имеются две инерциальные системы отсчета K и K' (рис. 154, а). В системе отсчета K помещены индикаторы электрического и магнитного полей — соответственно электрически заряженный бузиновый шарик на шелковой нити и магнитная стрелка. В системе отсчета K' находится неподвижный относительно нее положительный электрический заряд. Эксперимент «проводят» по этапам.

Обе системы отсчета неподвижны друг относительно друга. В каждой из них обнаруживается электрическое поле ($\vec{E} \neq 0$), а магнитного поля нет ($\vec{B} = 0$).

Система отсчета K' движется вдоль оси X вправо с некоторой постоянной скоростью \vec{v} относительно системы отсчета K (рис. 154, б). В этом случае в системе отсчета K' существует только электриче-

ское поле. В системе же отсчета K обнаруживается как электрическое ($\vec{E} \neq 0$), так и магнитное ($\vec{B} \neq 0$) поле. В последней отклоняются электрический маятник и магнитная стрелка. Направление отклонения электрического маятника определяется знаками взаимодействующих зарядов (в данном опыте электрические заряды отталкиваются), а отклонения магнитной стрелки — направлением движения положительного заряда вместе с системой отсчета K' (по правилу правой руки).

Система отсчета K движется вдоль оси X вправо относительно неподвижной системы отсчета K' со скоростью \vec{v} (рис. 154, а). Результаты эксперимента такие же, как и в предыдущем случае, изменяется лишь направление отклонения северного полюса магнитной стрелки.

Если обе системы отсчета движутся в одну сторону и с одинаковой скоростью \vec{v} и в каждой из них находится электрический заряд, неподвижный относительно «своей» системы отсчета, то эти заряды также взаимодействуют электрическими и магнитными силами.

Обращают внимание учащихся на следующее.

При движении электрического заряда относительно любой точки пространства в последней образуется магнитное поле.

Неподвижные относительно инерциальной системы отсчета электрические заряды взаимодействуют только электрическими силами.

Два движущихся относительно инерциальной системы отсчета электрических заряда взаимодействуют электрическими и магнитными силами.

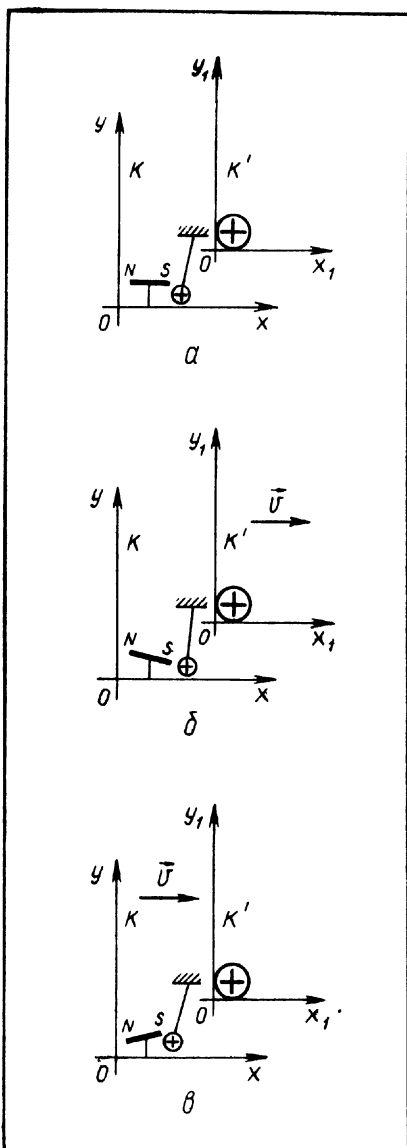


Рис. 154.

Движущиеся в одной и той же системе отсчета электрические заряды с относительной скоростью друг к другу, равной нулю, взаимодействуют электрическими и магнитными силами.

§ 77. Сила Лоренца. Взаимодействие движущихся зарядов

До вывода формулы силы Лоренца желательно рассказать об опыте, доказывающем, что на поток свободных электронов действует магнитное поле. В опыте можно обнаружить, что поток электронов вызывает свечение стекла в точке C (рис. 155, a) и магнитное поле отклоняет электронный поток (рис. 155, b).

Ставят задачу: определить магнитную силу, действующую на один движущийся электрон. Возможна такая последовательность решения задачи.

Поток электронов создает ток I . На него действует магнитное поле силой, определяемой законом Ампера:

$$F'_m = I \Delta l B \sin \alpha.$$

Согласно электронной теории сила тока

$$I = qnvS.$$

Поэтому

$$F'_m = qnvS \Delta l B \sin(\vec{v}, \vec{B}).$$

Но $nS \Delta l = N$ — число электронов электронного потока на отрезке Δl . Поэтому магнитная сила, действующая на один электрон,

$$F_m = \frac{F'_m}{N} = qvB \sin(\vec{v}, \vec{B}) = qvB \sin \alpha.$$

Эта формула справедлива для движения любого электрического заряда в поперечном магнитном поле: электронов, протонов, ионов, атомных ядер и др.

Полученную формулу анализируют для случаев $\vec{v} = 0$, $\vec{v} \parallel \vec{B}$, $\vec{v} \perp \vec{B}$ и каждый из них иллюстрируют рисунком.

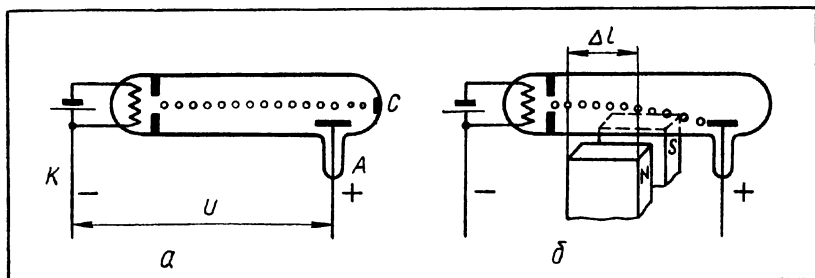


Рис. 155.

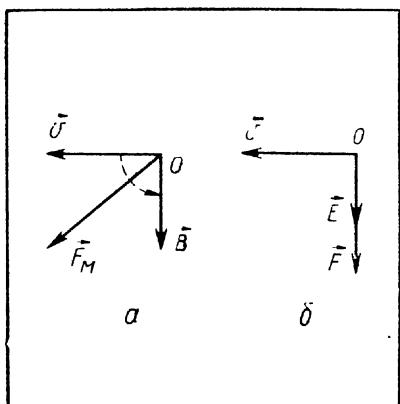


Рис. 156.

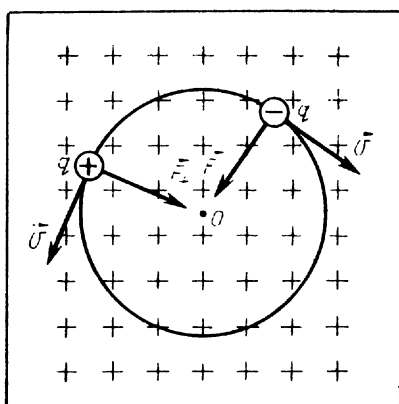


Рис. 157.

Векторная сумма электрической и магнитной сил, действующих на движущийся электрический заряд в электромагнитном поле:

$$\vec{F}_\text{л} = \vec{F}_\text{э} + \vec{F}_\text{м}.$$

Формулу, определяющую силу $\vec{F}_\text{л}$, вывел голландский физик Гендрик Антон Лоренц (1853—1928). В его честь эту силу называют силой Лоренца или лоренцовой силой. Часто лоренцовой называют силу $F_\text{м} = qvB$.

Обращают внимание на следующее.

Направление магнитной силы определяют по правилу левой руки: если вытянутые пальцы левой руки расположить по направлению движения положительного заряда так, что магнитная индукция обращена перпендикулярно ладони, то отогнутый большой палец укажет направление магнитной силы.

Для определения направления магнитной силы, действующей на движущийся отрицательный заряд, надо четыре вытянутых пальца левой руки направить против движения этого заряда.

Направление магнитной силы можно определить также по правилу правого винта: если головку винта вращать от скорости \vec{v} положительного заряда по кратчайшему пути к магнитной индукции \vec{B} , то поступательное движение винта укажет направление магнитной силы (рис. 156). Запись выражения для силы в виде $F_\text{м} = qvB$ дает возможность запомнить правило. На том же рисунке для сравнения показано направление электрической силы.

Магнитная сила перпендикулярна скорости ($\vec{F}_\text{м} \perp \vec{v}$). Из курса физики VIII класса известно, что если скорость материальной точки \vec{v} перпендикулярна действующей на нее силе \vec{F} , то эта точка движется по окружности. Значит, электрический заряд в таких же условиях будет также двигаться по окружности. Следует

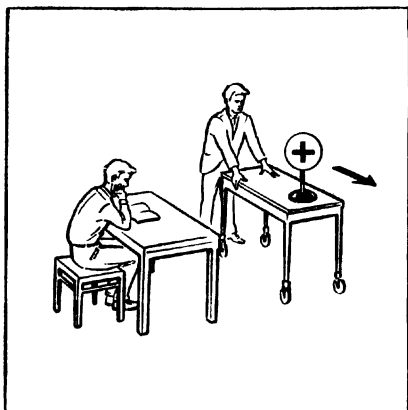


Рис. 158.

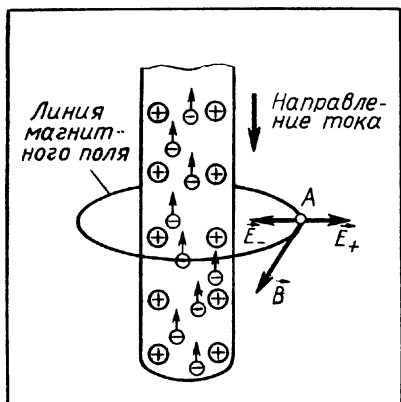


Рис. 159.

подчеркнуть, что магнитная сила при этом является центростремительной. Иллюстрирую рисунок, показывающим движение как положительного, так и отрицательного заряда (рис. 157).

На основе формулы работы $A = Fs \cos(\hat{F}, \vec{s})$ разъясняют, что если сила \vec{F} и скорость заряда \vec{v} , а значит, и его перемещение \vec{s} , взаимно перпендикулярны, то $\cos(\hat{F}, \vec{s}) = \cos \frac{\pi}{2} = 0$ и работа магнитной силы будет также равна нулю. Значит, магнитные силы изменяют траекторию заряда, но работы не совершают.

Если два электрических заряда движутся параллельно друг другу, то между ними действуют электрическая ($F_e \sim \frac{q_1 q_2}{r^2}$) и магнитная ($F_m \sim qvB$) силы. Однако электрическая сила больше магнитной в $\frac{c^2}{v^2}$ раз. Здесь c — скорость света в вакууме ($3 \cdot 10^8$ м/с) и v — скорость движения заряда.

Полезно дать учащимся домашнее задание: обдумать ожидаемые результаты следующего мысленного эксперимента и объяснить их.

Один ученик перемещает прямолинейно и равномерно столик, на котором стоит положительно заряженный шар (рис. 158). Другой ученик находится на некотором расстоянии от него, которое перпендикулярно перемещению столика. Какое поле обнаружит каждый из учеников? Изменится ли результат опыта, если перемещать столик в обратном направлении; если перемещать столик, как и в предыдущем случае, но на нем поместить отрицательно заряженный шар? Величина зарядов одинакова. Какие два предыдущих опыта эквивалентны?

Остается выяснить, почему же проводник с током образует измеримое в лабораторных условиях магнитное поле. Разъясняют, что электроны в проводнике при небольших скоростях дрейфа

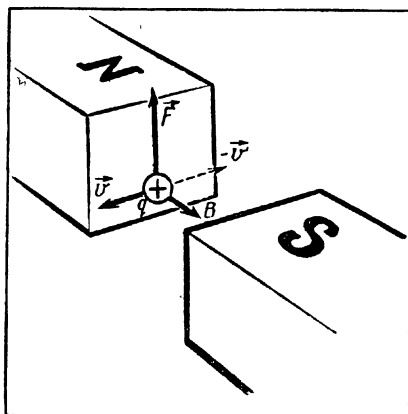


Рис. 160.

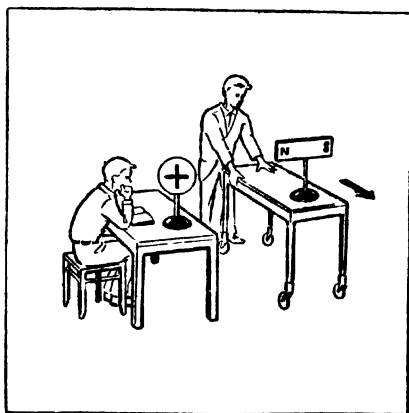


Рис. 161.

(рис. 159) создают вокруг проводника электрическое поле, например в точке A , напряженностью \vec{E}_- . Однако в той же точке A положительные ионы решетки металла образуют электрическое поле напряженностью \vec{E}_+ . Так как все положительные ионы и все электроны образуют в сумме равные по величине заряды, то, очевидно, что $\vec{E}_+ = -\vec{E}_-$. В точке A электрические силы оказываются почти взаимно скомпенсированными. Обнаруживается лишь магнитная сила \vec{F}_m (а значит, и магнитная индукция \vec{B}), создаваемая движущимися зарядами. Она и обнаруживается на опыте.

Движение электрического заряда q относительно магнита (значит, и относительно его магнитного поля) со скоростью \vec{v} , можно рассматривать как движение магнитного поля со скоростью $-\vec{v}$ относительно системы отсчета, связанной с зарядом q (рис. 160). При этом на электрический заряд действует сила. Выясняют, какая эта сила.

В системе отсчета, связанной с магнитом (и его магнитным полем) на заряд действует магнитная сила (сила Лоренца) $F_m = qvB$, а в системе отсчета, связанной с зарядом, на него действует электрическая сила $F_e = qE$, ибо на покоящийся заряд может действовать только электрическая сила. Значит, при движении заряда в магнитном поле в системе отсчета, связанной с зарядом, образуется электрическое поле с напряженностью \vec{E} , которое и действует на этот заряд. Очевидно, что эти силы равны друг другу. Поэтому

$$qE = qvB,$$

или

$$E = vB.$$

Делают вывод: при изменении магнитного поля появляется электрическое поле. Учащиеся предлагают обдумать ожидаемые результаты следующего мысленного эксперимента.

Один ученик перемещает столик, на котором стоит постоянный магнит (рис. 161). Другой ученик находится на некотором расстоянии от него. Перед ним помещен заряженный шар. Какая сила действует на заряд? Что ответит каждый из учеников? Кто из них прав?

Во всех рассмотренных явлениях в этом параграфе было принято условие (для упрощения), что $\vec{v} \perp \vec{B}$. В общем же случае, когда эти векторные величины составляют между собой угол, отличный от прямого (кроме, 0 и π), вектор магнитной индукции нужно спроецировать на направление, перпендикулярное вектору скорости, и учитывать только эту нормальную к скорости составляющую вектора магнитной индукции.

Учащимся следует сообщить о применениях действия магнитного поля на потоки заряженных частиц в масс-спектрографах, циклотронах, кинескопах, электронных микроскопах, для удержания горячей плазмы (тепловая изоляция горячей плазмы от стенок трубки). Действием магнитного поля Земли на заряженные частицы объясняют полярные сияния, образование радиационных поясов Земли. Мощные магнитные поля во Вселенной создают своего рода ускорители космических частиц. Все эти вопросы представляют большой интерес для учащихся и могут быть предметом их самостоятельной работы во внеурочное время и темами кратких сообщений¹.

Завершить изучение темы можно следующими упражнениями:

1. Протон и ядро атома гелия влетают с одинаковой скоростью в однородное поперечное магнитное поле. Будут ли они двигаться по одной и той же круговой траектории? Ответ обосновать.

2. Протон, ион хлора (Cl^-) и ядро атома лития влетают с одинаковой скоростью в однородное поперечное магнитное поле. Определите отношение радиусов их круговых траекторий и направления движений. Решение сопроводите рисунком.

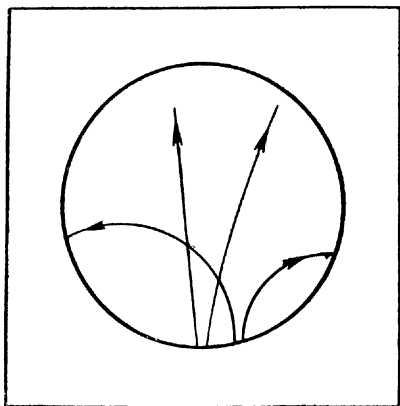


Рис. 162.

3. До какой температуры нужно нагреть атомарный водород, чтобы его атомы обладали той же кинетической энергией поступательного движения, что и протоны в Серпуховском ускорителе на 76 ГэВ?

4. Четыре частицы влетели в однородное поперечное магнитное поле. Их траектории показаны на рисунке 162. Магнитное поле направлено перпендикулярно плоскости рисунка к читателю. Что вы можете

¹ См. рекомендательные указатели литературы: От Ньютона до Эйнштейна. М., 1972; Физика для всех. М., 1974.

сказать о характеристиках частиц, если величина их зарядов одинакова (знак заряда, сравнительная величина импульсов и энергий)?

5. Пользуясь законами механики и электродинамики, определите, как будет двигаться электрон в однородном продольном магнитном поле.

Глава XVII

ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ИНДУКЦИЯ

§ 78. Введение

Опытные факты, которые лежат в основе открытого Фарадеем явления электромагнитной индукции, и качественное описание этого явления рассматривают в курсе физики VII класса. Одна из основных задач в изучении этого явления в IX классе состоит в том, чтобы раскрыть его природу и вместе с этим обеспечить формирование у учащихся представления о едином электромагнитном поле.

Электромагнитная индукция — это явление возникновения электродвижущей силы (э.д.с. индукции) в проводящем контуре, находящемся в переменном магнитном поле или движущемся в постоянном магнитном поле.

Выяснить природу явления электромагнитной индукции — это значит установить связь между электрическим и магнитным полями в данном явлении. Устанавливая эту связь, недостаточно ограничиться случаем неподвижного проводника в переменном во времени магнитном поле и выводом о том, что изменяющееся магнитное поле возбуждает вихревое электрическое поле. Необходимо пойти дальше по пути формирования у учащихся представления о том, что электрическое и магнитное поля являются проявлением единого целого — электромагнитного поля, и показать, что деление поля на электрическое и магнитное определяется выбором системы отсчета, в которой существует электрический заряд или ток.

Это можно сделать, если рассмотреть явление электромагнитной индукции в движущихся проводниках не только в системе отсчета, где имеется магнитное поле и движется контур, но и в системе отсчета, связанной с этим контуром.

Важно показать учащимся, что эквивалентность опытов по возбуждению индукционного тока в случае замкнутого проводника, движущегося в магнитном поле, и в случае неподвижного проводника, находящегося в переменном магнитном поле, — это фундаментальный экспериментальный факт. Этот факт говорит о том, что никакими измерениями электромагнитных величин внутри системы отсчета нельзя установить, движется ли эта система равномерно и прямолинейно или покоится. Известно, что этот экспери-

ментальный факт явился одной из причин, которые привели Эйнштейна к теории относительности.

Закон электромагнитной индукции $\mathcal{E}_i = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$ утверждает, что э.д.с. электромагнитной индукции в замкнутом контуре равна взятой с противоположным знаком скорости изменения потока магнитной индукции через площадь, ограниченную контуром. Эта формула универсальна: она применима как для определения э.д.с. индукции в неподвижном контуре, когда изменение магнитного потока обусловлено изменением магнитной индукции во времени, так и для определения э.д.с. индукции в контуре, движущемся в постоянном магнитном поле так, что поток магнитной индукции через контур изменяется.

Структурой материала рассматриваемой темы в учебном пособии «Физика, 9» предусмотрено установление закона электромагнитной индукции на основании опытов, а затем при изучении явления электромагнитной индукции в движущихся проводниках показано, что этот закон можно вывести теоретически.

Возможна и несколько иная последовательность изложения темы. Рассматривают явление электромагнитной индукции в движущемся проводнике и выводят закон электромагнитной индукции теоретически. Справедливость закона подтверждают на опытах, в том числе и для случая неподвижного проводника в переменном во времени магнитном поле.

При изучении явления электромагнитной индукции учащиеся вновь встречаются с использованием умозаключения по аналогии при выводе формулы энергии магнитного поля катушки с током. Умозаключения по аналогии используют и далее в курсе физики X класса. Поэтому важно научить учащихся логически грамотно делать такие умозаключения. Это можно сделать, если учесть структуру умозаключения по аналогии, которую в общем виде можно представить так.

Известно, что

- 1) изучаемый объект A обладает свойствами a_1, a_2, a_3, \dots ,
- 2) изученный объект B обладает свойствами $b_1, b_2, b_3, b_4, b_5, \dots$,
- 3) свойства a_1, a_2, a_3 объекта A одинаковы со свойствами b_1, b_2, b_3 объекта B , т. е. объекты A и B аналогичны; они обладают частичным сходством.

Тогда на основании частичного сходства между объектами A и B или по аналогии предполагают в объекте A наличие свойства a_4 , одинакового со свойством b_4 в объекте B .

Ввиду того что результаты вывода по аналогии носят вероятностный характер, необходимо обратить внимание учащихся на опытную проверку полученной формулы. Кроме того, вывод по аналогии не исключает более строгого вывода формулы, который средствами элементарной математики может быть также дан в школьном курсе физики.

§ 79. Явление электромагнитной индукции

При изучении явления электромагнитной индукции особенно важна определенная система демонстрационных опытов. Различные случаи возникновения индукционного тока полезно рассмотреть на одной демонстрационной установке (рис. 163). Из деталей, входящих в универсальный трансформатор (сердечник, катушка 120/220 В, полюсные наконечники), собирают электромагнит и ставят его на тележку. Зажимы катушки присоединяют к источнику постоянного тока, например к аккумулятору, а в цепь ее включают реостат и демонстрационный амперметр. Проводник, в котором индуцируется ток, замыкают на гальванометр.

Первоначально демонстрируют явление возникновения электрического тока при перемещении проводника между полюсами электромагнита. Возникающий электрический ток называют индукционным.

Видоизменяют опыт. Проводник располагают так, чтобы он проходил между полюсами электромагнита, и оставляют его неподвижным. Перемещают тележку с электромагнитом.

После этого выясняют то общее, от чего зависит появление индукционного тока в проделанных опытах: в замкнутом проводящем контуре возникает индукционный ток при относительном движении проводника и магнита так, что при этом поток магнитной индукции, пронизывающий площадь, ограниченную контуром, изменяется.

Затем перед учащимися ставят вопрос: «Можно ли возбудить индукционный ток в проводнике (замкнутом на гальванометр), не перемещая провод относительно электромагнита?»

После решения проблемы демонстрируют явление возникновения индукционного тока в проводнике, покоящемся относительно электромагнита при изменении тока в катушке последнего.

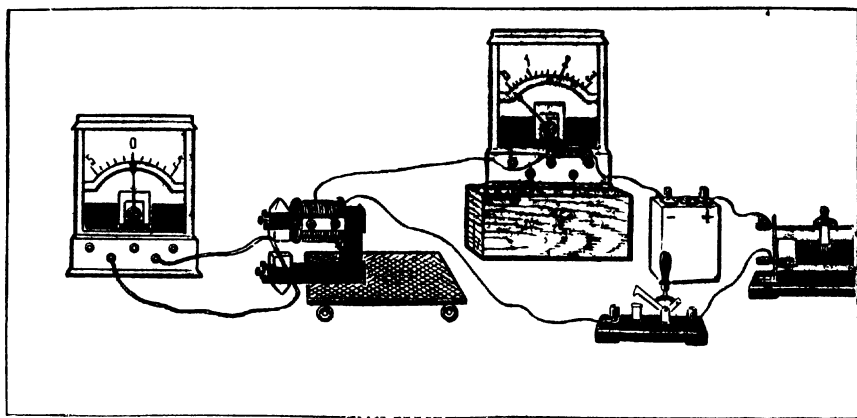


Рис. 163.

Отмечают роль Фарадея в установлении этого экспериментального факта.

Для закрепления знаний учащихся могут быть использованы другие опыты, описанные в методической литературе [ДЭ, II, опыт 90].

Здесь же уместно осветить материал из истории открытия явления электромагнитной индукции. Учащихся полезно познакомить с жизнью Фарадея, весьма интересной и поучительной. Следует также обратить внимание школьников на важность сделанного Фарадеем открытия, которое служит ярким подтверждением положения о том, что опыт в физике является источником знаний (однако этим не исчерпывается его роль).

Далее объясняют природу явления электромагнитной индукции в каждом из рассмотренных случаев. Целесообразно при этом опираться на известное учащимся выражение для полной силы, действующей на электрический заряд в электромагнитном поле:

$$\vec{F} = \vec{F}_э + \vec{F}_м.$$

Возникновение индукционного тока при движении проводника в магнитном поле объясняют действием на движущиеся электрические заряды проводника в системе отсчета, связанной с магнитом, силы Лоренца (точнее, магнитной составляющей силы Лоренца). В связи с этим показывают, что направление индукционного тока можно определить при помощи того же правила, которое использовали для определения направления силы Лоренца.

Далее анализируют явление возникновения индукционного тока в опыте с движущимся электромагнитом, т. е. в системе отсчета, связанной с проводником, в котором индуцируется ток.

Выясняют, что в направлении «вдоль проводника» магнитная сила равна нулю и, следовательно, она не может быть причиной движения электронов проводимости в этом направлении. Остается предположить, что электроны перемещаются вдоль проводника в результате действия на них электрической силы $\vec{F}_э = q\vec{E}$. Значит, в системе отсчета, связанной с проводником, имеется электрическое поле напряженностью \vec{E} .

В итоге рассмотрения явления электромагнитной индукции в движущихся проводниках формулируют выводы, к которым приходят два наблюдателя: один, изучающий явление возникновения индукционного тока в системе отсчета, где имеется магнитное поле и проводник движется, и другой — в системе отсчета, где имеется магнитное поле и проводник неподвижен.

Первый наблюдатель находит, что в его системе отсчета имеется только магнитное поле ($\vec{B} \neq 0$, а $\vec{E} = 0$), а индукционный ток возникает в результате действия на электрические заряды проводника магнитной составляющей силы Лоренца.

Второй наблюдатель находит, что в его системе отсчета имеется и магнитное поле и электрическое ($\vec{B}_1 \neq 0$ и $\vec{E}_1 \neq 0$), в резуль-

тате действия последнего на электрические заряды проводника в нем и возникает индукционный ток.

Почему два наблюдателя объясняют одно и то же явление по-разному? Ответ на этот вопрос заключается в том, что существует единое электромагнитное поле, которое в частных случаях разделяется на поле электрическое и поле магнитное в зависимости от выбора системы отсчета. Эти частные случаи можно наблюдать при определенных условиях в некоторых инерциальных системах отсчета. Электрическое поле — это поле неподвижного в данной системе отсчета электрического заряда. Магнитное поле — это поле неподвижного в данной системе отсчета проводника с током. Если взять другую инерциальную систему отсчета, движущуюся относительно электрического заряда или электрического тока (таких систем отсчета бесчисленное множество), то в этих системах отсчета измерения покажут наличие и электрического и магнитного поля.

После выяснения природы явления электромагнитной индукции в движущихся проводниках учащиеся могут самостоятельно ответить на вопрос о том, в чем заключается причина возникновения индукционного тока в третьем опыте, т. е. когда замкнутый проводник покоится в переменном магнитном поле. Она заключается в возникновении электрического поля, вызванного изменением магнитного поля.

Впервые к выводу о том, что переменное во времени магнитное поле возбуждает электрическое поле, пришел Максвелл. Об этом сообщают учащимся.

Для лучшего усвоения учащимися материала о природе явления электромагнитной индукции полезно рассмотреть на уроке вопрос о том, можно ли измерениями, произведенными внутри системы отсчета, связанной с проводником, установить, движется ли этот контур равномерно и прямолинейно в постоянном магнитном поле (так, что магнитный поток, пронизывающий его контур, изменяется) или этот контур неподвижен в переменном магнитном поле. Установить, какая из этих двух возможностей имеет место, измерениями внутри системы отсчета нельзя. Явление электромагнитной индукции протекает одинаково и в том, и в другом случае, в чем учащиеся убедились на опыте.

§ 80. Правило Ленца

Правило, носящее имя Эмилия Христиановича Ленца (1804—1865) может быть введено с помощью специального прибора [ДЭ, II, опыт 92]. Показывают взаимодействие целого кольца и магнита (при перемещении последнего относительно первого) и объясняют явление взаимодействием возникающего в кольце индукционного тока с магнитным полем постоянного магнита (так как разрезанное кольцо при тех же условиях с магнитом не взаимодействует).

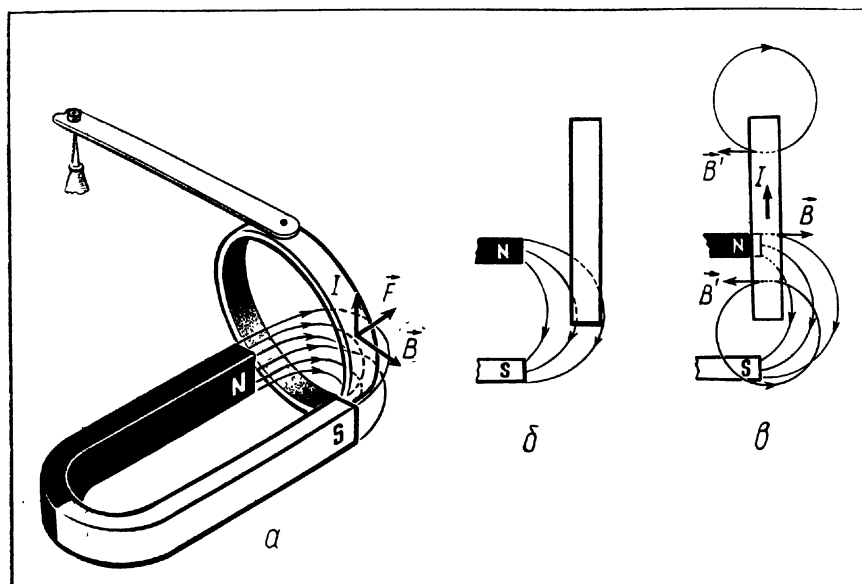


Рис. 164.

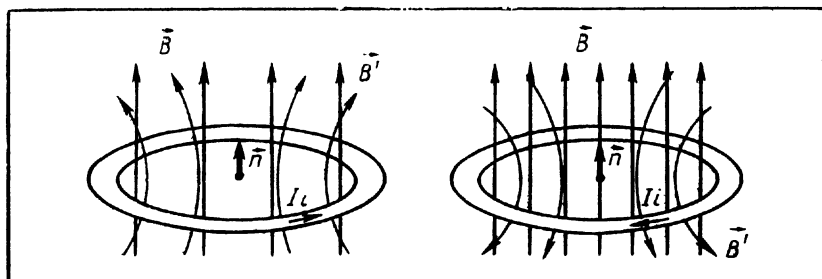


Рис. 165.

В данном случае направление силы Ампера, действующей на кольцо с индукционным током, и направление вектора индукции магнитного поля известны из опыта. Исходя из этого, по правилу левой руки можно определить направление тока в кольце (рис. 164, а).

Выясняют, что поток магнитной индукции Φ , пронизывающий кольцо, увеличивается (рис. 164, б), а поток магнитной индукции (Φ'), созданный индукционным током, препятствует этому увеличению (рис. 164, в). На этом основании формулируют правило Ленца.

Затем по правилу Ленца определяют направление индукционного тока в проводочном витке, расположенном в переменном магнитном поле (рис. 165).

При этом обращают внимание на то, что изменение магнитного потока $\Delta\Phi$, вызывающее индукционный ток, и магнитный поток индукционного тока Φ' всегда имеют противоположные знаки: если $\Delta\Phi > 0$, то $\Phi' < 0$, если $\Delta\Phi < 0$, то $\Phi' > 0$. Так, например, в случае, показанном на рисунке 165, справа, при увеличении магнитного потока $\Phi_2 > \Phi_1$, $\Delta\Phi = (\Phi_2 - \Phi_1) > 0$, а $\Phi' < 0$.

Далее разъясняют (например так, как это сделано в учебном пособии для IX класса), что правило это следует из закона сохранения и превращения энергии.

Индукционные токи производят определенную работу (например, нагревают проводник). Следовательно, такой же величины работа должна быть совершена внешними силами при движении замкнутого проводника в магнитном поле.

Действительно, внешняя сила производит работу, так как индукционные токи, взаимодействуя с магнитным полем, вызывают направленную против движения, т. е. препятствующую этому движению силу Ампера.

Эти рассуждения полезно повторить перед изучением энергии электрического тока и проиллюстрировать их решением следующей задачи.

По горизонтальным рельсам, между концами которых включен резистор с сопротивлением R , перемещается проводник длиной l . Система находится в однородном вертикальном магнитном поле с индукцией \vec{B} . Определите мощность тепловых потерь на резисторе при движении проводника с постоянной скоростью v . Сопротивлением самого проводника и рельсов пренебречь.

Решая эту задачу, полезно показать, что количество теплоты, выделяемое на резисторе в единицу времени, равно мощности, развиваемой внешней силой, движущей проводник в магнитном поле.

§ 81. Закон электромагнитной индукции

1. Установление закона электромагнитной индукции на основании опытов.

Устанавливая закон электромагнитной индукции на основании опытов, необходимо продемонстрировать зависимость величины индукционного тока от скорости изменения потока магнитной индукции через площадь, ограниченную контуром проводника. Это целесообразно сделать на тех же опытах, которые демонстрировали ранее (см. § 79).

Во всех рассмотренных опытах получают: $I_i \sim \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$.

Изменяют сопротивление контура R и обнаруживают, что величина индукционного тока

$$I_i \sim \frac{\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}}{R}.$$

Отмечают, что ток в контуре возникает в результате действия на электрические заряды проводника сил электрического или магнитного поля. Величина работы этих сил по перемещению единичного положительного заряда вдоль контура — это э.д.с. в контуре, называемая здесь э.д.с. индукции.

По закону Ома для полной цепи $I_i = \frac{\mathcal{E}_i}{R}$, поэтому, подставив значение индукционного тока в предыдущее соотношение, получают:

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

Сообщают, что если все величины, входящие в данное соотношение, выразить в единицах СИ, то коэффициент пропорциональности в нем по абсолютной величине будет равен единице. Тогда

$$|\mathcal{E}_i| = \left| \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \right|.$$

Далее поясняют следующее. Так как э.д.с. индукции (по правилу Ленца) всегда создает индукционный ток такого направления, что образованный им поток магнитной индукции (Φ') через площадь, ограниченную контуром, препятствует изменению потока магнитной индукции ($\Delta\Phi$), или Φ' и $\Delta\Phi$ имеют противоположные знаки (как было показано ранее), то в окончательном виде полученной формулы должен справа стоять знак минус:

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

2. Вывод закона электромагнитной индукции при рассмотрении этого явления в проводнике, движущемся в магнитном поле.

Прежде чем приступить к выводу закона, полезно повторить следующие вопросы: сила Лоренца (формула, определение направления силы); формула для вычисления механической работы ($A = F s \cos \alpha$); понятие э.д.с.; правило правого винта, определяющее направление положительной нормали к рамке с током; понятие о магнитном потоке.

Первоначально рассматривают движение в магнитном поле прямого провода, скорость которого \vec{v} перпендикулярна к его длине и составляет с вектором индукции магнитного поля угол α (рис. 166). Выясняют следующее.

Под действием силы Лоренца свободные электроны проводника смещаются к одному концу стержня B , оставляя на другом конце A избыток положительных зарядов. Это разделение зарядов продолжается до тех пор, пока разделенные заряды не создадут внутри стержня такое электростатическое поле (направление от A к B), в котором на электрические заряды проводника будет действовать сила, равная по величине и противоположная по направлению силе Лоренца. Работа силы Лоренца и работа сил возникающего электростатического поля по перемещению единичного положительного заряда вдоль проводника (от B к A) равны по величине и противоположны по знаку. Первая работа представляет собой э.д.с. индукции в проводнике AB , вторая — разность потенциалов между концами B и A проводника, т. е.

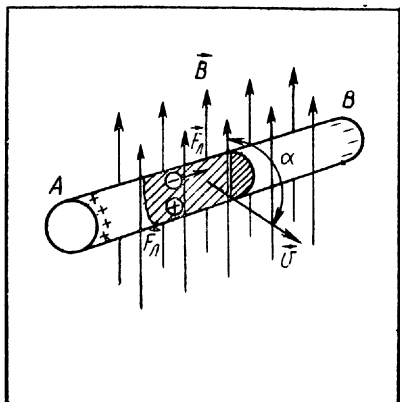


Рис. 166.

$$\mathcal{E}_i = -U_{BA} = U_{AB}.$$

Затем вычисляют величину э.д.с. индукции.

Исходя из того, что работа силы Лоренца по перемещению положительного заряда q вдоль проводника на расстояние l равна $A = F_{\text{л}} l = (qvB \sin \alpha) \cdot l$, а э.д.с. $\mathcal{E} = \frac{A}{q}$, получают для э.д.с. индукции в проводнике выражение: $\mathcal{E}_i = vBl \sin \alpha$.

Очевидно, что если концы A и B проводника соединить проводом, то в электрической цепи возникает индукционный ток, величина которого (как это следует из закона Ома для полной цепи) $I_i \sim \mathcal{E}_i$.

В опытах с движущимся между полюсами электромагнита проводником, замкнутым на гальванометр, демонстрируют, что действительно $I_i \sim v$; $I_i \sim B$; $I_i = f(\alpha)$.

Далее рассматривают изменение потока магнитной индукции через контур, образовавшийся при подключении проводника AB к гальванометру, если проводник перемещается перпендикулярно вектору \vec{B} , из положения, указанного на рисунке 167 а, в положение, указанное на рисунке 167, б.

Для этого предварительно по правилу правого винта определяют направление положительной нормали к контуру, исходя из направления индукционного тока в контуре.

В первом положении поток магнитной индукции не пронизывает площадь, ограниченную контуром проводника, т. е. $\Phi_1 = 0$;

во втором положении $\Phi_2 = BS \cos(\vec{B}, \vec{n}) = -Blq$.

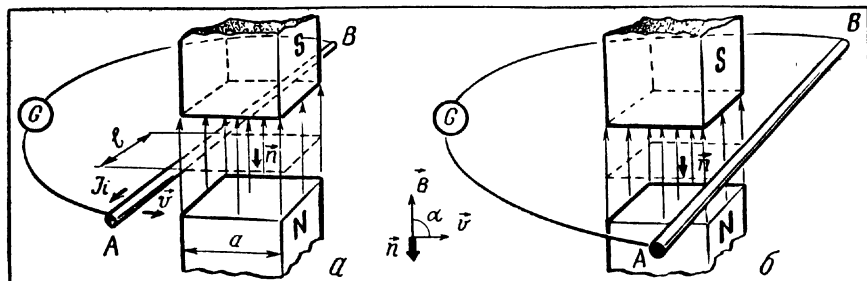


Рис. 167.

Изменение потока магнитной индукции при перемещении проводника из первого положения во второе $\Delta\Phi = \Phi_2 - \Phi_1 = -Bla$.

Сравнение полученного выражения с формулой $\mathcal{E}_i = Blv \sin \alpha$ позволяет записать, (так как $\alpha = 90^\circ$ и $v = \frac{a}{\Delta t}$), что

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

Обращают внимание на то, что в законе электромагнитной индукции \mathcal{E}_i имеет знак, противоположный $\Delta\Phi$.

Это соответствует правилу Ленца, или тому, что (как было выяснено ранее) поток магнитной индукции (Φ'), образованный индукционным током, и изменение потока магнитной индукции ($\Delta\Phi$), вызвавшее этот ток, имеют противоположные знаки.

Таким образом, Φ' и \mathcal{E}_i имеют одинаковые знаки. Поэтому, если величина э.д.с. индукции, определенная из уравнения $\mathcal{E}_i = - \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$, положительна, то и поток магнитной индукции тока Φ' будет также положительным, т. е. вектор индукции магнитного поля индукционного тока \vec{B}' в этом случае направлен в ту же сторону, что и единичная положительная нормаль к площади контура \vec{n} . И наоборот, если $\mathcal{E}_i < 0$, то $\Phi' < 0$, т. е. векторы \vec{B}' и \vec{n} направлены в разные стороны. Зная направление вектора \vec{B}' , можно определить по правилу правого винта направление индукционного тока в контуре.

На опытах демонстрируют справедливость закона электромагнитной индукции и для неподвижного замкнутого проводника в переменном во времени магнитном поле.

В заключение дают определение явления электромагнитной индукции.

Обращают внимание на то, что величина э.д.с. индукции в проводнике не зависит от рода вещества и, следовательно, от сопротивления проводника, его температуры. Объясняется это тем, что э.д.с. характеризует здесь работу сил поля. Проводник при этом играет второстепенную роль. Он служит прибором, позволяющим обнаружить поле.

После вывода закона электромагнитной индукции важно сопоставить понятие об э.д.с. гальванического элемента с понятием об э.д.с. индукции: в первом случае работа сторонних сил сосредоточена внутри элемента, во втором — сторонние силы действуют во всех точках контура, площадь которого пронизывается переменным потоком магнитной индукции. Поэтому в катушке из n витков э.д.с. индукции складывается из э.д.с. индукции отдельных витков и равна

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

При изучении единиц магнитной индукции и потока магнитной индукции подчеркивают, что закон электромагнитной индукции в единицах СИ используют для установления единицы потока магнитной индукции — вебер. Для установления единицы магнитной индукции используют соотношение $\Phi = BS \cos \alpha$.

Полезно показать, что установленное ранее (в теме «Магнитное поле») значение $1\text{Тл} = 1 \frac{\text{Н}}{\text{А} \cdot \text{м}} = 1 \frac{\text{Вб}}{\text{м}^2}$.

§ 82. Вихревое электрическое поле

Выяснение структуры электрического поля, возникающего при изменении магнитного поля, может быть сделано на основе следующих рассуждений.

Пусть убывающее магнитное поле окружено круговым проводочным витком, как схематически показано на рисунке 168. Круговой индукционный ток, возникающий в витке, — это движение свободных электронов металла под действием электрического поля напряженностью \vec{E} , которое, по соображениям симметрии, одинаково во всех точках проводника. Если для изображения этого поля воспользоваться линиями напряженности электрического поля, то получатся замкнутые кривые. Такое электрическое поле, в отличие от электростатического (для которого электрические заряды являются началом и концом его линий напряженности), называют вихревым электрическим полем.

При этом можно провести аналогию. Магнитное поле является вихревым: линии индукции его замкнутые. Это соответствует тому, что в природе нет (не обнаружено) магнитных зарядов. Вихревое электричес-

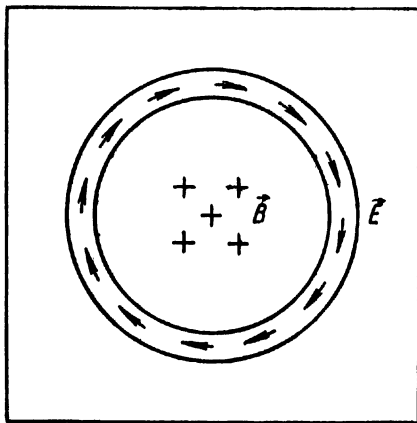


Рис. 168.

кое поле возбуждается не электрическими зарядами, а переменным магнитным полем.

Подчеркивают, что, в отличие от электростатического, вихревое электрическое поле не потенциально, т. е. работа по перемещению электрического заряда по замкнутому пути в вихревом поле не равна нулю. Поэтому, например, нагреваются замкнутые проводники, помещенные в переменное магнитное поле.

Можно продемонстрировать это явление в опыте с алюминиевым кольцом, помещенным на стальной сердечник (или ярмо универсального трансформатора), укрепленный в катушке индуктивности или катушке универсального трансформатора [ДЭ, II, стр. 262].

Обращают внимание учащихся на то, что явление электромагнитной индукции лежит в основе работы бетатрона, а также самых распространенных электротехнических машин: генераторов и трансформаторов. Отмечают, что в случае бетатрона наглядно проявляется факт реального существования вихревого электрического поля без наличия в нем проводника.

Уравнение $\mathcal{E}_i = - \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$ позволяет определить не только величину, но и направление напряженности вихревого электрического поля.

Если учитель посчитает возможным поставить перед учащимися задачу: определить направление вектора напряженности вихревого электрического поля, то для этого можно воспользоваться следующим правилом. Допустим, что при выбранном положительном направлении нормали \vec{n} к площади контура \mathcal{E}_i найденная из уравнения $\mathcal{E}_i = - \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$ получается положительной. В этом случае направление вектора напряженности вихревого электрического поля (или направление линий напряженности) совпадает с направлением вращения рукоятки правого буравчика, поступательное движение которого задано направлением вектора \vec{n} .

Определение направления вектора напряженности вихревого электрического поля включает в себя следующую последовательность действий (алгоритм):

- 1) выбор положительного направления нормали к площади контура, пронизываемого магнитным полем;

- 2) определение знака потока магнитной индукции из выражения для его величины $\Phi = BS \cos \alpha$ (этот знак зависит от величины угла α , который вектор \vec{B} составляет с положительным направлением нормали \vec{n});

- 3) определение вида неравенства $\Phi_2 \leq \Phi_1$;

- 4) определение знака величины $\Delta \Phi = \Phi_2 - \Phi_1$;

- 5) определение знака \mathcal{E}_i из формулы $\mathcal{E}_i = - \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$;

- 6) определение направления линий напряженности вихревого электрического поля, т. е. определение направления вектора \vec{E} .

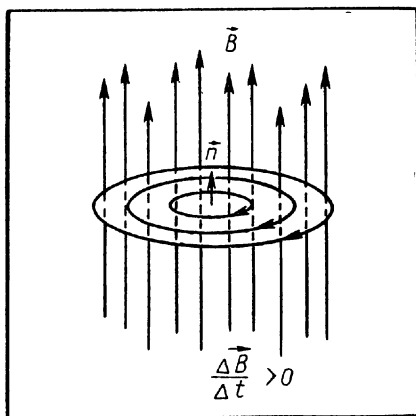


Рис. 169.

Проиллюстрируем сказанное на примере решения следующей задачи. **Задача.** На рисунке изображены линии индукции усиливающегося магнитного поля \vec{B} . Проставьте на чертеже направление линий напряженности возникающего вихревого электрического поля.

Выбирают (произвольно) положительное направление нормали \vec{n} , например, совпадающее с вектором \vec{B} . Тогда поток магнитной индукции, пронизывающий контур, $\Phi > 0$; $\Delta\Phi > 0$; $\mathcal{E}_i < 0$, т. е. направление напряженности вихревого электрического поля противоположно направлению вращения рукоятки правого винта, поступательно движущегося вдоль нормали \vec{n} (рис. 169).

Очевидно, что описанный способ определения направления вектора \vec{E} вихревого электрического поля может быть использован и для определения направления индукционного тока вместо правила Ленца.

§ 83. Индукционный ток в массивных проводниках. Токи Фуко

Основные применения электромагнитной индукции изучают в X классе в теме «Производство, передача и использование электрической энергии». В рассматриваемой же теме целесообразно показать применение токов Фуко и объяснить способ устранения их вредного действия.

Массивные проводники имеют очень малое сопротивление. Если они окажутся в переменном магнитном поле, то возникающая в них э.д.с. индукции создаст значительные токи ($I = \frac{\mathcal{E}}{r}$). Эти токи могут быть использованы для нагревания и плавления металлов.

В наборе к универсальному трансформатору имеется медное кольцо с желобом, в котором можно расплавить третник или олово (рис. 170). Этот опыт может служить иллюстрацией электрической плавки металлов. Установка для плавки представляет собой трансформатор, который учащиеся будут изучать в X классе. Здесь же можно рассмотреть эту установку как источник переменного магнитного поля (катушка с сердечником). Это поле индуцирует в медном кольце ток, приводящий к интенсивному нагреванию его. Следует отметить, что такой способ незаменим для плавки металлов в вакууме.

Использование токов Фуко в успокоительных системах электроизмерительных приборов можно показать при помощи маятника Вальтенгофена

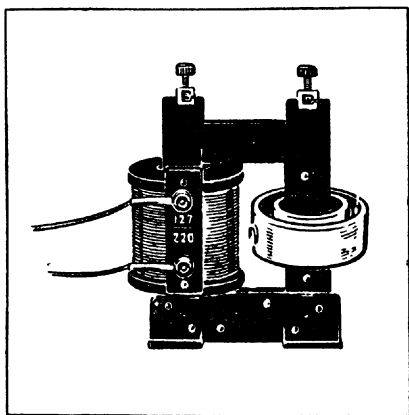


Рис. 170.

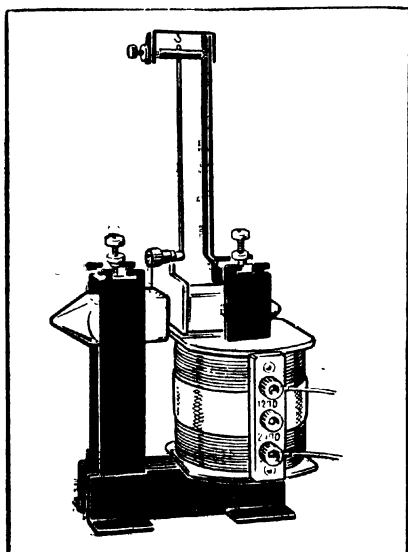


Рис. 171.

(рис. 171). Если в этой установке использовать дроссельную катушку, то опыт будет особенно эффективен.

Не включая ток в цепи катушки, отклоняют маятник со сплошным сектором и отпускают. Маятник долго качается без заметного уменьшения амплитуды колебаний. Но как только включают ток ($I \approx 1A$), маятник останавливается, как будто он попал в очень вязкую жидкость.

Объясняют явление. В сплошном алюминиевом секторе возникает ток, который в соответствии с правилом Ленца своим магнитным полем препятствует движению сектора.

Аналогичное устройство имеется и в электроизмерительных

приборах, что обеспечивает быстрое прекращение колебаний стрелок. Эти колебания возникают при каждом изменении силы тока.

В магнитоэлектрических системах измерительных приборов гашения колебаний стрелки достигают еще проще. Проводник в виде рамки, которая поворачивается в магнитном поле, наматывают на алюминиевый каркас. При возникновении колебаний в каркасе создается индукционный ток, который своим магнитным полем тормозит колебания рамки.

Для того чтобы учащиеся лучше представили себе возникновение вихревых токов в алюминиевом секторе, его можно изобразить последовательно в виде рамки с увеличивающейся толщиной проводника (рис. 172). Таким образом, сечение любого сердечника можно представить в виде замкнутого контура из толстого про-

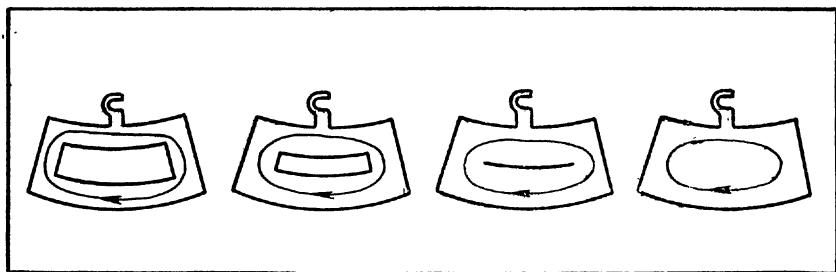


Рис. 172.

водника так, что его противоположные стороны касаются друг друга.

Желательно познакомить учащихся с применением вихревых токов в тахометрах и спидометрах. В настоящее время на всех автомашинах установлены индукционные спидометры.

При помощи гибкого вала вращательное движение передается от двигателя к спидометру, который установлен на общем приборном щитке. На конце гибкого вала, находящегося в спидометре, укреплен небольшой подковообразный магнит. Перед магнитом находится алюминиевый диск, ось которого помещена в шариковые подшипники. При вращении магнита в диске наводятся вихревые токи. Магнитное поле этих токов приводит диск во вращательное движение. К оси диска прикреплена спиральная пружина, которая противодействует вращению диска. В результате этого диск поворачивается на некоторый угол пропорционально скорости вращения магнита, а следовательно, и скорости движения автомашины. К оси диска прикреплена стрелка, которая по специально проградуированной шкале показывает скорость автомашины непосредственно в километрах в час. Можно напомнить учащимся, что таким способом измеряют мгновенную скорость.

Для опытов, поясняющих работу спидометра, необходимо иметь подковообразный магнит, укрепленный на оси так, чтобы его можно было вращать при помощи центробежной машины, и специальный алюминиевый диск, установленный в обойме со стержнем [ДЭ, II, стр. 239].

При вращении магнита (рис. 173) диск поворачивается, и по отклонению метки *a* судят о быстроте вращения вала центробежной машины. Повороту диска противодействует пружина.

В случае отсутствия специального диска можно показать упрощенные варианты этого опыта. В одном из них используют алюминиевый стакан от калориметра, который опирается на иглу для магнитных стрелок (рис. 174), а во втором — алюминиевое кольцо от катушки Томсона, подвешенное на тонкой нити (рис. 175).

Для объяснения способа ослабления токов Фуко можно поставить перед учащимися следующую проблему. Чтобы усилить магнитный поток катушек двигателей, генераторов и др., в них помещают стальные сердечники. Так как все эти устройства работают при переменных магнитных полях, то в сердечниках будут возникать значительные токи. В маломощных устройствах это приведет

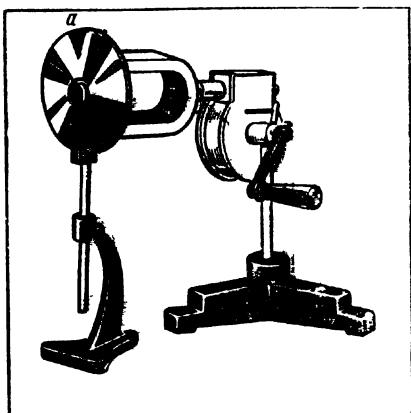


Рис. 173.

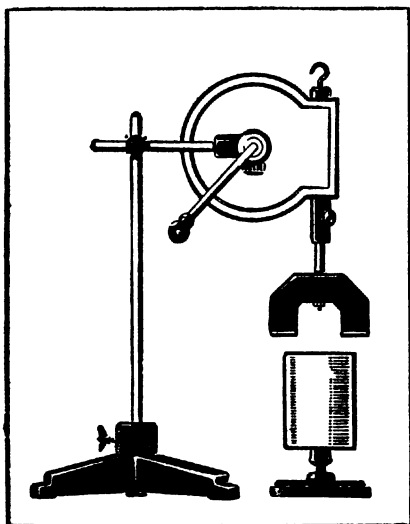


Рис. 174.

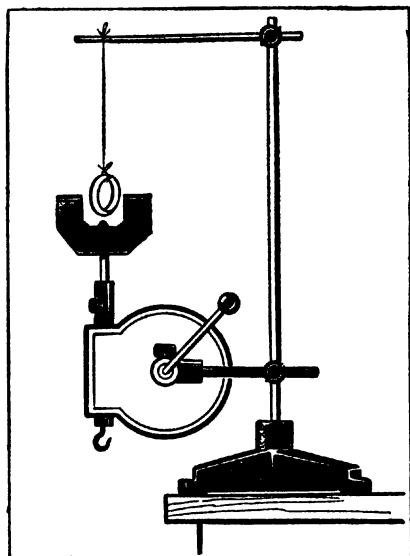


Рис. 175.

к потерям энергии на ненужный нагрев сердечников, а в мощных — к перегреву и выходу из строя катушек. Следовательно, необходимые для работы электрических машин сердечники могут привести к неприятным последствиям.

Уменьшить токи Фуко можно, увеличив сопротивление сердечника. Для этого сердечники делают не сплошными, а состоящими из отдельных пластин, изолированных друг от друга. Для иллюстрации этого может быть вновь использован маятник Вальтенгофена. В этом случае к маятнику прикрепляют алюминиевый сектор с про-

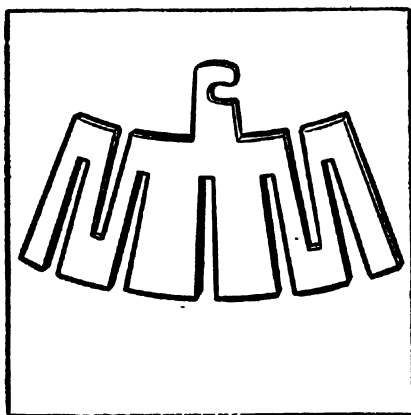


Рис. 176.

резами (рис. 176). При тех же условиях опыта маятник до остановки делает несколько колебаний, что указывает на ослабление токов Фуко. После этого учащимся следует показать разобранный сердечник трансформатора и указать, что отдельные стальные листы изолируют между собой специальным лаком или тонкой бумагой, пропитанной лаком. Можно напомнить, что сердечник катушки Томсона, опыты с которой они наблюдали, также состоит из отдельных пластин или стальных прутков.

Во время изучения сверхпроводимости был рассмотрен опыт Аркадьева. Для его объяснения использовались знания учащихся об электромагнитной индукции по курсу VII класса. В этом месте курса появляется возможность уточнить ранее данное объяснение.

Свинцовая чаша с жидким гелием находится в сверхпроводящем состоянии. При движении магнита к чаше в ней возникают вихревые токи, которые противодействуют падению магнита. Пока чаша находится в сверхпроводящем состоянии, магнитное поле вихревых токов поддерживает магнит и он «парит» над чашей.

§ 84. Самоиндукция

Изучение самоиндукции очень тесно связано с изучением предшествующего материала темы «Электромагнитная индукция». Эта связь взаимно обогащает обе части темы.

Рассмотрение самоиндукции дает возможность повторить и закрепить знания о явлении электромагнитной индукции в условиях измененной ситуации.

Другая сторона этой связи состоит в том, что после изучения электромагнитной индукции рассмотрены все понятия и закономерности, необходимые для усвоения явления самоиндукции. Поэтому важно сразу показать учащимся, что они продолжают изучать по существу одно и то же явление. Для этого в качестве постановки проблемы можно использовать опыт с двумя катушками (рис. 177) или опыт, который был уже показан при изучении электромагнитной индукции.

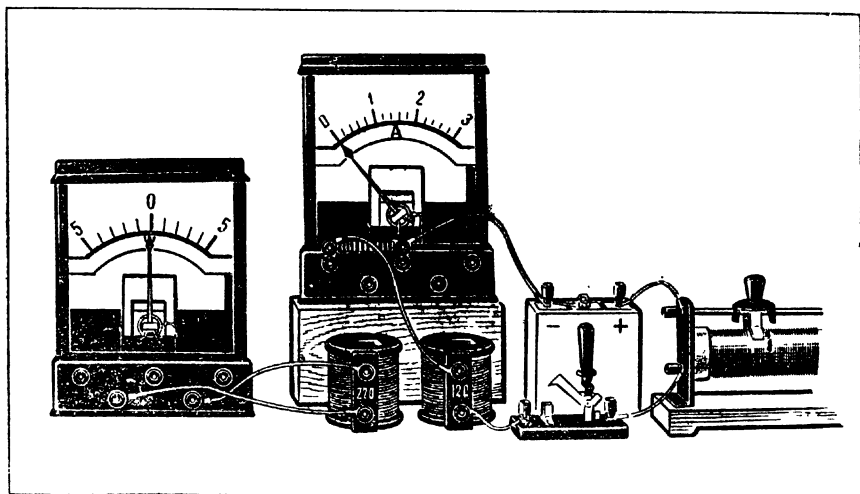


Рис. 177.

Если усиливать или ослаблять ток в первой катушке, то в пространстве вокруг нее, а следовательно, и вокруг второй катушки индуцируется вихревое электрическое поле. Это поле является причиной э.д.с. индукции в этой катушке, а следовательно, и тока, который показывает гальванометр.

После этого перед школьниками ставят проблему: объяснить, как должно сказаться действие индуцированного электрического поля на первую катушку, по которой идет ток, созданный батареей. В соответствии с уже имеющимися у учащихся знаниями о явлении электромагнитной индукции они могли бы сделать вывод о том, что изменяющееся магнитное поле первой катушки индуцирует вихревое электрическое поле и в ней самой. После этого можно рассматривать только одну катушку, в которой изменяется сила тока, и выдвинуть новую проблему: выяснить, как повлияет индуцированное электрическое поле на уже имеющийся в катушке ток.

Очевидно, индуцированное поле катушки или усилит ток в ней, или ослабит его. Решение этой проблемы вполне доступно учащимся на основе применения правила Ленца.

Если при помощи реостата попытаться увеличить силу тока и тем самым увеличить магнитный поток, то индуцированное электрическое поле воспрепятствует этому и задержит возрастание тока.

Попытка уменьшить силу тока приводит к созданию вихревого электрического поля, задерживающего убывание тока.

Итак, в обоих случаях возникающее вихревое поле препятствует изменению магнитного потока. Очевидно, в первом случае напряженность индуцированного поля направлена противоположно напряженности стационарного поля, созданного в проводнике батареей, во втором случае эти направления совпадают.

При объяснении самоиндукции часто говорят о направлениях тока самоиндукции и основного тока в проводнике. Вряд ли стоит придерживаться такого подхода. По проводнику всегда течет один ток. Сила же этого тока зависит от взаимного направления напряженностей указанных выше полей.

Наиболее эффективно явление самоиндукции проявляется при значительных изменениях силы тока за короткое время. Это легко всего осуществить при включении и выключении тока. Соответствующие опыты должны подтвердить выводы, которые будут получены в процессе решения проблем, поставленных перед учащимися. Опыт, иллюстрирующий проявление самоиндукции при замыкании цепи, лучше всего показать с дроссельной катушкой. На рисунке 178 показана установка для этого опыта.

В опыте используют все 3600 витков катушки, надетой на сердечник. Это позволяет создать значительное запаздывание тока в цепи с дросселем по сравнению с цепью, в которую включен реостат.

Предварительно при помощи реостата (на 50 Ом) добиваются одинаковой яркости свечения лампочек (от карманного фонаря на 3,5 В и 0,28 А). После этого цепь размыкают и предлагают учащим-

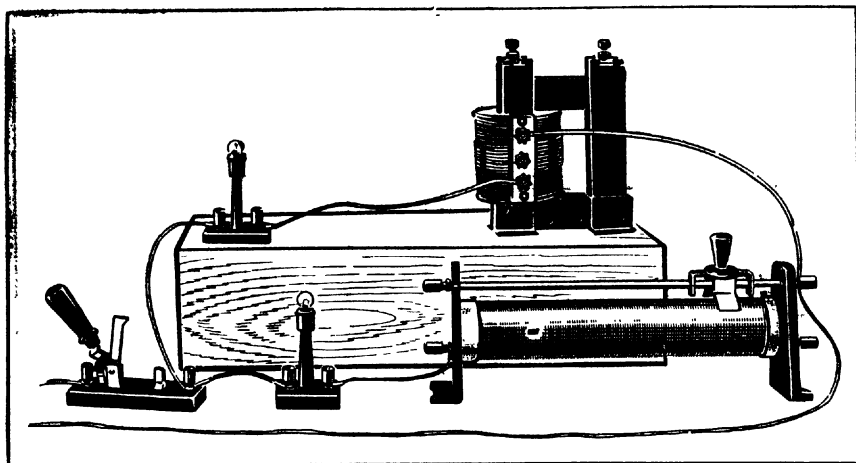


Рис. 178.

ся обратить внимание на лампочки в момент замыкания цепи. Опыт производит сильное впечатление. В первый момент даже кажется, что часть цепи, в которую включен дроссель, неисправна. Лишь через секунду начинает светить лампочка и в этой цепи.

После этого показывают опыт по наблюдению самоиндукции при размыкании цепи. Для этого собирают установку по схеме, приведенной на рисунке 179. Предварительно показывают, что неоновая лампочка светится от сетевого напряжения. (Неоновая лампа типа ТН-1 рассчитана на 220 В, а ТН-2—на 127 В.) Замыкают цепь и отмечают, что неоновая лампочка не светится, так как напряжение источника значительно ниже напряжения сети. Далее несколько раз показывают, что в момент выключения лампочка ярко вспыхивает.

Учащиеся без труда делают вывод, что э.д.с. самоиндукции, которая возникает при размыкании цепи, имеет значение порядка напряжения сети.

Эти две установки, особенно первая из них, будут еще неоднократно использованы.

На основании рассмотренных опытов можно сделать следующий вывод. После замыкания электрической цепи ток в ней не сразу принимает значение, определяемое соотношением $I = \frac{U}{R}$, а при

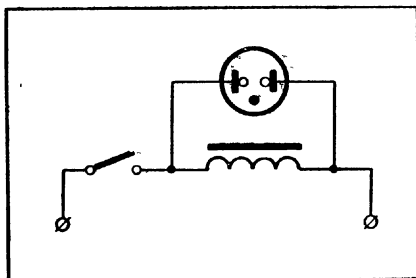


Рис. 179.

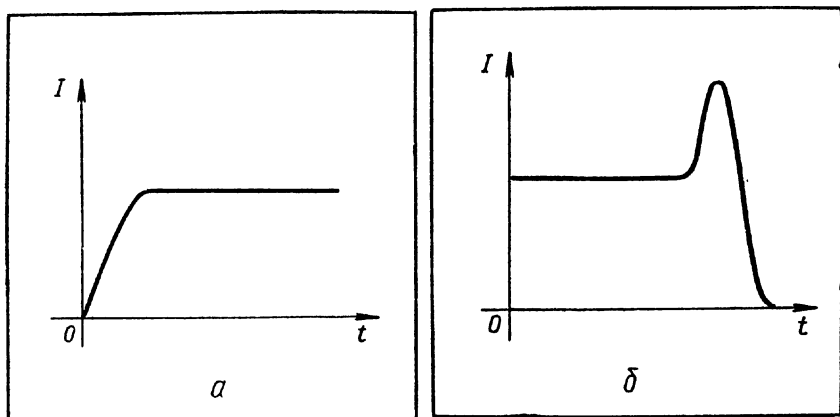


Рис. 180.

выключении — исчезает не сразу. Причем при выключении цепи э.д.с. самоиндукции может во много раз превосходить э.д.с. источника тока.

Изменение силы тока со временем при включении (рис. 180, а) и выключении цепи (рис. 180, б) желательно изобразить графически. График, соответствующий выключению цепи, отражает два факта: ток не прекращается сразу после момента выключения источника, и сила тока после выключения резко возрастает.

Рассмотренные опыты позволяют провести сравнение явлений самоиндукции и инерции. После этого можно перейти к количественной характеристике явления самоиндукции.

§ 85. Индуктивность

Для получения формулы

$$\mathcal{E} = -L \frac{\Delta I}{\Delta t} \quad (1)$$

предварительно необходимо рассмотреть понятие индуктивности. Возможны два пути изучения этого понятия.

Обычно индуктивность рассматривают в данной теме перед изучением формулы для э.д.с. самоиндукции. Устанавливают, что поток магнитной индукции, созданный, например, катушкой, пропорционален силе тока:

$$\Phi = LI. \quad (2)$$

При этом L рассматривают как коэффициент пропорциональности в выражении (2), и далее на основании закона электромагнитной индукции $\mathcal{E} = -\frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$ получают выражение для э.д.с. самоиндук-

ции (1). Из этого выражения устанавливают физический смысл индуктивности и получают значение для ее единицы.

Представляется целесообразным и другой путь введения понятия индуктивности.

При изучении предыдущей темы — «Магнитное поле тока» — установили, что поток магнитной индукции, созданный контуром с током (катушкой), пропорционален силе тока, а также зависит от формы, размеров контура и от магнитных свойств окружающей среды:

$$\Phi = LI,$$

где L — величина, характеризующая контур (катушку) и окружающую его среду (сердечник).

При таком способе введения индуктивности ее физический смысл определяют из выражения

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

Индуктивность катушки определяется отношением потока магнитной индукции к силе тока, создающего этот поток. Иными словами, индуктивность численно равна потоку магнитной индукции, который создается силой тока в 1 А. Из этого же выражения определяют и единицу индуктивности — генри, которая названа в честь Джозефа Генри (1797 — 1878):

$$1 \text{ Г} = \frac{1 \text{ Вб}}{1 \text{ А}}.$$

Такой подход позволяет после качественного рассмотрения явления самоиндукции сразу перейти к получению формулы (1), не отвлекаясь на введение понятия индуктивности.

После получения формулы $\mathcal{E} = -L \frac{\Delta I}{\Delta t}$ можно дать и другое определение индуктивности и единицы ее измерения из соотношения

$$L = \frac{|\mathcal{E}|}{\left| \frac{\Delta I}{\Delta t} \right|}.$$

Рассматривая аналогию между самоиндукцией и инерцией, можно сопоставить массу как характеристику тела и индуктивность как характеристику проводника. Чем больше масса тела, тем больше времени необходимо, чтобы сообщить ему определенную скорость. Аналогично этому, чем больше индуктивность проводника, тем больше времени необходимо, чтобы в цепи установилось определенное значение силы тока.

Используя установку для демонстрации самоиндукции при размыкании цепи, можно, хотя бы качественно, показать зависимость индуктивности катушки от числа ее витков и от наличия стального сердечника.

Если включить в цепь часть витков катушки (2400 и далее, 1200 витков), то будет хорошо заметно уменьшение времени

задержки тока. Следует иметь в виду, что уменьшение числа витков катушки приведет к уменьшению ее сопротивления, а следовательно, и к увеличению яркости лампочки. Необходимо предупредить об этом учащихся или уравнивать сопротивление ветвей реостатом. И наконец, если снять часть сердечника (разомкнуть магнитопровод) и далее совсем его удалить, то это время еще заметнее уменьшится.

Формулу для индуктивности катушки с замкнутым сердечником

$$L = \frac{\mu_0 \mu n^2 S}{l}$$

вряд ли стоит рассматривать с учащимися, в частности, и потому, что они еще не знают понятия магнитной проницаемости. С этой формулой можно познакомить отдельных учащихся — радиолубителей или участников физического кружка. На уроке же достаточно использовать рассмотренные опыты для того, чтобы пояснить, что индуктивность катушки зависит от числа витков и площади контура витков, а также от материала сердечника.

§ 86. Применение и учет самоиндукции в технике

Дальнейшее изучение самоиндукции желательно связать с рассмотрением того, как учитывают и используют это явление в технике, где и при каких обстоятельствах его наблюдают и применяют. Кроме того, что это придает политехническую направленность изучаемому вопросу, одновременно появится возможность закрепить и углубить пройденный материал. Начать можно с опыта, в котором размыкают цепь дроссельной катушки с сердечником. Один из проводов остается зажатым к клемме катушки, а вторым касаются другой клеммы. В момент размыкания заметно проскакивание искры, которая может перейти в дуговой разряд небольшой интенсивности, сопровождаемый характерным треском. Учащиеся знают, что искра возникает при высоком напряжении, и, следовательно, еще раз смогут убедиться, что при размыкании цепи создается значительная э.д.с. самоиндукции. Анализируя формулу $\mathcal{E} = -L \frac{\Delta I}{\Delta t}$, школьники смогут указать, от каких факторов и как зависит величина э.д.с. самоиндукции, а следовательно, и интенсивность возникающего разряда.

Важно отметить, что особенно сильный разряд может возникать при размыкании цепей (большая скорость изменения тока), содержащих катушки со стальными сердечниками — электромагниты, двигатели, трансформаторы (большая индуктивность).

Хорошо, если учащиеся вспомнят пример сильного разряда, возникающего при случайном размыкании цепи, который они могли видеть неоднократно. Речь идет о возникновении яркого дугового разряда при нарушении контакта пантографа электрички, трамвая или отрыв контактных штанг троллейбуса от токонесущего провода

(см. цветную вклейку III). Школьники должны суметь объяснить причину столь интенсивного разряда.

Следует иметь в виду, что в этих случаях возникает дуговой разряд. Как известно, дуговой разряд появляется при интенсивной электронной эмиссии с катода. Обычно это бывает термоэлектронная эмиссия. В данном же случае первоначальной причиной дугового разряда служит электростатическая эмиссия.

В первый момент отрыва контактной штанги от токонесущего провода между ними образуется очень малый зазор. Напряженность электрического поля в этом зазоре достигает огромной величины (порядка 10^7 В/м при зазоре 0,1 мм). Это и обеспечивает электростатическую эмиссию. В таком сильном поле тотчас же образуются лавины электронов и ионов. Бомбардировка положительными ионами отрицательного электрода сильно нагревает его, что приводит к термоэлектронной эмиссии, а все, вместе взятое, создает мощный дуговой разряд.

Наблюдения разрядов, возникающих при размыкании цепей, могут быть использованы для обоснования необходимости специальных масляных выключателей, в которых предотвращаются опасные последствия э.д.с. самоиндукции — дуговой разряд. Это особенно важно при выключении цепей электроснабжения заводов с большим числом электродвигателей, трамвайной сети, промышленных районов и т. д.

Полезно познакомить учащихся и с применением конденсаторов для гашения искрового разряда в слаботочных цепях. Искрогасительные конденсаторы применяют, например, в цепях прерывателей индукционной катушки (бобины) автомашин.

Вызывает большой интерес у учащихся и способствует лучшему усвоению явления самоиндукции при размыкании цепи сравнение его с аналогичным явлением при выключении водяного потока. Как известно, такое явление получило название гидравлического удара. В то же время такое сравнение дает возможность повторить закон Бернулли. Гидравлический удар можно показать на простейшей установке (рис. 181). Тройник соединяет воронку с водой (резервуар, создающий напор воды), наконечник от пипетки и кран или трубку с зажимом. В начале опыта кран закрыт. Когда поднимают воронку с водой, то из наконечника начинает бить фонтан примерно до уровня воды в воронке. Кран открывают, и вода вытекает из сосуда. Вследствие этого высота струи уменьшается.

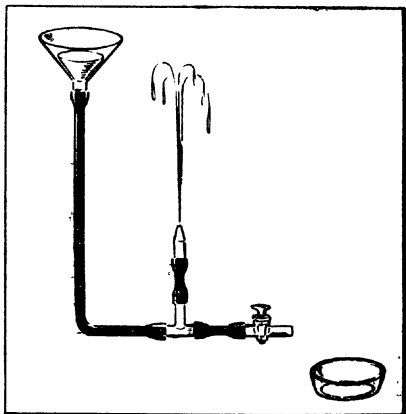


Рис. 181.

Если после этого быстро закрыть кран, то высота струи резко повысится, достигая потолка. Можно привести исторические сведения о том, как Н. Е. Жуковский, исследуя гидравлический удар, указал средство его устранения. Им было предложено применять завинчивающиеся краны, медленно изменяющие скорость потока до нуля, вместо ранее применявшихся, в которых затвор сразу перекрывал воду. До создания кранов, постепенно выключающих поток, были часты случаи вывода из строя водопровода: из-за гидравлических ударов ломались трубы.

В рассматриваемой аналогии быстрому прекращению потока воды (при закрытии крана) соответствует выключение электрической цепи; резкому возрастанию давления в жидкости — возникновение большой э.д.с. самоиндукции; гидравлический удар — дуговому разряду.

И наконец, аналогией постепенному ослаблению потока воды может служить постепенное ослабление силы тока в цепи с реостатом. При малой скорости изменения тока $\left(\frac{\Delta I}{\Delta t}\right)$ возникает и малая э.д.с. самоиндукции. Такое уменьшение последствий самоиндукции можно реализовать в слаботочных цепях и только там, где нет необходимости быстро выключать цепь, как например в прерывателях.

Мы рассмотрели примеры возможных неприятных последствий явления самоиндукции и способы их устранения в технике. Однако ограничиваться этими примерами не следует. Необходимо показать и применение явления самоиндукции. Для этого можно использовать очень интересный и удобный объект — современную люминесцентную лампу. В этой лампе нашли применение многие явления, изучаемые в курсе физики, и поэтому ее рассмотрение позволяет решить ряд педагогических задач: повторить и углубить ранее изученный материал, причем в новой ситуации, подготовить изучение последующих вопросов, показать применение в технике одновременно нескольких явлений, используемых в одном устройстве.

Такое одновременное решение ряда педагогических задач при изучении одного технического объекта — важный методический прием, который может найти широкое применение в преподавании физики.

Рассмотрим под этим углом зрения лампу дневного света. В ней применены следующие явления и приборы: тепловое расширение тел и как следствие этого изгибание биметаллической пластинки (тепловое реле) в стартере; термоэлектронная эмиссия из нити накала лампы; тлеющий разряд в стартере и лампе; самоиндукция при размыкании и реактивное сопротивление переменному току в дросселе; искрообразования в контактах стартера, помехи радиоприему и их устранение — искрогасительный конденсатор; сдвиг фазы вследствие наличия дросселя в цепи лампы и уменьшение этого сдвига при помощи конденсатора и, наконец, ультрафиолетовое излучение и люминесценция,

Как видно, изучение этих явлений входит в несколько разделов курса физики IX и X классов. В связи с этим возникает методическая проблема: где наиболее целесообразно начать изучение люминесцентной лампы и какие процессы и объекты в ней при этом рассматривать?

При изучении тлеющего разряда достаточно упомянуть о том, что его используют в лампах дневного света. Все остальное еще недоступно для изучения. При изучении оптики, в которой, хотя и должно изучаться основное назначение лампы, рассматривают лишь две стороны ее работы: ультрафиолетовое излучение газового разряда и трансформация этого излучения в видимое при помощи люминофора.

Ко времени изучения самоиндукции уже рассмотрено большинство явлений, необходимых для понимания электрической схемы лампы. Здесь целесообразно начать и в основном рассмотреть ее работу.

Учащимся надо объяснить, чем вызвана необходимость тех дополнительных устройств, которые используют для пуска и работы лампы.

Разряд в газе обычно наступает при высоких напряжениях, порядка нескольких тысяч вольт. При таком высоком напряжении и работают рекламные трубки. Для того чтобы люминесцентные лампы могли работать от сети в 220 В, их электроды первоначально накаляют. Эмиссия электронов с нагретых электродов и обеспечивает работу тлеющего разряда при сетевом напряжении.

Для того чтобы возник разряд в газе, необходимо более высокое напряжение, чем то, которое требуется, когда лампа уже работает и в газовом промежутке имеется большее число электронов и ионов.

Перед учащимися можно выдвинуть проблему: как создать более высокое напряжение, чем напряжение сети, необходимое для начала работы лампы. Учащиеся подготовлены к этому вопросу и понимают, что здесь может быть использовано явление самоиндукции при размыкании цепи катушки с сердечником (дрессель).

Для дальнейшего объяснения люминесцентной лампы используют специально сконструированную на вертикальной панели

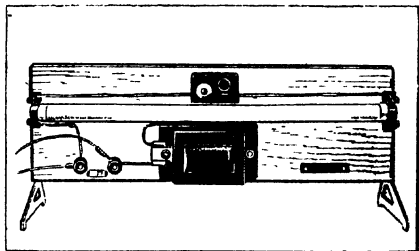


Рис. 182.

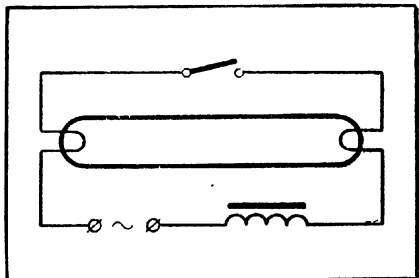


Рис. 183.

установку, включающую дроссель вместе со стартером (рис. 182). На панели около стартера имеется кнопочный выключатель, который применяют для включения лампы без стартера.

Первоначальное объяснение зажигания разряда в лампе проводят по упрощенной схеме (рис. 183).

При замыкании выключателя электроды лампы в виде нити оказываются включенными в сеть и, накаляясь, испускают электроны, необходимые для начала разряда. Но напряжение между электродами, практически равное напряжению сети, недостаточно для зажигания разряда. Если разомкнуть выключатель, то в цепи возникает э.д.с. самоиндукции значительно большая, чем напряжение сети. Это и приводит к возникновению разряда, который в дальнейшем существует уже при напряжении даже меньшем, чем в сети (так как между электродами уже есть большое число электронов и ионов).

Замыкают выключатель и обращают внимание на накал нитей электродов. Когда электроды прогреются, цепь размыкают. В этот момент лампа вспыхивает и далее продолжает стабильно светиться. Если с первого раза не удастся зажечь разряд, то указанную процедуру повторяют второй и третий раз.

После того как было уделено достаточное внимание роли явления самоиндукции для зажигания разряда в лампе, можно перейти к объяснению других вспомогательных устройств. Для этого обращают внимание учащихся на неудобство включения цепи обычным выключателем и обосновывают необходимость специального устройства для автоматического пуска лампы после ее включения в сеть. Таким устройством служит стартер, представляющий собой небольшую неоновую лампу. Действие стартера основано на двух явлениях: на нагревании газа при прохождении через него тока, а следовательно, и нагревании электродов и на изменении их кривизны, так как электроды представляют собой тонкие биметаллические пластинки (рис. 184).

По схеме, в которую теперь включен и стартер (рис. 185), объясняют действие пускового устройства. Давление газа и расстояние между электродами в стартере подобраны таким образом, чтобы тлеющий разряд наступил при напряжении сети. Вследствие разряда газ нагревается и нагревает биметаллические пластинки, которые, изменяя кривизну, касаются друг друга и замыкают цепь нитей лампы (вместо нажатия рукой на кнопку). Нити накаляются и подготавливают разряд. В стартере разряд прекращается сразу же, как только электроды замыкаются, и вследствие этого газ охлаждается. Биметаллические пластинки, остывая, принимают первоначальную форму и размыкают цепь дросселя (вместо кнопки). Это приводит к зажиганию разряда в лампе. Если с первого раза зажигание не произойдет, то все процессы автоматически повторяются до тех пор, пока наступит разряд в лампе.

После этого между электродами лампы устанавливается стабильный ток, который проходит и по обмотке дросселя. Так как лампа и

дроссель включены в сеть последовательно, то на лампе напряжение будет меньше сетевого. Оно подобрано так, чтобы быть достаточным для разряда в лампе и меньше того, которое необходимо для разряда в стартере. Поэтому после наступления разряда в лампе работа стартера прекращается. Ток через нити накала лампы больше не проходит. А необходимая электронная эмиссия с электродов обеспечивается бомбардировкой их ионами.

Искра, возникающая при размыкании контактов стартера, повреждает рабочую часть этих контактов. Кроме того, искрение создает помехи радиоприему. Для устранения вредных действий искры параллельно контактам стартера устанавливают искрогасительный конденсатор C_1 (рис. 186). (Этот конденсатор вмонтирован внутри корпуса стартера.)

В дальнейшем при изучении переменного тока можно напомнить учащимся еще одно достоинство дросселя в цепи лампы. Он ограничивает ток в этой цепи, стабилизирует его работу, не потребляя энергии (в отличие от реостатов). Кроме того, можно будет объяснить значение конденсатора C_2 (рис. 186), который включают в цепь для уменьшения сдвига фазы, создаваемого дросселем.

И наконец, при изучении люминесценции необходимо рассмотреть назначение люминофора, покрывающего изнутри баллон лампы.

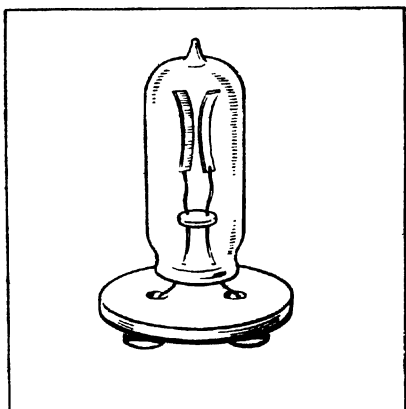


Рис. 184.

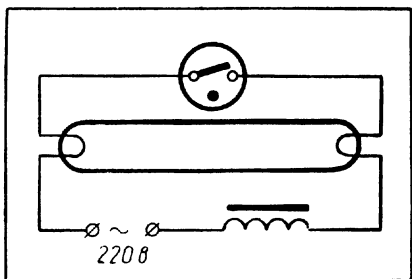


Рис. 185.

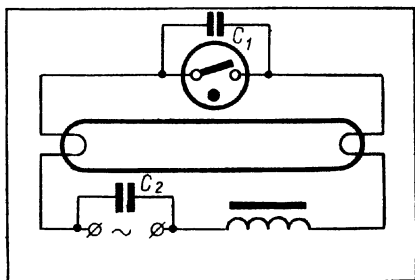


Рис. 186.

§ 87. Энергия магнитного поля

При изучении вопроса об энергии магнитного поля целесообразно сделать следующие разъяснения.

Создание электрического тока в цепи означает образование магнитного поля. Магнитное поле, как и поле электрическое, обладает энергией. Энергию магнитного поля тока называют еще энергией электрического тока.

Для создания электрического тока, а следовательно, его магнитного поля необходимо совершить работу против сил вихревого электрического поля. Эта работа (в соответствии с законом сохранения и превращения энергии) равна энергии электрического тока, или энергии магнитного поля тока.

При размыкании цепи и исчезновении тока эта энергия превращается в энергию возникающего вихревого электрического поля и, в итоге, — во внутреннюю энергию проводов, газа в промежутке между контактами выключателя (когда происходит газовый разряд), энергию электромагнитных волн.

Проводят сравнение между процессом установления в цепи электрического тока величиной I и процессом приобретения некоторым телом определенной скорости v .

Устанавливают наличие ряда одинаковых свойств в этих двух различных по своей природе процессах, т. е. частичное сходство, или существование аналогии между ними.

Подчеркивают главное различие в этих процессах: «инерция» электронов — это результат действия на них возникающего вихревого электрического поля, а не наличия у них массы.

Используют умозаключение по аналогии для вывода формулы энергии магнитного поля катушки с током.

Наблюдения показывают, что при замыкании цепи с катушкой ток, постепенно нарастая, через некоторое время приобретает определенное значение I (свойство a_1).

Автомобиль при трогании с места, постепенно набирая скорость, через некоторое время приобретает некоторую скорость v (свойство b_1).

Для того чтобы ток в цепи с индуктивностью при ее замыкании достиг некоторого значения, необходимо совершить работу (свойство a_2).

Для того чтобы автомобиль разогнать до некоторой скорости, необходимо совершить работу (свойство b_2).

Нарастание тока I тем медленнее, чем больше (при прочих равных условиях) индуктивность катушки L (свойство a_3).

Нарастание скорости v тем медленнее, чем больше (при прочих равных условиях) масса автомобиля m (свойство b_3).

Частичное сходство между процессом установления тока в катушке индуктивности (свойства a_1, a_2, a_3) и разгоном автомобиля (свойства b_1, b_2, b_3) позволяет предположить, что величина работы

по установлению тока (свойство a_4) и величина работы по разгону автомобиля (свойство b_4) выражаются аналогичными соотношениями.

Механическая работа по разгону автомобиля равна $\frac{mv^2}{2}$ (свойство b_4). Берут эту формулу в качестве модели для работы по установлению тока в катушке индуктивности (свойство a_4).

Соответствие между L и m , между I и v позволяет преобразовать $\frac{mv^2}{2}$ в $\frac{LI^2}{2}$.

Сообщают, что полученное соотношение подтверждается опытами и что математический расчет приводит к той же формуле.

Демонстрируя газовые разряды, возникающие при размыкании электрической цепи, состоящей из источника постоянного тока и катушки индуктивности, можно показать, что с увеличением индуктивности катушки, а также силы тока в ней энергия газового разряда увеличивается.

Элементарный вывод формулы $T = \frac{LI^2}{2}$ может быть сделан следующим образом. Энергия T , которой обладает электрический ток в цепи, равна работе сил вихревого электрического поля, возникающего при размыкании или замыкании цепи. За малый промежуток времени, например, при замыкании цепи эта работа

$$\Delta A = -\Delta q \mathcal{E}_{sl},$$

где

$$\Delta q = i \Delta t, \text{ а } \mathcal{E}_{sl} = -L \frac{\Delta i}{\Delta t}.$$

Подставляя два последних уравнения в первое, получают:

$$\Delta A = Li \Delta i.$$

Всю произведенную работу A до полного исчезновения или установления тока величиной I можно вычислить при помощи графика зависимости $Li = f(i)$ (рис. 187).

Нетрудно видеть, что величина A численно равна площади треугольника, т. е. $A = \frac{LI^2}{2}$. Таким образом получают (учитывая, что $T = A$) для энергии магнитного поля то же выражение, что и в случае вывода по аналогии,

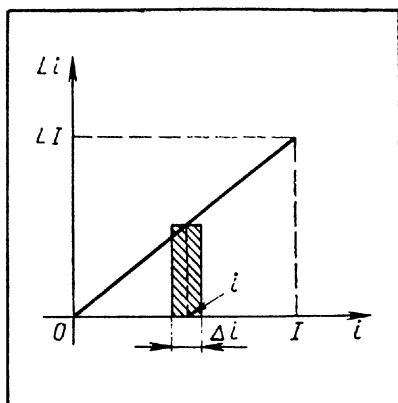


Рис. 187.

Глава XVIII

МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА ВЕЩЕСТВА

§ 88. Введение

Изучение магнитного поля в веществе непосредственно связано с рассмотрением магнитных свойств вещества. Эти свойства в средней школе могут быть представлены на основе классической электронной теории магнетизма, созданной французским физиком Полем Ланжевенем (1872—1946). Где это возможно, желательно также заложить в курсе физики квантовые представления о магнетизме, причем на основе экспериментальных фактов.

Особое внимание следует обратить на формирование понятия магнитной индукции в веществе и его магнитной проницаемости, на механизм намагничивания ферромагнетиков (на основе их доменной структуры), на магнитные характеристики ферромагнитных материалов (анализ кривых гистерезиса) и новые магнитные материалы.

Большое политехническое содержание несет научная информация о широких применениях магнитных материалов в физических исследованиях, в традиционных и новых областях техники. Среди них: электрические машины, в том числе магнитогидродинамический генератор (МГД-генератор), сигнализация, связь, автоматика и управление, ускорители заряженных частиц высоких энергий, приборная техника, электронно-вычислительные машины, магнитная запись и воспроизведение звука и др.

§ 89. Магнитная проницаемость вещества

Магнитная проницаемость вещества может быть введена несколькими способами. Для школы наиболее доступно введение по магнитному взаимодействию, по электромагнитной индукции, а также введение с применением магнитного зонда. Рассмотрим один из них.

Выясняют, что стальной сердечник, помещенный в катушку с током, увеличивает магнитную индукцию, а значит, и магнитный поток. Это обнаруживают по усилению магнитного взаимодействия на следующем опыте.

Через катушки — одну длинную (неподвижную), другую короткую (подвешенную) — пропускают токи. На некотором расстоянии (подбирают на опыте) они не взаимодействуют. Внутри длинной катушки вводят стальной стержень. Короткая катушка притянется к ней. Если ввести медный, алюминиевый или стеклянный стержень, то магнитное взаимодействие слегка изменится, но на данном опыте это обнаружить невозможно.

Этот опыт позволяет ввести понятие о магнитной проницаемости вещества.

Магнитная индукция внутри катушки с током без сердечника равна \vec{B}_0 (в воздухе примерно как в вакууме). В стержне создается дополнительное магнитное поле с магнитной индукцией \vec{B}_1 (о ее направлении речь пока не идет). Общая магнитная индукция в стержне (веществе):

$$\vec{B} = \vec{B}_0 + \vec{B}_1.$$

Поэтому изменяется магнитное взаимодействие — сила \vec{F}_m . Для стержней из различных веществ (никель, кобальт и др.) дополнительная магнитная индукция неодинакова, значит, их магнитные свойства разные.

Поэтому можно ввести физическую величину, которая характеризует эти свойства. По определению относительная магнитная проницаемость вещества

$$\mu = \frac{B_0 + B_1}{B_0} = \frac{B}{B_0}$$

показывает, во сколько раз результирующая магнитная индукция \vec{B} в однородной среде больше или меньше магнитной индукции \vec{B}_0 в вакууме. Поэтому

$$\vec{B} = \mu \vec{B}_0.$$

Подчеркивают, что относительная магнитная проницаемость вещества — величина безразмерная. Для парамагнетиков $\mu > 1$ (магнитное поле тока усиливается), ферромагнетиков $\mu \gg 1$ (магнитное поле тока значительно возрастает) и диамагнетиков $\mu < 1$ (магнитное поле тока ослабевает). Величину μ можно измерить. Магнитный зонд помещают у торца катушки с током без сердечника (измеряют \vec{B}_0) и с ферромагнитным стержнем (измеряют \vec{B}). По этим измерениям определяют μ .

Если возникнет необходимость, то можно определить величину магнитной постоянной μ_0 и единицу ее измерения. Для этого используют формулу для магнитного взаимодействия параллельных токов в вакууме: $F_m = k \frac{I_1 I_2}{R} l$, где $k = \frac{\mu_0}{2\pi} = 2 \cdot 10^{-7} \frac{\text{Н}}{\text{А}^2}$.

Поэтому

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Н}}{\text{А}^2}.$$

Можно выразить эту величину в общепринятых для магнитной постоянной единицах:

$$\frac{\text{Н}}{\text{А}^2} = \frac{\text{Н} \cdot \text{м}}{\text{А}^2 \cdot \text{м}} = \frac{\text{Дж}}{\text{А}^2 \cdot \text{м}} = \frac{\text{Кл} \cdot \text{В}}{\text{А}^2 \cdot \text{м}} = \frac{\text{Кл} \cdot \text{В}}{\text{А} \cdot \frac{\text{Фл}}{\text{с}} \cdot \text{м}} = \frac{\text{В} \cdot \text{с}}{\text{А} \cdot \text{м}} = \frac{\text{Еб}}{\text{А} \cdot \text{м}}.$$

$1 \frac{\text{Вб}}{\text{А}} = 1 \text{ Г (генри)}$. Следовательно,

$$\mu_0 = 1,256 \cdot 10^{-6} \frac{\text{Г}}{\text{м}}.$$

Итак, μ — безразмерная величина и зависит только от среды, а μ_0 — размерная величина и зависит только от выбора системы единиц.

Величину μ_0 можно ввести без вывода. Так как для вакуума $\mu_0 \neq 1$, магнитная проницаемость вещества равна $\mu\mu_0$. Если не решать задач по теме «Магнитные свойства вещества», то достаточно пользоваться одной величиной — относительной магнитной проницаемостью и знать величину магнитной постоянной.

Ставят известные опыты по изучению поведения различных веществ в неоднородном магнитном поле (между полюсами конической формы сильного электромагнита). Используют цилиндры длиной 15 мм и диаметром 3 мм из стали, алюминия и природного графита. Первые два цилиндра помещают поперек вектора магнитной индукции, третий — вдоль него. При включении электромагнита образцы веществ поворачиваются на 90° . Опыт показывают в теневой проекции на экран. Ставят учебную проблему: как объяснить поведение этих веществ в магнитном поле?

§ 90. Электронная природа магнетизма (пара- и диамагнетизм)

Здесь дан один из возможных вариантов изложения вопроса о природе пара- и диамагнетизма

Объяснение магнитных свойств пара- и диамагнетиков можно дать на основе электронной теории магнетизма Ланжевена (1908 г.).

Учащиеся уже знают строение атомов из курсов физики и химии. По аналогии с магнитным моментом тока вводят понятие об орбитальном магнитном моменте электрона и атома в целом.

Магнитный момент тока I , создаваемый движением одного электрона на орбите радиусом r (рис. 188, а), равен:

$$M = IS,$$

где S — площадь, ограниченная орбитой электрона.

Здесь сила тока I создается обращающимся вокруг ядра атома электроном с зарядом e , скоростью \vec{v} и частотой ν (периодом обращения T). Поэтому

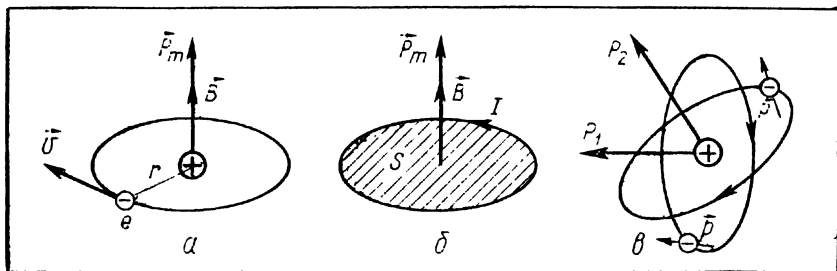


Рис. 188.

$$I = e v = \frac{e}{T} = \frac{e}{\frac{2\pi r}{v}} = \frac{ev}{2\pi r}.$$

Площадь, ограниченная контуром с током, $S = \pi r^2$.
Поэтому орбитальный магнитный момент электрона:

$$P_m = \frac{ev}{2\pi r} \cdot \pi r^2 = \frac{evr}{2}.$$

Магнитный момент — векторная величина и направлена перпендикулярно плоскости, в которой движется электрон, вдоль вектора магнитной индукции \vec{B} в центре кругового тока (рис. 188, б).

Плоскости орбит электронов в атоме не совпадают. Их магнитные моменты направлены под разными углами друг к другу (рис. 188, в).

На факультативных занятиях можно было бы ввести понятие о спиновом магнитном моменте электрона. Необходимо при этом иметь в виду следующее.

В 1925 г. в физику было введено понятие о собственном моменте количества движения (о механическом моменте) электрона — о спине. Спину электрона соответствует свой магнитный момент. О нем и следует говорить при изучении магнетизма.

Сообщают, что положительно заряженное ядро атома также обладает магнитным моментом. Общий магнитный момент атома равен геометрической сумме орбитальных, спиновых и ядерного магнитных моментов атома:

$$\vec{P}_m = \sum \vec{P}_{m.o} + \sum \vec{P}_{m.c} + \vec{P}_{m.я}.$$

Атомы (или молекулы) парамагнетиков (Na, K, Al, Cs и др.) обладают каждый своим общим магнитным моментом $\vec{P}_m \neq 0$. Это объясняется тем, что их орбитальные или спиновые магнитные моменты не скомпенсированы. Атомы же или молекулы диамагнетиков (инертные газы, Bi, Hg, молекулы водорода, воды) не обладают общим магнитным моментом, т. е. $\vec{P}_m = 0$. Объясняется это тем, что обращению электрона в атоме в одну сторону (например, по ходу часовой стрелки), соответствует обращение другого электрона в том же атоме в противоположную сторону (против хода часовой стрелки, рис. 189). Поэтому все орбитальные магнитные моменты электронов оказываются взаимно скомпенсированными.

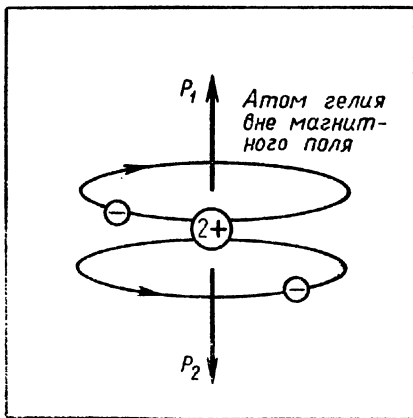


Рис. 189.

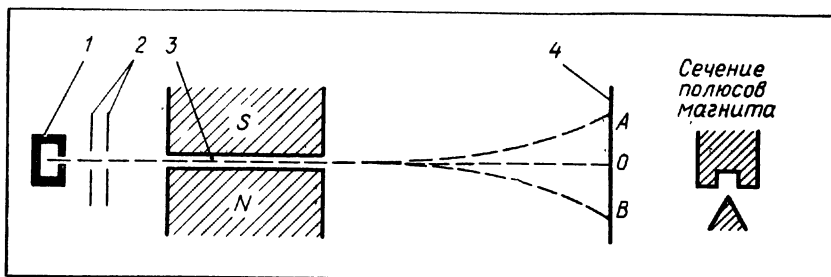


Рис. 190.

Скомпенсированными будут также спиновые магнитные моменты (ядерные магнитные моменты не учитываются). Поэтому внешнее магнитное поле атомов диамагнетика не обнаруживается. Это имеет место, например, у атомов, в которых электронные оболочки полностью заполнены.

Следует обратить внимание учащихся на то, что наличие магнитных моментов атомов парамагнетиков и их отсутствие у атомов диамагнетиков доказано в опытах (1922 г.) Отто Штерна (р. 1888) и Вальтера Герлаха (р. 1889). При наличии учебного времени можно кратко сообщить об этом классическом опыте в следующем объеме.

В электрической печи 1 (рис. 190) испаряется в вакуум вещество (например, серебро). Атомный или молекулярный пучок проходит через диафрагмы 2 и узким пучком попадает в сильное неоднородное поперечное магнитное поле 3, а затем, падая на экран 4, образует осадок (или фиксируется на пластинке). Если испаряется диамагнетик, то атомы не отклоняются в магнитном поле и попадают в центр O экрана против отверстия в электрической печи. Атомы же парамагнетика, обладающие магнитным моментом, отклоняются в прямо противоположные стороны и образуют осадки в точках A и B на экране.

Этот опыт доказывает, что атомы (или молекулы) парамагнетика обладают магнитным моментом, а диамагнетика — нет.

Академик С. В. Вонсовский писал: «Эти опыты следует рассматривать как один из основных экспериментов всей атомной физики (подчеркнуто мною. — Л. Р.), ибо они позволили наиболее непосредственно установить атомную природу магнетизма»¹.

Теперь можно объяснить магнитные свойства пара- и диамагнетиков, однако пока только на основе классической электронной теории магнетизма.

¹ Вонсовский С. В. Современное учение о магнетизме. М., 1953, с. 20; см. также: Вонсовский С. В. Магнетизм микрочастиц. М., 1973.

Парамагнетики. Магнитные моменты атомов вещества при любой температуре направлены в пространстве в разные стороны, беспорядочно. Поэтому их моменты взаимно скомпенсированы, и образец из этого вещества оказывается немагнитным. Вокруг него магнитное поле отсутствует. Если такой образец поместить во внешнее магнитное поле, то магнитные моменты атомов выстраиваются вдоль вектора магнитной индукции \vec{B} внешнего магнитного поля; вещество намагничено.

Здесь подчеркивают три факта: парамагнетик может быть намагничен; он усиливает внешнее магнитное поле; тепловое движение атомов оказывает разбрасывающее действие на атомы (на их магнитные моменты). Идет борьба между упорядочивающим и разбрасывающим действием магнитных моментов атомов. При снятии внешнего магнитного поля тепловое движение приводит снова в хаотическое расположение магнитные моменты атомов, и образец оказывается немагнитным.

Диамагнетики. Магнитный момент атома диамагнетика равен нулю. Но при внесении его в магнитное поле в атомах диамагнетика индуцируется ток. Согласно закону Ленца этот ток направлен таким образом, что его магнитное поле противодействует внешнему полю, вызвавшему этот ток.

Микрофизически это означает, что на орбитальное движение каждого электрона атома накладывается дополнительное его вращение вокруг вектора магнитной индукции внешнего магнитного поля. Значит, образуются дополнительные магнитные моменты орбитальных электронов (и потому магнитный момент атома в целом), которые направлены против магнитной индукции внешнего поля. Поэтому диамагнетик ослабляет это поле.

На факультативных занятиях можно объяснить явление диамагнетизма на основе понятия о прецессии орбит электронов атома вокруг магнитной индукции \vec{B} внешнего магнитного поля.

Обращают внимание на то, что в парамагнетиках также возникают индукционные токи, но этот эффект значительно слабее парамагнитного, и поэтому он почти не сказывается на поведении парамагнетиков.

Полученные знания позволяют объяснить, почему парамагнетики втягиваются в область более сильного магнитного поля и устанавливаются вдоль вектора магнитной индукции намагничивающего поля, а диамагнетики выталкиваются перпендикулярно вектору магнитной индукции внешнего поля.

§ 91. Ферромагнетизм

Ферромагнетики обычно выделяют в отдельный класс веществ по ряду соображений: их магнитная проницаемость $\mu \gg 1$; эта величина сложным образом зависит от магнитной индукции

намагничивающего поля; ферромагнитные свойства проявляются не в отдельных атомах, а в кристаллах в целом (не в жидкостях и газах!); ферромагнетики имеют широкую область применений: в электрических машинах, радиотехнических устройствах, автоматике (различного типа электромагнитные реле), электронно-вычислительных машинах (блок памяти ЭВМ).

Из количественных характеристик ферромагнетиков в средней школе изучают магнитную проницаемость, намагничивание и коэрцитивную силу. Устанавливают связь между ними.

В соответствии с учебным пособием («Физика, 9») вводится понятие о намагничивании I ферромагнетика:

$$I = B - B_0 = \mu B_0 - B_0 = (\mu - 1) B_0.$$

Целесообразно сравнить кривые намагничивания пара-, диа- и ферромагнетика (рис. 191). Поясняют ход кривой намагничивания ферромагнетика: вначале намагничивание растет по некоторой кривой, а затем ферромагнетик достигает магнитного насыщения, чего нет в парамагнетике (при высоких температурах и не очень сильных магнитных полях). Последнее объясняют тепловым движением, препятствующим выстраиванию магнитных моментов по полю. Сложный ход кривой намагничивания ферромагнетика обусловлен сложной зависимостью магнитной проницаемости μ от магнитной индукции B_0 намагничивающего поля.

Сообщают, что истинную кривую намагничивания впервые открыл (1871 г.) и подробно изучил русский ученый Александр Григорьевич Столетов (1839—1896), разработавший метод снятия этой кривой.

Подробному анализу необходимо подвергнуть петлю гистерезиса, предварительно получив ее в школьном эксперименте. Желательно получить эту кривую по точкам [ДЭ, II, опыт 36]. Одна-

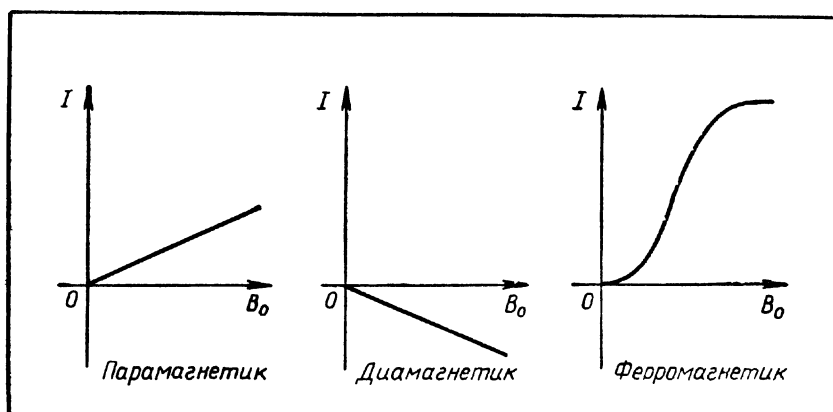


Рис. 191.

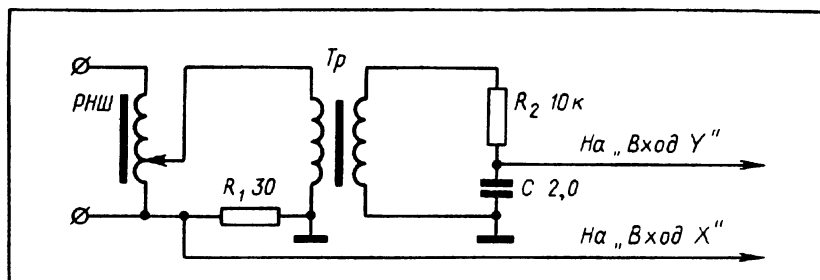


Рис. 192.

ко в ходе урока это сделать сложно и занимает много времени. Такой измерительный опыт можно провести в физическом практикуме. Поэтому на уроке следует демонстрировать петлю гистерезиса сразу — с помощью электронного осциллографа. Собирают установку по схеме, показанной на рисунке 192. На вход X осциллографа (ОЭШ-61) подают напряжение с резистора R_1 , а на вход Y — с конденсатора C ¹.

При анализе предельной (максимальной) петли гистерезиса (рис. 193) обращают внимание на следующее: кривая намагничивания OA не совпадает ни с одним из участков петли гистерезиса; в точке A наступает магнитное насыщение; спад намагничивания отстает от уменьшения \vec{B}_0 намагничивающего поля (магнитный гистерезис²); I_R и $-I_R$ — остаточное намагничивание (при $\vec{B}_0 = 0$), знак при нем характеризует направление остаточного намагничивания; \vec{B}_C и $-\vec{B}_C$ — магнитная индукция намагничивающего поля, при которой остаточное намагничивание обращается в нуль, — коэрцитивная сила (но это не сила!); форма петли гистерезиса зависит от рода вещества и от предыдущего магнитного состояния вещества (от его предыстории); выбор вещества для технических целей зависит от формы и площади петли гистерезиса. Для сердечников электромагнитов, трансформаторов, электрических генераторов, реле, магнитных пускателей петля гистерезиса должна быть

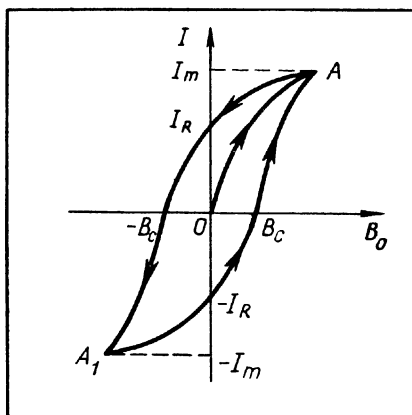


Рис. 193.

¹ См.: Евсюков А. А. Электронный осциллограф в преподавании физики. М., 1972, опыт 20.

² От греческого слова hysteresis — недостаток, нехватка.

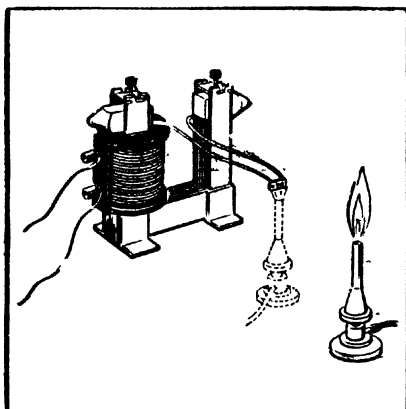


Рис. 194.

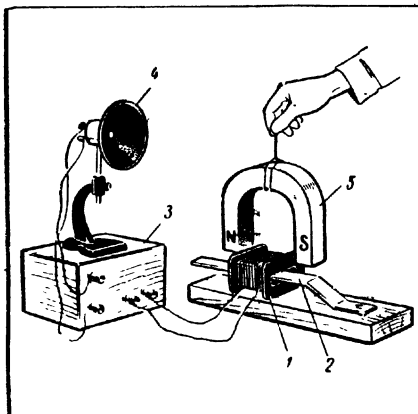


Рис. 195.

узкой (ее площадь и коэрцитивная сила — малы), а для постоянных магнитов, громкоговорителей, электроизмерительных приборов, элементов памяти электронно-вычислительных машин петли гистерезиса должна быть широкой (ее площадь и коэрцитивная сила — большими). Материалы первого типа называют магнитомягкими, а второго типа — магнитожесткими.

Необходимо дать понятие о работе намагничивания, равной механической работе (намагничивание при натирании ферромагнетика магнитом), и работе электрического тока (при намагничивании током).

Представляется необходимым рассмотреть влияние различных физических условий на магнитные свойства ферромагнетиков: температуры, механических воздействий и др.

Влияние температуры (точка Кюри). Ферромагнетики при точке Кюри теряют свои магнитные свойства; т. е. они превращаются в парамагнетик. Это явление можно показать на опытах.

Качественный опыт. Под полюсные наконечники электромагнита, собранного из школьного демонстрационного трансформатора, зажимают две длинные стальные проволоки (рис. 194). Через одну из катушек пропускают ток. Тогда лезвие от безопасной бритвы, железный гвоздь или шуруп, соприкасающиеся с проволокой, намагнитятся и будут удерживаться магнитными силами. При нагревании этих предметов в пламени газовой горелки они нагреются до высокой температуры, размагнитятся и отпадут. После охлаждения лезвия его магнитные свойства не восстанавливаются.

Скачкообразность намагничивания. Несмотря на «плавный» ход кривой намагничивания и петли гистерезиса, намагничивание ферромагнетика происходит скачкообразно. Это было обнаружено в 1919 г. в опыте Баркгаузена. Учебный эксперимент можно поставить в различных вариантах. Схема одного из них показана на рисунке 195. В катушку 1 вставляют пластинку 2 или пучок про-

волокни из мягкой стали или никеля. Концы катушки через усилитель 3 низкой частоты соединяют с громкоговорителем 4. При медленном вращении подковообразного постоянного магнита 5 около катушки (при медленном намагничивании проволоки) слышны щелчки в громкоговорителе как звук от падающего гороха. Объясняют явление скачкообразным намагничиванием ферромагнетика, обусловленным доменной его структурой. Поэтому скачкообразно изменяется э.д.с. индукции в катушке. Импульсы тока обнаруживают с помощью громкоговорителя.

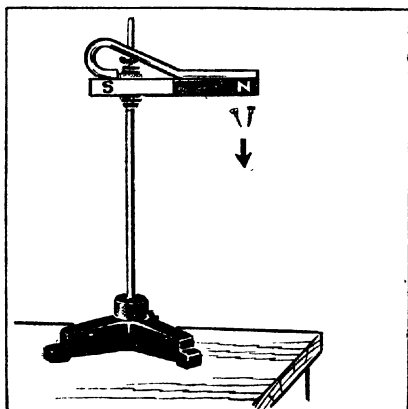


Рис. 196.

Катушку можно включить на вход (зашунтированный резистором) осциллографа. Тогда на его экране видны «всплески».

Механические воздействия. Легкие удары по торцу стального стержня, расположенному по магнитному полю Земли, облегчают намагничивание стержня. Это можно обнаружить по появлению э.д.с. индукции катушки, насаженной на стержень. Если же постоянный магнит расположен как угодно в магнитном поле Земли, то удары по магниту могут привести к его размагничиванию.

Магнитная защита. Рассматривают экранировку от магнитного поля. Таким действием обладает стальной тороид. В полости вне вещества тороида магнитное поле почти отсутствует.

Представляет большой практический интерес тот факт, что если магнитная цепь замкнута, то вне ее магнитного поля нет. Например, к полюсовому магниту притягиваются стальные шурупы. Если с помощью полоски жести полюсы магнита замкнуть, то шурупы отпадут (рис. 196).

По выбору учителя можно рассмотреть на уроке технические приложения магнитных свойств вещества в следующих устройствах: контактор, магнитный пускатель, ограничитель тока и ограничитель напряжения, магнитная сепарация, бетатрон, магнитофон.

ЛИТЕРАТУРА

- Энгельс Ф. Диалектика природы. М., Политиздат, 1969.
Энгельс Ф. Анти-Дюринг. М., Политиздат, 1970.
Ленин В. И. Материализм и эмпириокритицизм. — Полн. собр. соч. Изд. 5-е. Т. 18.
Материалы XXIV съезда КПСС. М., Политиздат, 1971.

Монографии и курсы физики для вузов

- Белюстин С. В. Классическая электронная теория. М., «Высшая школа», 1971.
Бушманов Б. Н., Хромов Ю. А. Физика твердого тела. М., «Высшая школа», 1971.
Вонсовский С. В. Современное учение о магнетизме. М., Гостехиздат, 1973.
Зисман Г. А., Тодес О. М. Курс общей физики. Изд. 5-е. Т. 1—2. М., «Наука», 1972—1974.
Иоффе А. Ф. Физика полупроводников. М. — Л. Изд-во АН СССР, 1957.
Калашников С. Г. Электричество. М., «Наука», 1970.
Кедров Б. М. Энгельс и диалектика естествознания. М., Политиздат, 1970.
Кикоин И. К., Кикоин А. К. Молекулярная физика. М., Физматгиз, 1963.
Киренский Л. В. Магнетизм. М., «Наука», 1967.
Ландау Л. Д., Ахиезер А. И., Лифшиц Е. М. Курс общей физики. Механика и молекулярная физика. М., «Наука», 1965.
Пайерлс Р. Законы природы. Изд. 2-е. М., Физматгиз, 1962.
Парселл Э. Электричество и магнетизм. М., «Наука», 1971.
Планк М. Единство физической картины мира. М., «Наука», 1966.
Поль Р. Учение об электричестве. М., Физматгиз, 1962.
Радужевич Л. В. Курс термодинамики. М., «Просвещение», 1971.
Румер Ю. Б., Рывкин М. Ш. Термодинамика. Статистическая физика. Кинетика. М., «Наука», 1972.
Савельев И. В. Курс общей физики. Т. 1—2. М., «Наука», 1970.
Тамм И. Е. Основы теории электричества. Изд. 8-е. М., «Наука», 1966.
Фейнман Р., Лейтон Р., Сэндс М. Фейнмановские лекции по физике. Вып. 5. М., «Мир», 1966.

История физики

- Кудрявцев П. С. История физики. Т. 1—3. М., Учпедгиз, 1956—1971.
Льоцци М. История физики. М., «Мир», 1970.
Люди русской науки. Очерки о выдающихся деятелях естествознания и техники. Кн. 1. Математика. Механика. Астрономия. Физика. Химия. М., Физматгиз, 1961. Кн. 4. Техника. М., «Наука», 1965.
Спасский Б. И. История физики. Ч. 1—2. Изд-во МГУ, 1963—1964.

Методика преподавания

- Буров В. А. Методика изучения полупроводников в школе. М., «Просвещение», 1965.
Ванеев А. А., Корж Э. Д., Орехов В. П. Преподавание физики в IX классе по новой программе. М., «Просвещение», 1971.

Демонстрационный эксперимент по физике. Под ред. А. А. Покровского. Т. 1—2. М., «Просвещение», 1971—1972.

Еркин А. М. Ионные приборы в физическом эксперименте. М., «Просвещение», 1973.

Зильберман Г. Е. Электричество и магнетизм. М., «Наука», 1970.

Каменецкий С. Е., Орехов В. П. Методика решения задач по физике в средней школе. М., «Просвещение», 1971.

Кондаков В. А. Строение и свойства вещества. М., «Просвещение», 1970.

Куперман Г. Б. Изучение свойств твердого тела в курсе физики средней школы. М., Учпедгиз, 1962.

Практикум по физике в средней школе. Под ред. А. А. Покровского. М., «Просвещение», 1973.

Разумовский В. Г. Творческие задачи по физике в средней школе. М., «Просвещение», 1966.

Разумовский В. Г., Шамаш С. Я. Изучение электроники в курсе физики средней школы. М., «Просвещение», 1968.

Стручков В. В., Яворский Б. М. Вопросы современной физики. М., «Просвещение», 1973.

Фронтальные лабораторные занятия по физике в средней школе. Под ред. А. А. Покровского. М., «Просвещение», 1970.

Шахмаев Н. М., Каменецкий С. Е. Демонстрационные опыты по электродинамике. М., «Просвещение», 1973.

Литература для учащихся

Арцимович Л. А. Элементарная физика плазмы. М., Атомиздат, 1969.

Блудов М. И. Беседы по физике. Ч. 1—2. Изд. 2-е. М., «Просвещение», 1972—1973.

Боровой А. А. и др. Законы электромагнетизма. М., «Наука», 1970.

Кабардин О. Ф., Кабардина С. И., Шефер Н. И. Факультативный курс физики. 9 класс. М., «Просвещение», 1974.

Енохович А. С. Справочник по физике. М., «Высшая школа», 1968.

Карцев В. П. Приключение великих уравнений. М., «Знание», 1970.

Компанеев А. С. Законы физической статистики. М., «Наука», 1970.

Купер Л. Физика для всех. Т. I. М., «Мир», 1973.

Ландау Л. Д., Китайгородский А. И. Физика для всех. М., «Наука», 1973.

Милантьев В. П., Темко С. В. Физика плазмы. М., «Просвещение», 1970.

Роджерс Э. Физика для любознательных. Т. 1—2. М., «Мир», 1969—1970.

Свитков Л. П. Термодинамика и молекулярная физика. Факультативный курс. М., «Просвещение», 1971.

Физика. Пер. с англ. Под ред. А. С. Ахматова. М., «Наука», 1965.

Элементарный учебник физики. Под ред. акад. Г. С. Ландсберга. Т. 1—2. Изд. 8-е. М., «Наука», 1972.

Яворский Б. М., Пинский А. А. Основы физики. Т. 1—2. М., «Наука», 1969—1972.

О Г Л А В Л Е Н И Е

Предисловие	3
Часть I. Молекулярная физика		
Глава I.	<i>Основы молекулярной физики и умения о теплоте</i>	5
	§ 1. Физические и педагогические принципы изучения молекулярной физики и теплоты	—
	§ 2. Содержание и последовательность изучения раздела «Молекулярная физика»	7
Глава II.	<i>Экспериментальные основы молекулярно-кинетической теории</i>	11
	§ 3. Введение	—
	§ 4. Метод обнаружения молекул и их движения	13
	§ 5. Величины, характеризующие молекулы	17
Глава III.	<i>Молекулярно-кинетическая теория газов</i>	25
	§ 6. Введение	—
	§ 7. Основное уравнение кинетической теории газов	26
	§ 8. Анализ основного уравнения кинетической теории газов	30
	§ 9. Методика введения понятия об абсолютной температуре	33
	§ 10. Два способа описания перехода к тепловому равновесию. Постоянная Больцмана	36
	§ 11. Уравнение состояния газа Менделеева — Клапейрона	39
	§ 12. Методика изучения газовых законов. О решении задач	43
Глава IV.	<i>Тепловые явления</i>	47
	§ 13. Введение	—
	§ 14. Формирование понятия внутренней энергии	50
	§ 15. Закон сохранения энергии в механических и тепловых процессах (первый закон термодинамики)	52
	§ 16. Использование внутренней энергии	53
	§ 17. Особенности использования внутренней энергии для совершения работы	57
	§ 18. Об изучении тепловых двигателей в IX классе	61
	§ 19. К изложению идей второго закона термодинамики	62
Глава V.	<i>Агрегатные превращения вещества</i>	63
	§ 20. Введение	—
	§ 21. Взаимодействие атомов и молекул	65
	§ 22. Агрегатные превращения вещества	67
Глава VI.	<i>Свойства жидкостей</i>	70
	§ 23. Введение	—
	§ 24. Формирование понятий об особых свойствах поверхностного слоя жидкости. Поверхностное натяжение	71
	§ 25. Принцип минимума потенциальной энергии	75
	§ 26. Явление смачивания и его практические применения	78
	§ 27. Явление капиллярности и его применения	79
Глава VII.	<i>Свойства твердых тел</i>	82
	§ 28. Введение	—
	§ 29. Механические свойства	—
	§ 30. Кристаллические и аморфные твердые вещества	85

§ 31. Строение твердых тел	88
§ 32. Управление механическими свойствами	91

Часть II. Основы электродинамики

Г л а в а VIII.	<i>Научно-методические основы изучения электродинамики в средней школе</i>	96
	§ 33. Содержание и структура раздела	—
	§ 34. Некоторые педагогические принципы изучения электродинамики	98
Г л а в а IX.	<i>Электрическое поле</i>	99
	§ 35. Введение	—
	§ 36. Закон Кулона	100
	§ 37. Единицы заряда	102
	§ 38. Электрические и гравитационные взаимодействия	104
	§ 39. Электрическое поле и его силовая характеристика	106
	§ 40. Проводники в электрическом поле	109
	§ 41. Электростатическая защита	111
	§ 42. Работа в электрическом поле	112
	§ 43. Решение задач по теме «Работа в электрическом поле»	115
	§ 44. Емкость. Конденсаторы	117
	§ 45. Энергия заряженного конденсатора	125
Г л а в а X.	<i>Законы постоянного электрического тока</i>	126
	§ 46. Введение	—
	§ 47. Условия существования тока	128
	§ 48. Стационарное электрическое поле	132
	§ 49. Электродвижущая сила источника тока	134
	§ 50. Закон Ома для полной цепи	135
	§ 51. Измерение напряжения и э.д.с.	140
Г л а в а XI.	<i>Электрический ток в металлах</i>	142
	§ 52. Введение	—
	§ 53. Экспериментальные основы электронной теории	143
	§ 54. Вывод закона Ома для участка цепи	145
	§ 55. Зависимость электрического сопротивления от температуры	150
	§ 56. Сверхпроводимость	153
Г л а в а XII.	<i>Электрический ток в жидкостях</i>	154
	§ 57. Природа электрического тока в жидкостях	—
	§ 58. Законы Фарадея	156
	§ 59. Определение заряда одновалентного иона	158
Г л а в а XIII.	<i>Электрический ток в вакууме</i>	159
	§ 60. Условия существования тока в вакууме	—
	§ 61. Вольт-амперная характеристика вакуумного диода	162
	§ 62. Электронно-лучевая трубка	166
Г л а в а XIV.	<i>Электрический ток в газах</i>	171
	§ 63. Несамостоятельный разряд в газах	—
	§ 64. Самостоятельный разряд в газах	174
	§ 65. Понятие о плазме	177
	§ 66. Электрический разряд в газах при пониженном давлении	178
Г л а в а XV.	<i>Электрический ток в полупроводниках</i>	182
	§ 67. Электрические свойства полупроводников	—
	§ 68. Собственная проводимость полупроводников	185
	§ 69. Примесная проводимость полупроводников	187
	§ 70. Односторонняя проводимость контактного слоя	189

Г л а в а XVI.	§ 71. Полупроводниковый диод	191
	Магнитное поле в вакууме	193
	§ 72. Введение	—
	§ 73. Взаимодействие токов. Магнитное поле	194
	§ 74. Магнитная индукция	197
Г л а в а XVII.	§ 75. Магнитные поля различных контуров с токами и движущихся носителей заряда	203
	§ 76. Относительность движения и электромагнитные явления	206
	§ 77. Сила Лоренца. Взаимодействие движущихся зарядов	208
	Электромагнитная индукция	213
	§ 78. Введение	—
	§ 79. Явление электромагнитной индукции	215
	§ 80. Правило Ленца	217
	§ 81. Закон электромагнитной индукции	219
	§ 82. Вихревое электрическое поле	223
	§ 83. Индукционный ток в массивных проводниках. Токи Фуко	225
Г л а в а XVIII.	§ 84. Самоиндукция	229
	§ 85. Индуктивность	232
	§ 86. Применение и учет самоиндукции в технике	234
	§ 87. Энергия магнитного поля	240
	Магнитные свойства вещества	242
	§ 88. Введение	—
	§ 89. Магнитная проницаемость вещества	—
	§ 90. Электронная природа магнетизма (пара- и диамагнетизм)	244
	§ 91. Ферромагнетизм	247

Борис Сергеевич Зворыкин, Юрий Александрович Коварский,
Генрих Борисович Куперман, Леонид Исаакович Резников,
Сергей Яковлевич Шамаш, Евгений Дмитриевич Шукин,
Эсфирь Ефимовна Эвенчик

МЕТОДИКА ПРЕПОДАВАНИЯ ФИЗИКИ В СРЕДНЕЙ ШКОЛЕ

Молекулярная физика

Основы электродинамики

Редактор А. Ф. Рава.
Художественный редактор Т. А. Алябьева.
Технический редактор Л. Я. Медведев.
Корректор Р. Б. Штутман

Сдано в набор 24/II 1975 г. Подписано к печати 12/VIII 1975 г. 60×90^{1/8}. Бумага типогр.
№ 1. Печ. л. 16,0+цв. накидка 0,25. Уч.-изд. л. 16,5+цв. накидка 0,23. Тираж 80,5 тыс.
экз. А—05491,

Ордена Трудового Красного Знамени издательство «Просвещение» Государственного комитета Совета Министров РСФСР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли, Москва, 3-й проезд Марьиной Рощи, 41.

Отпечатано с матриц Саратовского ордена Трудового Красного Знамени полиграфкомбината на Калининском полиграфкомбинате детской литературы им. 50-летия СССР Росглавополиграфпрома Госкомиздата Совета Министров РСФСР, Калинин, проспект 50-летия Октября, 46. Заказ № 579.

Цена без переплета 63 коп., переплет 10 коп.

63 коп.

