

**И. И. СОКОЛОВ**

**КУРС  
ФИЗИКИ**

**УЧЕБНИК  
ДЛЯ СРЕДНЕЙ ШКОЛЫ**

*часть 3*

---

**УЧПЕДГИЗ . 1953**

Проф. И. И. СОКОЛОВ

# КУРС ФИЗИКИ

*ЧАСТЬ ТРЕТЬЯ*

**ЭЛЕКТРИЧЕСТВО, ОПТИКА**

**УЧЕБНИК  
ДЛЯ 10-го КЛАССА СРЕДНЕЙ ШКОЛЫ**

**ИЗДАНИЕ 14-е**

*Утвержден Министерством просвещения РСФСР*

**ГОСУДАРСТВЕННОЕ  
УЧЕБНО-ПЕДАГОГИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО  
МИНИСТЕРСТВА ПРОСВЕЩЕНИЯ РСФСР  
МОСКВА \* 1958**

# ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

---

## ВВЕДЕНИЕ.

XX век уже давно получил название века электричества, сменив собой век пара — XIX век.

Это название возникло оттого, что электрическая энергия в настоящее время является важнейшей формой энергии, которую использует человечество.

На научных исследованиях в области электричества и на их техническом использовании основан грандиозный план электрификации нашей великой родины.

Электричеству обязана своим быстрым и широким развитием техника связи, радиотехника, телевидение, автоматизация производственных процессов и многие другие технические достижения.

Развитие учения об электричестве глубоко изменило наше представление о строении материи. В настоящее время в науке основное значение имеет так называемая электронная теория, согласно которой атом каждого химического элемента состоит из частиц, обладающих электрическими свойствами. Объяснение явлений молекулярной физики всё в большей и большей степени опирается на электрическую теорию строения вещества. В последнее десятилетие наука открыла возможность использовать внутриатомную энергию.

Из приведённых соображений о значении электричества вытекает огромная важность изучения этого отдела физики.

## I. ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ.

**1. Электризация трением.** С очень давних времён известно свойство натёртых о шерсть или кожу кусков янтаря (янтарь — ископаемая окаменелая смола хвойных деревьев третичного периода) притягивать лёгкие тела — пушинки, волосы, шерстинки и т. п. Об этом явлении уже за 2500 лет до нашего времени знал греческий философ Фалес Милетский (640—550 гг. до н. э.); от него эти сведения перешли в труды позднейших греческих учёных.

После Фалеса свыше 2000 лет это явление оставалось неизученным и неиспользованным, пока к нему не обратился на рубеже XVII столетия английский врач и физик Д ж и л ь б е р т (в л а т и н с к о м п р о и з н о ш е н и и Г и л ь б е р т).

Так как по-гречески янтарь называется словом электрон, то причину притяжения тел натёртым янтарём он назвал электрической силой. Таким образом был введён в науку термин электричество. Д ж и л ь б е р т установил, что, кроме янтаря, и многие другие тела получают от трения способность притягивать лёгкие тела.

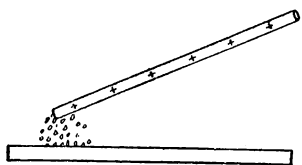


Рис. 1. Натёртая о кожу стеклянная палочка притягивает лёгкие тела.

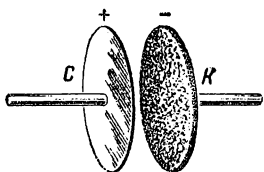


Рис. 2. При трении одновременно электризуются оба тела.

Действительно, легко обнаружить, что натёртые о кожу или сукно стеклянная, эбонитовая, сургучная палочки или кусочки серы, хрусталя и другие тела, поднесённые к мелко нарезанным кусочкам бумаги, притянут их (рис. 1).

Сообщение телам посредством трения<sup>1)</sup> способности притяжения называется электризацией тел. Сами тела, получившие такую способность, называются наэлектризованными, или имеющими электрический заряд.

**2. Одновременная электризация обоих натираемых тел.** В трении участвуют всегда два тела. Оба ли они электризуются? Для опыта, отвечающего

на этот вопрос, надо взять два одинаковых стеклянных круга на стеклянных рукоятках (рис. 2) и на один из них *K* наклеить кожаный круг, покрытый цинковой амальгамой<sup>2)</sup>. Если теперь потереть эти круги один о другой и подносить каждый в отдельности к лёгким телам, то тот и другой круги притягивают эти предметы и обнаруживают таким образом то, что они находятся в состоянии электризации. Но если поднести к лёгким предметам оба натёртых круга вместе, не раздвигая их друг

<sup>1)</sup> Электризация вызывается не механическим действием трения. Для электризации тел достаточно соприкосновения их и последующего разделения. Натирание обеспечивает только соприкосновение поверхностей в большем числе точек и через это — получение больших зарядов.

<sup>2)</sup> А м а л ь г а м о й называется сплав металлов с ртутью или раствор металлов в ртути.



от друга, то никакого притяжения не обнаруживается, их действия взаимно уничтожаются.

Этот опыт приводит к заключению, что существуют различные по своим свойствам электрические состояния, или электрические заряды. Так как опыты, подобные описанным, можно произвести с любыми парами тел, то из них получается следующий вывод: *при трении оба тела электризуются одновременно различными электричествами в равных количествах.*

Разнородность зарядов, получающихся при трении разных тел, впервые подметил в 1733 г. французский физик Дюфэ (1698—1739). Американский учёный Франклин в 1747 г. назвал электричество, получающееся при трении на стекле, положительным, на коже или смоле — отрицательным.

Какой заряд образуется на данном теле при трении о другое тело, зависит прежде всего от природы этих тел, от состояния поверхности обоих тел, от способа обработки их и от других, часто невыясненных причин. Наиболее определённо получается положительный заряд на стекле, натёртом об амальгамированную кожу, и отрицательный — на эбоните, натёртом о мех.

**3. Электризация через прикосновение к заряженному телу.** В 1729 г. англичанин Грэй заметил, что многие тела могут электризоваться от соприкосновения с заряженным телом.

Вырежем лёгкий шарик из пробки, сердцевины подсолнуха, бузины или возьмём комочек бумаги и подвесим на шёлковой нити к штативу (рис. 3). Наэлектризовав трением, например, стеклянную палочку, поднесём её к шарiku: шарик сперва притянется к ней, оттолкнётся. После этого он будет притягивать лёгкие кусочки бумаги, т. е. окажется наэлектризованным. Следовательно, *электрическое состояние может быть передано от наэлектризованного тела другому через их прикосновение.*

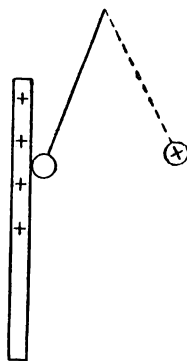


Рис. 3. Электризация бумажного шарика через прикосновение.

**4. Электропроводность.** Опыты привели Грэя к представлению о том, что электрическое состояние может быть передано от одного тела другому и через промежуточное тело, но эта передача в разных веществах происходит по-разному. Десять лет спустя после описанного выше опыта был введён термин про-

водник электричества и было проведено разделение тел на проводники и непроводники.

Проводником называется тело, по которому электрический заряд быстро распространяется от места его образования (трением или прикосновением) по всему проводнику. Непроводником, или изолятором, называется тело, в котором электрический заряд остаётся на месте его возбуждения.

*Проводники:* металлы, уголь, растворы солей и кислот, человеческое тело, земля, вода с примесями в виде растворённых в ней веществ, газы, молекулы которых расщеплены определённым образом.

*Непроводники:* стекло, парафин, каучук, сера, шёлк, большинство кристаллов, фарфор, масла, газы с нерасщеплёнными молекулами.

Между этими группами может быть расположена значительная группа тел со способностью медленной передачи электрического состояния. Такие тела называются полупроводниками.

*Полупроводники:* спирт, эфир, дерево, бумага, солома, шифер, мрамор и др.

Надо иметь в виду, что резкой границы между проводящими, полупроводящими и непроводящими телами (изоляторами) не существует.

При всех опытах с электризацией трением или прикосновением тел, на которых хотят сохранить электрический заряд, должны быть тщательно изолированы от земли. Все подставки или подвесы для наэлектризованных тел должны быть сделаны из хороших изоляторов и хорошо высушены для устранения покрывающей их влаги, которая является проводником.

Ясно, что нельзя наэлектризовать трением проводящее тело, если держать его непосредственно в руке, потому что электрический заряд через руку уходит в землю. Если же это тело изолировать от земли, то оно электризуется так же легко, как и непроводящее тело.

На основании опытов можно утверждать, что *все тела могут быть наэлектризованы трением.*

**5. Взаимодействие наэлектризованных тел. Электроскоп.** Если зарядить два бузиновых шарика, подвешенных на шёлковых нитях, положительным электричеством, а два других шарика — отрицательным, то при сближении первых двух шариков (рис. 4, а) или вторых двух шариков (рис. 4, б) можно наблюдать их отталкивание; но при приближении шарика, заряженного положительно, к шарiku, заряженному отрицательно (рис. 4, в), наблюдается

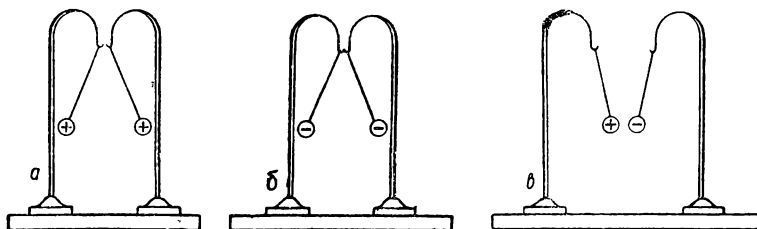


Рис. 4. Взаимодействие наэлектризованных тел.

притяжение. Отсюда вывод: *тела, наэлектризованные одноимённо, отталкиваются, наэлектризованные разноимённо — притягиваются.*

На взаимодействии наэлектризованных тел основано устройство электроскопа (рис. 5) — прибора, обнаруживающего существование электрического заряда на теле.

Первый электроскоп построил Р и х м а н, петербургский академик, сотрудник и друг М. В. Ломоносова.

Один из видов электроскопов — электроскоп с листочками — состоит из металлического стержня, на верхнем конце которого укреплён металлический шарик, а на нижнем помещены на стремечках лёгкие листочки. Стержень через изолирующую пробку проходит внутрь металлического сосуда со стеклянными окошками (иногда внутри стеклянного сосуда). Наличие электрического заряда на исследуемом теле обнаруживается электроскопом тем, что при прикосновении испытуемого тела к шару электроскопа его листочки расходятся. Знак неизвестного заряда исследуют таким образом. Сообщив этот заряд электроскопу, медленно приближают к нему заведомо положительно заряженное тело, например стеклянную палочку, натёртую об амальгамированную кожу. Если листочки расходятся ещё больше, заряд электроскопа положителен, если сходятся, то отрицателен.

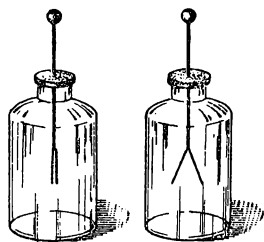


Рис. 5. Электроскоп.

Опыт говорит, что если к положительно заряженному электроскопу подносят положительно заряженную палочку, то наблюдают большее расхождение листочков; при приближении к тому же электроскопу отрицательно заряженной палочки — схождение листочков.

**6. Закон Кулона для взаимодействия наэлектризованных тел.** Всякому телу при его электризации можно сообщить большее или меньшее количество электричества, или иначе — больший или меньший заряд. Два наэлектризованных тела притягиваются или отталкиваются с силой, зависящей от величины их зарядов. Французский физик Кулон в 1785 г. вывел из опытов закон взаимодействия наэлектризованных тел: *два точечных электрических заряда действуют друг на друга с силой, прямо пропорциональной произведению этих зарядов и обратно пропорциональной квадрату расстояния между ними*<sup>1)</sup>.

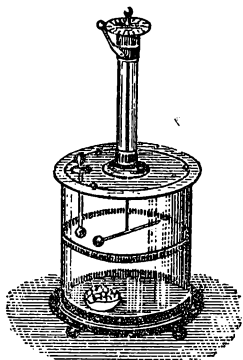


Рис. 6. Крутильные весы Кулона.

Прибором для опытов Кулона служили крутильные весы, изображённые на рисунке 6. В этом приборе на тонкой проволоке подвешен горизонтально стержень из изолятора, на одном конце которого помещён проводящий шарик. Другой такой же проводящий шарик укреплен на изолирующем стержне, пропущенном через крышку весов. До электризации шарики устанавливаются на некотором расстоянии друг от друга. Затем электризуют шарик на стержне, проходящем через крышку, и приводят в соприкосновение с ним подвешенный шарик. Тогда заряд первого шарика распределяется между обоими равными шариками поровну, и подвижный шарик, зарядившись одноимённым зарядом, отталкивается;

чтобы привести его в прежнее положение, необходимо закрутить проволоку в противоположную сторону на некоторый угол. По углу закручивания проволоки можно вычислить силу взаимодействия шариков. Помещая до электризации шарики на разные расстояния и давая им один и тот же заряд, можно найти зависимость силы взаимодействия от расстояния. Помещая шарики до электризации на одно и то же расстояние, но меняя заряды их (через прикосновение с другими равными шариками), можно найти зависимость силы взаимодействия от величины заряда.

Сила взаимодействия точечных зарядов направлена по прямой, соединяющей эти заряды.

Закон Кулона можно выразить в виде формулы следующим образом. Обозначим через  $k$  силу взаимодействия двух зарядов, принятых за единицу и помещённых в безвоздушном пространстве на расстоянии единицы длины друг от друга. Тогда сила взаимодействия заряда в  $q$  единиц и заряда в  $q_1$  единиц по закону Кулона выразится через  $kqq_1$ .

<sup>1)</sup> Закон имеет место для заряженных тел чрезвычайно малого размера в сравнении с расстоянием между ними, для так называемых точечных зарядов.

Если те же заряды поместить на расстоянии  $r$  единиц длины, то сила их взаимодействия  $F$ , обратно пропорциональная квадрату расстояния между ними, получит следующее выражение:

$$F = \frac{kqq_1}{r^2}. \quad (Ia)$$

Если же заряды будут помещены внутри какого-либо изолятора (называемого также диэлектриком), например в керосине или в масле, то сила взаимодействия зарядов в изоляторе будет меньше, чем в пустоте, и выразится формулой:

$$F = \frac{kqq_1}{\epsilon r^2}. \quad (Iб)$$

Величина  $\epsilon$ <sup>1)</sup> для каждого диэлектрика имеет особое значение (§ 21) и называется диэлектрической постоянной вещества, или диэлектрической проницаемостью. Так, для всех газов и воздуха она близка к единице; для парафина, керосина, эбонита — от 2 до 3,5; для сургуча — около 4; для стекла — от 6 до 10; для слюды — от 4,7 до 6,7; для воды (химически чистой) равна 80. Диэлектрическая проницаемость вакуума принимается равной единице.

В последнее время были открыты вещества с громадным значением диэлектрической проницаемости. Среди них можно отметить *сегнетовую соль* — двойную натрокалиевую соль винной кислоты. Её диэлектрическая проницаемость при температурах между  $-20^\circ$  и  $+25^\circ$  достигает значения 20 000.

Если оба заряда  $q$  и  $q_1$  имеют одинаковые знаки, то сила  $F$  положительна, заряды отталкиваются. Если же  $q$  и  $q_1$  имеют разные знаки, — сила отрицательна, заряды притягиваются.

В случае взаимодействия заряженных тел, которые не могут рассматриваться как точечные, силу взаимодействия между ними находят суммированием сил, действующих между отдельными малыми заряженными элементами этих тел.

**7. Электростатическая единица количества электричества в системе CGS.** Чтобы установить единицу количества электричества в системе CGS, надо остальным величинам, входящим в формулу (Ia), — силе и расстоянию — придать значение единиц этой системы.

1)  $\epsilon$  — греческая буква, называется э п с и л о н.



Если мы примем  $r = 1$  см,  $F = 1$  дине и положим  $k = 1$  и  $q_1 = q$ , то получим:

$$1 \text{ дина} = \frac{1q^2}{1^2 \text{ см}^2}, \text{ откуда } q = 1 \sqrt{1 \text{ дин} \times \text{см}^2}.$$

Таким образом за электростатическую единицу количества электричества принимается такое количество, которое действует в пустоте на равное ему количество на расстоянии 1 см с силой, равной 1 дине.

Электростатическая единица количества электричества в системе CGS сокращённо обозначается единица заряда CGSE.

Известная из первоначального курса практическая единица количества электричества — кулон <sup>1)</sup> — равна  $3 \cdot 10^9$  ед. заряда CGSE.

При таком выборе единиц, когда  $k$  принимается равным единице, т. е. численно равняется силе, с которой взаимодействуют два единичных заряда на расстоянии, равном единице, формула закона Кулона получает более простой вид, именно:

$$F = \frac{q \cdot q_1}{\epsilon r^2}. \quad (\text{IV})$$

### Упражнение 1.

1. Точечные электрические заряды в  $+10$  и  $+12$  CGSE находятся на расстоянии 8 см в пустоте. Вычислить и начертить в избранном масштабе силу их взаимодействия. *Отв.*  $+1,875$  дины.

2. Найти силу взаимодействия двух точечных зарядов в  $+20$  и  $-30$  CGSE, находящихся на расстоянии 10 см в керосине. *Отв.*  $-3$  дины.

3. На каком расстоянии сила взаимодействия двух зарядов по 1 CGSE равна в пустоте 1 Г? *Отв.*  $\approx 0,03$  см.

4. Какова была бы сила взаимодействия двух зарядов по 1 кулону на расстоянии 1 м в пустоте? *Отв.*  $9 \cdot 10^{14}$  дин.

5. Чему должны быть равны одинаковые заряды, чтобы сила их взаимодействия в пустоте на расстоянии 10 см равнялась 4 динам?

*Отв.* 20 CGSE.

6. Указать сходство и отличие между законами Кулона и Ньютона (всемирного тяготения).

**8. Электронная теория и объяснение электризации при трении.** По современной электронной теории атом каждого химического элемента состоит из ядра, несущего положительный заряд, и вращающихся вокруг ядра отрицательно заряженных частиц, называемых электронами. Заряд электрона равен  $4,8 \cdot 10^{-10}$  CGSE. Масса электрона почти в 1840 раз меньше массы атома водорода.

<sup>1)</sup> В честь физика Кулона.

Простейший из атомов — атом водорода — имеет один вращающийся вокруг ядра электрон, наиболее сложный — атом урана — имеет 92 электрона. Положительный заряд ядра атома водорода по абсолютной величине равен заряду одного электрона. *Положительно заряженное ядро атома водорода получило название протона.*

Положительный заряд ядра равен по абсолютной величине сумме отрицательных зарядов электронов, вращающихся вокруг ядра (рис. 7) <sup>1)</sup>, так что в целом атом любого химического вещества нейтрален. Советский физик Д. Д. Иваненко первый предложил теорию строения атомного ядра, согласно которой в состав атомных ядер входят, кроме протонов, ещё частицы, имеющие массу, равную массе протона, но не обладающие электрическим зарядом, называемые *нейтронами*.

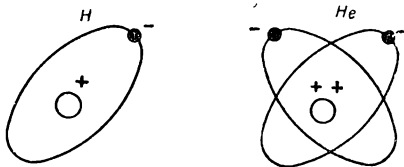


Рис. 7. Схема строения атомов элементов: водорода, гелия.

В настоящее время это представление о строении атомного ядра является общепризнанным.

Атомы многих элементов, в том числе всех металлов, легко теряют один или несколько обращающихся вокруг ядра электронов. Поэтому в каждом металле всегда имеются так называемые свободные электроны, движущиеся между атомами, — то попадающие в сферу притяжения ядра, то выходящие из неё. *Эти свободные электроны и обуславливают хорошую проводимость металлов.*

По электронной теории при трении двух тел друг о друга одно тело теряет свои электроны, отдавая их другому. То тело, на котором обнаруживается недостаток электронов, оказывается заряженным положительно; то же тело, на котором получается избыток электронов, становится заряженным отрицательно. Так как между электронами и положительно заряженными ядрами существует притяжение, то для разделения их надо произвести работу.

**9. Распределение электричества на непроводнике и изолированном проводнике.** В § 4 было уже отмечено, что на непроводнике заряды остаются на тех местах, где они возникают от трения или соприкосновения; на проводнике же они распро-

<sup>1)</sup> Рисунок упрощён, схематизирован, электроны могут вращаться в разных плоскостях:

страняются по всему телу. Опыты показывают, что *электрические заряды в состоянии покоя распределяются только по внешней поверхности проводника*. Из множества опытов, обнаруживающих это явление, можно остановиться на одном.

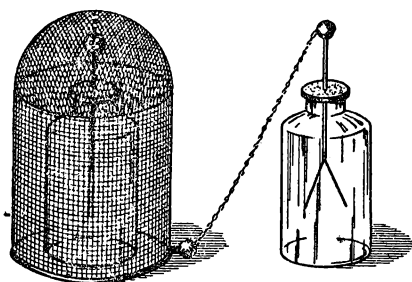


Рис. 8. Электрический заряд распределяется по внешней поверхности проводника.

Если поставить цилиндр из металлической сетки на изолирующую подставку (рис. 8) и соединить внутреннюю поверхность сетки с одним электроскопом, а наружную — с другим, то при электризации сетки через прикосновение с натёртой стеклянной или эбонитовой палочкой внутренний электроскоп не обнаруживает

никакого заряда, тогда как листочки внешнего расходятся всё больше и больше по мере электризации.

**10. Плотность электричества.** В зависимости от способа электризации различные части объёма непроводника могут заключать различные количества электричества. Для характеристики распределения электричества в непроводнике вводится понятие — объёмная плотность электричества в теле. *Объёмная плотность электричества измеряется количеством электричества, приходящимся на  $1 \text{ см}^3$  тела.*

Так как на проводнике заряд распределяется в состоянии равновесия только на внешней поверхности, то для характеристики его распределения вводится понятие о поверхностной плотности электричества. *Поверхностная плотность электричества измеряется количеством электричества, приходящимся на  $1 \text{ см}^2$  поверхности проводника.* Поверхностная плотность зависит от кривизны поверхности. На шаре, где кривизна во всех точках одинакова, плотность повсюду одна и та же.

На поверхностях различной кривизны *поверхностная плотность возрастает с увеличением кривизны.*

Убедиться в подобном распределении плотности можно на следующем опыте. Надо сделать проводник в форме цилиндра и конуса, сложенных основаниями (рис. 9), укрепить его на изолирующей подставке и подвесить в разных точках образующих цилиндра и конуса листочки.

При электризации проводника листочки на образующей цилиндра, имеющего по всей поверхности одинаковую кривизну,

расходятся на один и тот же угол; листочки на образующей конуса расходятся на всё больший угол по мере приближения к вершине; но и кривизна конуса увеличивается от основания к вершине<sup>1)</sup>). Различное расхождение листочков указывает на неравномерное распределение заряда по поверхности данного проводника.

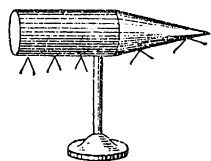


Рис. 9. Поверхностная плотность увеличивается с увеличением кривизны поверхности.

На проводниках с очень большой кривизной — на так называемых остриях — электричество не может держаться, когда его плотность превосходит определённый для данных условий предел. Тогда заряженный проводник начинает терять свой заряд. Потеря отрицательного заряда начинается при меньшей плотности, чем положительного. Причина этого явления рассматривается в § 103.

## Упражнение 2.

1. Почему проводники для электрических опытов делаются полими?
2. Если прикоснуться заряженным проводником к внешней поверхности другого незаряженного изолированного проводника, может ли первый проводник передать второму весь свой заряд?
3. Как при помощи отрицательно заряженной палочки узнать неизвестный знак заряда электроскопа?
4. Почему приборы в электростатических опытах, предназначенные для хранения на себе электричества, не имеют острых концов, а заканчиваются округлёнными поверхностями?

## 11. Электрическое поле. Напряжённость. Силовые линии.

Действие электрических зарядов на расстоянии свидетельствует о том, что вокруг каждого электрического заряда существует электрическое поле, которое и оказывает непосредственное действие на другие заряды.

Изучение обширной области электрических явлений убеждает нас в том, что электрическое поле представляет собой особую форму материи.

Любой электрический заряд, помещённый в электрическое поле, будет испытывать действие некоторой силы. Величина этой силы будет зависеть как от величины внесённого в поле электрического заряда, так и от самого поля.

Чтобы иметь возможность сравнивать между собой различные поля, условились относить их действия к одному и тому же за-

<sup>1)</sup> В этом направлении уменьшаются радиусы окружностей, представляющих сечения, параллельные основанию.

ряду, а именно к единице положительного заряда. Тогда поле можно характеризовать особой величиной, называемой напряжённостью поля.

Напряжённость поля в данной точке есть величина, измеряемая силой, с которой поле действует на единицу положительного заряда, помещённого в данную точку поля.

Если  $F$  — сила, с которой заряд, образующий поле, действует на заряд  $q_1$ , то сила, с которой поле действует на единицу заряда, будет  $\frac{F}{q_1}$ .

Если обозначить напряжённость поля через  $E$ , то:

$$E = \frac{F}{q_1}; \quad (\text{IIa})$$

из формулы (IIa) берём значение  $F$ , и тогда для поля точечного заряда:

$$E = \frac{q}{\epsilon r^2}; \quad (\text{IIб})$$

для пустоты:

$$E = \frac{q}{r^2}. \quad (\text{IIв})$$

Напряжённость поля, как и сила, есть вектор.

Изучить поле данного заряженного тела — значит узнать величину и направление напряжённости в разных точках поля. Направление напряжённости в разных точках поля можно изобразить при помощи линий, которые называются силовыми линиями. Получить картину силовых линий можно при помощи кристалликов хинина или кусочков асбеста, взвешенных в вязком диэлектрике, например в вазелиновом или касторовом масле. Если в этом диэлектрике образовать электрическое поле, то кристаллики в каждой точке располагаются по направлению действующей в этой точке силы.

Для этой же цели можно воспользоваться длинными гибкими проводниками, например тонкими лентами из лёгкой папиросной бумаги.

Если приклеить такие длинные тонкие ленты к маленькому металлическому шарiku, укрепленному на непроводящей подставке, и зарядить этот шарик положительным электричеством, то все бумажные ленты, зарядившись от шарика тоже положительно, отталкиваются от него по радиусам, как схематически показывает рисунок 10.



В данном случае силы, действующие на положительный заряд, направлены по радиусам от шарика. Таким образом, силовые линии поля, образованного точечным положительным зарядом, суть радиальные прямые, расходящиеся из данной точки, как из центра.

Силовым линиям приписывают определённое направление. За направление силовых линий принимается то направление, по которому двигалось бы в данном поле положительно заряженное тело. В рассмотренном случае силовые линии будут направлены от шарика, что и указано на рисунке стрелками.

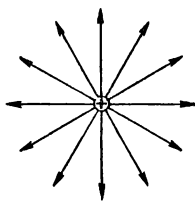


Рис. 10. Силовые линии поля, образованного точечным положительным зарядом.

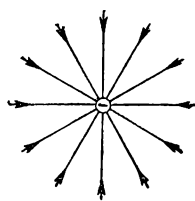


Рис. 11. Силовые линии поля, образованного точечным отрицательным зарядом.

Если шарик зарядить отрицательным электричеством, то все ленты попрежнему вытянутся по радиусам (рис. 11). Форма силовых линий в случае поля, образованного точечным зарядом любого знака, одинакова. Только в случае отрицательного заряда направление силовых линий будет обращено к шарикам:

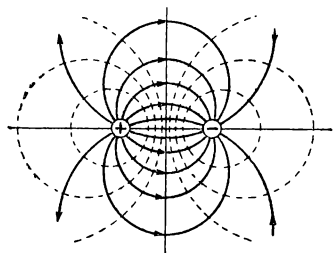


Рис. 12. Силовые линии поля, образованного двумя точечными разноимёнными зарядами.

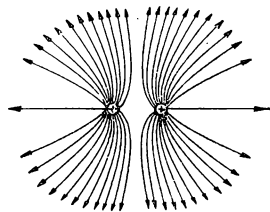


Рис. 13. Силовые линии поля, образованного двумя точечными одноимёнными зарядами.

положительный заряд притягивался бы к отрицательному заряду, образующему поле.

Если два шарика, снабжённые бумажными лентами, зарядить разноимёнными зарядами и приблизить один к другому, то бумажные ленты располагаются так, как показано на рисунке 12, сплошными линиями. Если же оба шарика получают заряды одноимённые, то бумажные ленты расположатся, как показано на рисунке 13.

Следовательно, рисунки 12 и 13 дают форму и направление силовых линий полей, образованных двумя точечными зарядами: в первом случае разноимёнными, во втором — одноимёнными.

Два последних рисунка показывают, что силовые линии могут быть и криволинейными. Силы же на чертеже изображаются отрезками прямой. Прямая и кривая имеют тогда общее направление в данной точке, когда прямая касательна к кривой в этой точке.

Таким образом, *силовой линией электрического поля называется такая линия, касательная к которой в каждой точке даёт направление напряжённости поля в этой точке. За направление силовой линии принимается то направление, по которому поле действует на положительный заряд. Следовательно, силовая линия начинается у положительно заряженного тела и оканчивается на отрицательно заряженном теле.*

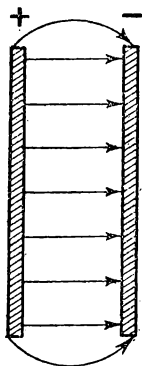


Рис. 13а.

Электрическое поле, в котором напряжённости во всех точках одинаковы по величине и направлению, называется однородным. Такое поле существует между двумя очень большими параллельными заряженными металлическими пластинами (кроме краёв их). В таком поле силовые линии могут быть представлены параллельными равно отстоящими прямыми (рис. 13а).

Две силовые линии ни в каком поле никогда не пересекаются. Если бы они пересекались, то это означало бы, что в данной точке пространства существуют два различных направления силы поля, чего не может быть.

**12. Потенциал.** Всякий положительный заряд будет действовать с некоторой силой на любой другой положительный заряд, находящийся в поле первого. Если этот второй заряд может двигаться, то сила поля, перемещая его, будет совершать работу.

Наибольшая работа, которую может совершить сила поля при перемещении положительного заряда, получится в том случае, если этот заряд будет удалён на бесконечно большое расстояние от заряда, образующего поле.

Если заряд находится в какой-либо точке поля, то он обладает определённой потенциальной энергией, измеряемой величиной той работы, которая может быть совершена при перемещении этого заряда из данной точки в бесконечность.

Для характеристики каждой точки любого электрического поля следует относить потенциальную энергию в этой точке

поля не к различным находящимся в нём случайным зарядам, а к раз навсегда определённом для всех полей заряду. За такой заряд естественно взять единичный положительный заряд. При таком выборе каждую точку поля можно охарактеризовать особой величиной, получившей название потенциала в данной точке поля.

Таким образом, *потенциал в каждой точке электрического поля есть величина, измеряемая той работой, которая может быть совершена при перемещении единицы положительного электричества из данной точки поля в бесконечность*. Если поле образовано отрицательным зарядом, то потенциал каждой точки его будет измеряться работой, совершаемой силою поля при перемещении единицы положительного заряда из бесконечности в данную точку поля. Потенциал обозначается буквой  $V$ .

Для каждой точки поля можно рассчитать, какой запас потенциальной энергии имел бы внесённый в неё заряд  $+1$ , независимо от того, будет ли там в действительности находиться заряд или нет.

Приведённые соображения напоминают расчёты запасов потенциальной энергии в телах, поднятых на разную высоту над поверхностью земли. При этом приходится преодолевать силу притяжения тела к земле. Работа, совершённая при подъёме тела, превращается в запас потенциальной энергии поднятого тела <sup>1)</sup>. Тело, предоставленное самому себе, падает под действием силы тяжести: запас его потенциальной энергии превращается в кинетическую энергию. Направление, по которому действует сила тяжести, совпадает с земным радиусом. Мы можем и для земного притяжения ввести такие же обозначения, как и для силы электрического взаимодействия. Мы можем говорить о поле тяготения; направления сил в этом поле можем обозначить при помощи силовых линий. Каждую точку поля тяготения также можно характеризовать так называемым потенциалом земного тяготения.

Потенциал электрического поля, образованного отрицательным зарядом, отрицателен, а образованного положительным зарядом, положителен.

*Работа по перемещению  $+1$  электричества на каком-нибудь отрезке силовой линии численно равна разности*

---

<sup>1)</sup> Потенциальная энергия принадлежит совокупности двух или нескольких тел: поднятый над землёй камень получает некоторое количество потенциальной энергии по отношению к земле; отталкиваемый заряд обладает потенциальной энергией по отношению к заряду, образующему поле, к которому он приближен.

потенциалов в точках начала и конца пути по силовой линии. Работа по перемещению количества электричества  $q$  из точки  $A$  в точку  $B$  равна произведению количества электричества на разность потенциалов точек начала и конца пути:



Фарадей<sup>2)</sup>  
(1791—1867).

$$A = q(V_A - V_B). \quad (III)$$

Сила поля всегда перемещает положительный заряд из точки с большим потенциалом в точку с меньшим потенциалом (по направлению уменьшения запаса потенциальной энергии).

В выражение работы по переносу заряда между двумя точками поля входит только разность потенциалов этих точек; эта разность потенциалов получила особое название — напряжение между двумя точками поля. Напряжение обозначается буквой  $U$ <sup>1)</sup>.

Теория даёт зависимость между потенциалом  $V$  в точке поля, точечным зарядом  $q$ , образующим поле, и расстоянием  $r$  точки,

---

1) Не надо смешивать двух различных величин — напряжённости и напряжения, имеющих сходные наименования: первая измеряется силой поля, действующей на заряд  $+1$ , вторая — работой, совершаемой силой поля при перемещении заряда  $+1$ .

2) Фарадей Михаил — гениальный физик первой половины XIX столетия, выдающийся экспериментатор — родился в окрестностях Лондона.

Фарадей пришёл к заключению, что взаимодействие наэлектризованных или намагниченных тел происходит не на расстоянии, а только через среду, окружающую тело. Высказанные им мысли легли в основу учения об электрическом и магнитном полях, которое привело к современному учению об электромагнитных колебаниях, в частности, о радиоволнах.

Фарадей открыл электромагнитную индукцию — основу современной электротехники. Он показал, что способность намагничиваться принадлежит всем без исключения телам в твёрдом, жидком и газообразном состояниях; он установил действие магнитного поля на световой луч, нашёл законы химического действия тока и дал способ обращения газов в жидкое состояние. В своих работах Фарадей руководствовался глубоким убеждением в единстве всех сил природы.

для которой определяется потенциал, от заряда, образующего поле. Эта зависимость выражается формулой:

$$V = \frac{q}{\epsilon r}.$$

**13. Единицы разности потенциалов.** Единицу разности потенциалов можно установить из формулы (III):

$$A = q(V_A - V_B),$$

откуда:

$$V_A - V_B = \frac{A}{q}.$$

Если положить  $A = 1$  эрг и  $q = 1$  заряда CGSE, то

$$V_A - V_B = \frac{1 \text{ эрг}}{1 \text{ заряд CGSE}} = 1 \frac{\text{эрг}}{\text{ед. зар. CGSE}}.$$

*За электростатическую единицу разности потенциалов в системе CGSE принимается такая разность потенциалов двух точек поля, при которой на передвижение единицы количества электричества из одной точки в другую затрачивается работа в 1 эрг.*

За практическую единицу напряжения или разности потенциалов принимается вольт.

Вольт составляет  $\frac{1}{300}$  единицы потенциала в системе CGSE.

Рассчитаем работу перемещения заряда в 1 кулон между двумя точками поля, напряжение между которыми равно 1 вольту.

По формуле (III) имеем:  $A = 1$  кулон.  $1$  вольт  $= 3 \cdot 10^9$  CGSE заряда  $\times \frac{1}{300}$  CGSE потенциала  $= 10^7$  эрг  $= 1$  джоуль.

Следовательно, *вольт* может быть определён как *такое напряжение, при котором перемещение заряда в 1 кулон требует работы в 1 джоуль.*

### Упражнение 3.

1. Чему равна напряжённость поля, образованного точечным зарядом в  $+1600$  CGSE на расстоянии  $20$  см от него в пустоте?

2. Поле образовано зарядом в  $+1$  кулон. Найти напряжённость поля на расстоянии  $2$  м от заряда.

**14. Поверхности равного потенциала в поле, образованном точечным зарядом.** Если электрическое поле образовано одним точечным зарядом, то во всех точках его, равноотстоящих от заряда, образующего поле, потенциалы будут равны.



Такие равноотстоящие точки лежат на концентрических шаровых поверхностях, расположенных вокруг точечного заряда. Следовательно, в поле, образованном одним точечным зарядом, шаровые поверхности, описанные вокруг этого заряда, являются поверхностями равного потенциала, или эквипотенциальными поверхностями. В каждой точке поля действующая сила образует прямой угол с поверхностью равного потенциала, так как сила направлена по радиусу, или, как говорят в геометрии, сила нормальна к поверхности.

**15. Работа перемещения заряда между эквипотенциальными поверхностями.** Мы видели, что работа, совершаемая силой поля при перемещении заряда вдоль силовой линии, зависит от разности потенциалов в точках начала и конца пути. Той же величине, но противоположной по знаку, равна работа, совершаемая при движении заряда против силы поля.

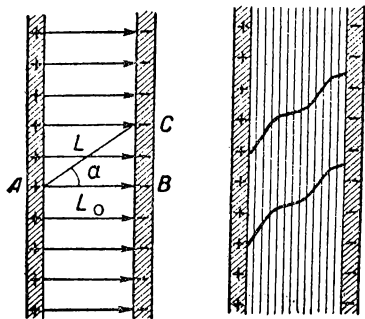


Рис. 14. Работа перемещения заряда между двумя эквипотенциальными поверхностями не зависит от формы пути.

перемещался по линии  $AC = L$  под углом  $\alpha$  к линии  $AB$ , то работа силы  $F$  выразилась бы формулой:

$$A_{AC} = FL \cos \alpha, \text{ но } L \cos \alpha = L_0, \text{ откуда: } A_{AC} = FL_0.$$

Работа на пути  $CB$  вдоль эквипотенциальной поверхности  $ACB = 0$ , так как сила перпендикулярна к эквипотенциальной поверхности, и в этом случае  $\alpha = 90^\circ$ ;  $\cos 90^\circ = 0$ . Но  $FL_0$  есть в то же время работа вдоль силовой линии  $AB$ .

Итак, вся работа по перемещению заряда из  $A$  в бесконечно близкую точку  $B$  по линии  $ACB$  равна работе при движении по силовой линии между теми же точками.

Если путь перемещения заряда между двумя любыми эквипотенциальными поверхностями будет ломаная или кривая линия, то всё пространство между крайними эквипотенциальными поверхностями можно разбить бесконечно близкими эквипотенциальными поверхностями на такие малые промежутки, что в пределах каждого промежутка часть кривой можно принять за прямую. Применяя к каждому участку ломаной линии предыдущий вывод, можно прийти к следующему окончательному заключению:

*Работа силы поля или работа против силы поля при перемещении заряда между двумя точками поля зависит не от формы*

пути между ними, а только от разности потенциалов точек начала и конца пути.

Точно такое же соотношение имеет место и при вычислении работы силы тяжести при перемещении тела в поле силы тяжести<sup>1)</sup>.

**16. Эквипотенциальные поверхности в поле любых зарядов.** Легко сообразить, что эквипотенциальные поверхности в любом поле, образованном какими угодно зарядами, должны иметь нормальными<sup>2)</sup> векторы сил поля, действующих в точках этих поверхностей, или, иначе говоря, силы должны быть нормальны к поверхностям. В самом деле, работа по перемещению заряда между двумя точками вдоль эквипотенциальной поверхности, равная разности потенциалов в этих точках, будет равна нулю.

Работа же может быть равна нулю, если сила перпендикулярна к перемещению. Работа, вычисляемая для каждого как угодно малого перемещения по формуле  $A = FL \cos \alpha$  (где  $\alpha$  — угол между направлениями силы и перемещения), может быть нулём только тогда, когда  $\cos \alpha = 0$ ; последнее же условие наступает при  $\alpha = 90^\circ$ . Следовательно, *электрическая сила нормальна к эквипотенциальной поверхности.*

Таким образом, если известно направление силовых линий в поле, образованном любыми зарядами, то можно провести нормально к ним поверхности, которые будут поверхностями равного потенциала. Такие эквипотенциальные поверхности в поле, образованном двумя различными точечными зарядами, изображены в сечении пунктирными линиями на рисунке 12.

Когда заряжен изолированный проводник, то заряды в нём находятся в равновесии. Это значит, что сила, действующая на каждую часть заряда со стороны всех остальных частей заряда, находящихся на проводнике, направлена перпендикулярно к поверхности наружу. Иначе не могло бы существовать равновесие, и свободные заряды перемещались бы по проводнику.

Если же силы в каждой точке перпендикулярны к поверхности проводника, то это значит, что *поверхность проводника является одной из эквипотенциальных поверхностей.*

**17. Электромметр.** Проводники могут быть наэлектризованы до различных потенциалов. Судить о потенциале заряженного проводника можно по расхождению листочков электроскопа с металлическим корпусом, отводимым к земле. Такой электроскоп называется **электрометром** (рис. 16). Для измерения потенциала стержень электрометра соединяют длинной проволокой с исследуемым проводником.

При соединении с проводником электромметр составит часть поверхности проводника. На него перейдёт часть заряда проводника, листочки его разойдутся, и потенциал электрометра станет одинаков с потенциалом проводника. Что электромметр, соединённый с заряженным проводником, показывает его потен-

<sup>1)</sup> Ср. работу по наклонной плоскости без трения и работу по поднятию груза вертикально на ту же высоту в 1-й части „Курса физики“.

<sup>2)</sup> Н о р м а л ь — перпендикуляр к поверхности.

циал, можно убедиться из следующего опыта. Заряжают проводник в форме цилиндра, соединённого с конусом. К шарiku далеко отставленного электрометра присоединяют гибкую про-

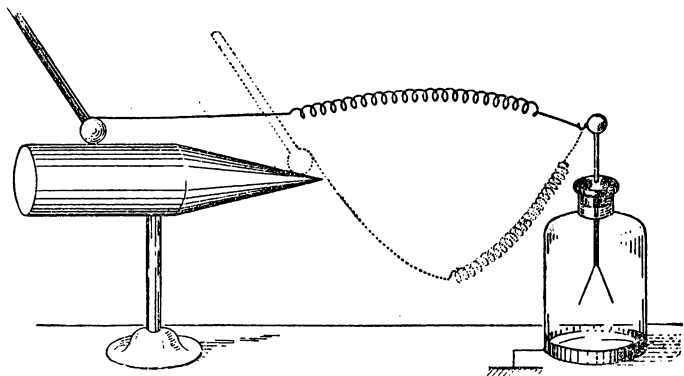


Рис. 15. Потенциал проводника одинаков на всём проводнике.

волоку, другой конец которой присоединён к пробному шарiku (рис. 15). Пробным шариком называется металлический шарик на изолирующей ручке. Затем пробным шариком проводят по основанию и вдоль образующих цилиндра и конуса до самой вершины последнего. При этом перемещении показание электрометра не изменяется. Следовательно, теперь электрометр показывает не плотность заряда, которая меняется от основания к вершине, а потенциал, который постоянен на всём проводнике.

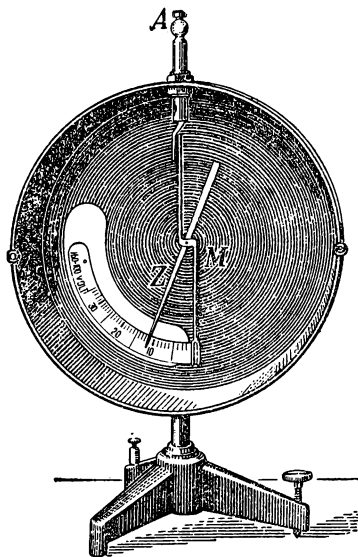


Рис. 16. Электрометр.

Если к электрометру присоединить шкалу, по которой можно измерять углы отклонения листочка, то можно сравнивать между собой потенциалы различных проводников. Понятие о градуировке электрометра дано в § 29.

**18. Поверхность нулевого потенциала.** Так как все предыдущие рассуждения показывают, что работа силы в электрическом поле зависит только от разности потенциалов, то абсо-

лутная величина потенциала точки не имеет значения. Поэтому при отсчёте потенциалов можно принять за нуль потенциал любой из точек. *За нулевой потенциал условно принимают потенциал земли.*

Подобным же образом разность двух температур, например температуры таяния льда и кипения воды, не зависит от того, отсчитываем ли мы их от абсолютного нуля или нуля Цельсия. Вершина Казбека всегда будет на 5100 м выше уровня моря, будут ли отсчитывать высоты от уровня моря или от дна океана на месте наибольшей глубины.

**19. Переход электричества с одного проводника на другой зависит от их потенциалов.** Если соединить два проводника с одинаковыми потенциалами, между ними не будет перехода электричества.

Если же зарядить два проводника положительным электричеством до разных потенциалов (измерив их электрометром) и затем соединить оба проводника проволокой, то начнётся перемещение электричества с одного проводника на другой; при этом электрометр отметит, что оба соединённые проводника получают один потенциал, промежуточный между двумя первоначальными потенциалами. Опыт показывает, что *положительное электричество перемещается по проводнику от тела с большим потенциалом к телу с меньшим потенциалом, пока потенциалы тел не сравняются.* Подобный же опыт с двумя отрицательно заряженными до разных потенциалов телами также покажет, что *отрицательное электричество перемещается по проводнику от тела с меньшим потенциалом к телу с большим потенциалом*<sup>1)</sup>.

Если положительно заряженное тело соединить с землёй, то весь положительный заряд уйдёт в землю; то же произойдёт, если соединить с землёй отрицательно заряженное тело. Положительно заряженное тело имеет положительный потенциал, отрицательно заряженное тело — отрицательный потенциал.

Так как в металлах свободно могут передвигаться только электроны, а положительный заряд тел означает недостаток в нём электронов, то при соединении положительно заряженного тела с землёй на самом деле электроны перейдут из земли на проводник в таком количестве, чтобы нейтрализовать его положительный заряд. Окончательное состояние проводника будет такое же, как если бы ушёл в землю положительный заряд

---

<sup>1)</sup> „Большой“ и „меньший“ здесь надо понимать алгебраически; например, потенциал — 5V алгебраически больше потенциала — 10V.

проводника; поэтому при описании этих явлений продолжают придерживаться прежних способов выражения, говоря о движении положительного электричества.

Явление перемещения электричества сходно с явлением движения жидкости из одного сосуда в другой, с ним сообщающийся, когда в первом уровень жидкости выше, чем во втором; движение прекращается, когда уровни в обоих сосудах сравняются.

**20. Электростатическая индукция.** Исследуем действие электрического поля на вводимые в него тела. Начнём с действия поля на изолированный проводник. В качестве проводника

возьмём два одинаковых электроскопа, шарики которых соединены металлической проволокой с изолирующей ручкой (рис. 17). Электрическое поле будем образовывать при помощи наэлектризованной стеклянной или эбонитовой палочки.

Поднесём с какой-либо стороны, например с правой, к электроскопам положительно заряженную палочку. Листочки обоих электроскопов расходятся даже тогда, когда заряженное тело находится ещё на некотором расстоянии от электроскопов.

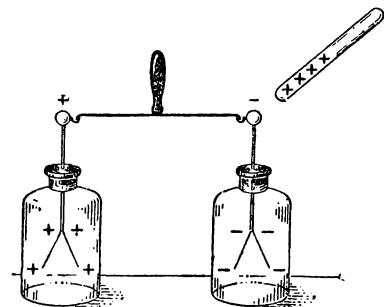


Рис. 17. Индукция двух разноимённых зарядов на концах изолированного проводника в присутствии заряженного тела.

**Вывод:** при приближении заряженного проводника к незаряженному на обоих концах последнего появляются электрические заряды.

Удалим (не прикасаясь заряженной палочкой к электроскопам) заряженное тело; обе пары листочков совершенно опадают.

**Вывод:** образовавшиеся заряды разнородны и возникли в одинаковых количествах (иначе не могла бы произойти полная нейтрализация).

Чтобы узнать, какого знака заряд образовался на каждом электроскопе, опять приблизим с той же стороны тот же положительный заряд и затем снимем за изолирующую ручку проволоку, соединяющую оба электроскопа. Теперь электроскопы сохраняют свои заряды и по удалении заряженного тела. Исследуем их по правилу, данному в § 5.

Оказывается, электроскоп, к которому был поднесён положительный заряд, имеет заряд отрицательный, другой же электроскоп имеет заряд положительный.



Повторим опыты, поднеся положительный заряд слева к электроскопам или поднося сначала справа, а затем слева отрицательный заряд. Определяя каждый раз знаки возникающих зарядов, можем сделать следующий общий вывод: *если приблизить заряженное тело к изолированному проводнику, то на нём возникают два разноимённых заряда в равных количествах; при этом на конце проводника, ближайшем к заряженному телу, возникает заряд, разноимённый с влияющим зарядом (на поднесённом теле), на конце отдалённом — одноимённый*. По удалении влияющего заряда проводник опять становится незаряженным.

Это явление называется электростатической индукцией и объясняется следующим образом. Положим, что влияющее тело заряжено положительно. Тогда образованное им поле притягивает свободные отрицательные заряды проводника, внесённого в поле. Такими свободными, легко передвигающимися количествами отрицательного электричества являются свободные электроны.

Под действием поля положительно заряженного тела электроны изолированного проводника перемещаются на его конец, ближайший к заряженному телу, и здесь образуют отрицательный индуктированный заряд; недостаток электронов на отдалённом конце создаёт равновеликий положительный заряд. После удаления изолированного проводника из поля электроны снова попрежнему распределяются по проводнику, и восстанавливается нейтральное состояние проводника. Если поле образовано отрицательно заряженным телом, то электроны проводника отталкиваются этим телом и уходят на возможно более далёкий от него конец проводника, где и образуют отрицательный заряд. Ближний конец проводника лишится части электронов, и на нём обнаружится положительный заряд.

Если в присутствии влияющего тела соединить на мгновение изолированный проводник (электроскоп) с землёй (рис. 18), то одноимённый с влияющим заряд уходит в землю, которая теперь становится отдалённым концом проводника. Разноимённый же заряд, вследствие притяжения к заряженному телу, остаётся на проводнике. Если прекратить соединение проводника с землёй и затем удалить влияющее тело, то изолированный проводник окажется заряженным разноимённо с влияющим телом (рис. 18а).

При внесении любого проводника в любое электрическое поле возникает электростатическая индукция. Она продолжается до тех пор, пока индуктированные заряды не распределятся на

проводнике таким образом, что вызванные этими зарядами силы станут для всех точек проводника равными по величине, но противоположными по направлению тем силам, которые существовали в этих точках до внесения проводника. Следовательно, силы, вызванные индуцированными зарядами, уравнивают для всех точек проводника существовавшие там силы внешнего поля. В результате поле внутри проводника исчезает, но зато усиливается вблизи проводника.

Индукция зарядов происходит и в непроводнике. Если к заряженному электроскопу поднести незаряженный непроводник, то листочки электроскопа слегка опадают (рис. 19),

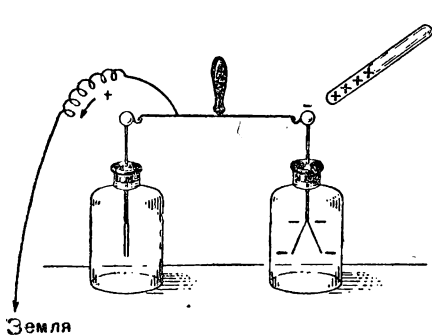


Рис. 18. Заряд одноимённый с влияющим уходит в землю, на теле остаётся заряд противоположного знака.

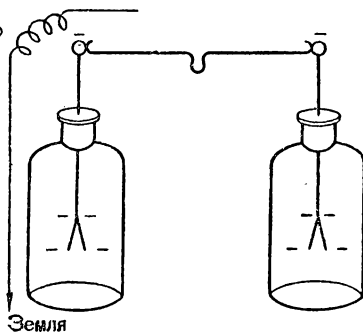


Рис. 18а. Заряжение изолированного проводника через индукцию.

Это опадание можно объяснить тем, что в диэлектрике (непроводнике) находятся заряды и разноимённый заряд ближайшего конца диэлектрика притягивает к себе часть заряда, находящегося на электроскопе, и этим вызывает перераспределение заряда в нём. Но если в присутствии заряженного тела разделить диэлектрик пополам, то отдельных разноимённых зарядов на обеих его половинах обнаружить не удастся (как это было обнаружено в аналогичном опыте при делении проводника).

Последнее явление можно объяснить следующим образом: в диэлектрике все электроны неразрывно связаны с положительными ядрами, входящими в состав атомов или молекул. Поэтому в диэлектриках положительные и отрицательные заряды могут испытывать лишь очень небольшие смещения относительно друг друга в пределах каждой молекулы.

Простейшей моделью нейтральной молекулы можно считать диполь, состоящий из положительного заряда (чёрные кружки на рис. 20) и отрицательного заряда (белые кружки), неразрывно связанных друг с другом.

Всякий электрон, быстро движущийся вокруг ядра, действует на какой-либо внешний заряд так, как если бы он находился в центре орбиты. Поэтому действие каждого движущегося вокруг ядра электрона можно свести к действию неподвижного электрона, и затем действие всех электронов атома свести к действию одного отрицательного заряда, по величине равного сумме зарядов всех электронов атома и, следовательно, равному заряду ядра, но положение этого заряда может не совпасть с положением ядра. Тогда атом можно рассматривать как систему, состоящую из связанных между собой двух равных по величине и противоположных по знаку зарядов. Такая система носит название диполь.

При отсутствии внешнего поля эти диполи расположены в диэлектрике беспорядочно (рис. 20, *a*). При внесении диэлектрика в электрическое поле молекулы повернутся на некоторый

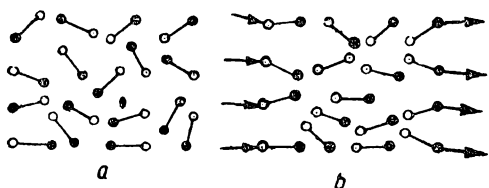


Рис. 20. Аморфный диэлектрик:  
*a* — неполяризованный; *b* — поляризованный.

угол так, что положительная часть молекулы немного переместится в направлении силовых линий внешнего поля, отрицательная — в противоположную сторону (рис. 20, *b*). В результате малых поворотов положительные заряды переместятся к одному концу тела, отрицательные — к другому.

Диэлектрик, в котором произошло такое смещение в пределах каждой молекулы положительных зарядов в одну сторону и

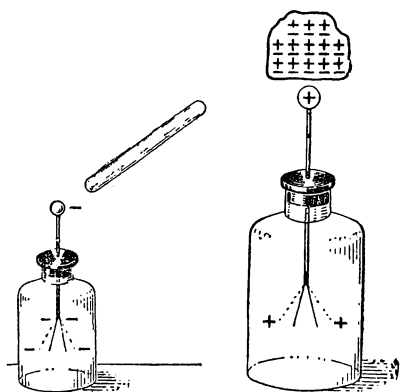


Рис. 19. Влияние поднесённого диэлектрика на распределение заряда в электрооскопе.

отрицательных — в другую, называется *поляризованным*, а самое явление — *поляризацией диэлектрика*.

Отсюда ясно, почему делением диэлектрика пополам отделить в нём положительные заряды от отрицательных не удастся. По удалении диэлектрика из внешнего поля упорядоченное расположение диполей вследствие теплового движения исчезает.

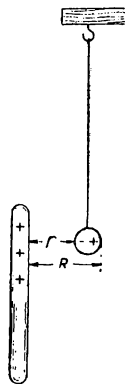


Рис. 21. Притяжение разноимённых зарядов больше отталкивания одноимённых.

**21. Следствия из явления индукции.** 1) *Заряджение проводника через индукцию.* Чтобы зарядить проводник, в частности электроскоп, через индукцию, надо поднести к проводнику заряженное тело, на мгновение соединить проводник с землёй (прикоснуться пальцем), отъединить от земли и удалить влияющее заряженное тело. Проводник зарядится зарядом, разноимённым с влияющим и тем в большем количестве, чем ближе был поднесён влияющий проводник.

2) *Объяснение притяжения лёгких тел заряженным телом.* Если поднести к висящему на нити шарика заряженное тело, то на ближайшей стороне шарика возникает заряд, разноимённый с влияющим, на отдалённой стороне — одноимённый с ним (рис. 21). Разноимённый заряд притягивается зарядом на теле, одноимённый — отталкивается. Но так как разноимённый заряд находится ближе к влияющему, чем одноимённый, то притяжение сильнее отталкивания и шарик притягивается к влияющему телу.

При соприкосновении шарика с заряженным телом разноимённые заряды — наводящий и наведённый — взаимно нейтрализуются, остаётся один одноимённый, вследствие чего шарик отталкивается и оказывается наэлектризованным тем же электричеством, как и тело, к которому он прикоснулся.

3) *Взаимодействие наэлектризованных тел, помещённых в диэлектрике.*

Если два разнородно заряженных проводника помещены в каком-либо диэлектрике, например керосине, масле, расплавленной сере и т. п., то диэлектрик по индукции поляризуется (рис. 22). У поверхности положительно заряженного тела располагаются отрицательные заряды молекулярных диполей диэлектрика, около отрицательно заряженного тела — положительные заряды диполей.

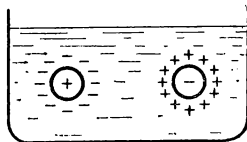


Рис. 22. Поляризация диэлектриков уменьшает силу взаимодействия заряженных тел.

Такое окружение каждого тела разноимёнными зарядами диполей вследствие поляризации диэлектрика должно уменьшать взаимодействие заряженных тел в диэлектрике сравнительно с их взаимодействием в пустоте.

Этой поляризацией и объясняется уменьшение взаимодействия тех же зарядов в диэлектрике сравнительно с их взаимодействием в пустоте, т. е. появление делителя в формуле Кулона, который характеризует электрические свойства диэлектрика.

4) *Роль острия на проводнике при индукции.* Если на неза-  
 ряженном проводнике, который подвергается индукции, имеется  
 остриё, обращённое в сто-

рону влияющего тела, то  
 разноимённый заряд, обра-  
 зующийся на острие, не  
 может на нём сохраниться  
 вследствие большой плот-  
 ности заряда. Заряд как бы  
 стекает с острия (рис. 23),  
 притягивается к влияю-  
 щему телу и нейтрализует  
 соответствующую часть  
 его заряда. В результате  
 влияющее тело постепен-  
 но теряет заряд, а тело  
 с остриём заряжается за-  
 рядом того же знака.

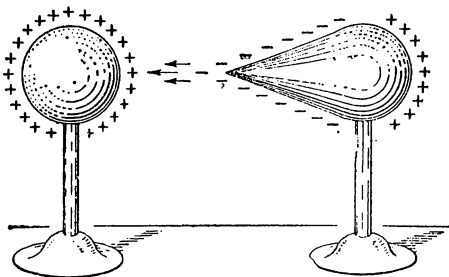


Рис. 23. Остриё на изолированной под-  
 ставке разряжает поднесённый к нему  
 на изолированной подставке заряженный  
 проводник.

Если тело с остриём соединено с землёй, то его заряд (од-  
 ноимённый по сравнению с зарядом влияющего тела) уходит  
 в землю и действие тела с остриём сводится только к одному—  
 разряжать соседние заряженные проводники <sup>1)</sup>.

5) *Значение громоотвода.* Громоотвод <sup>2)</sup> представляет собой  
 остриё, высоко поднятое над зданием, соединённое хорошо про-  
 водящим металлическим проводником с водоносными или влаж-  
 ными слоями земли. Согласно предыдущему разъяснению роли  
 острия, соединённого с землёй, громоотвод разряжает проходя-  
 щие над ним заряженные облака.

<sup>1)</sup> Здесь дано внешнее описание явления. На самом деле, к острию  
 притягиваются возникающие в воздухе под влиянием заряда на острие  
 противоположно заряженные мельчайшие частицы (§ 100), которые  
 нейтрализуют заряд острия; другие же одинаково с остриём заряжен-  
 ные частицы притягиваются к влияющему телу и нейтрализуют его  
 заряд.

<sup>2)</sup> Громоотвод — исторически возникшее неправильное назва-  
 ние, следовало бы назвать „молниесотвод“.

Электрические явления в атмосфере изучал и дал им объяснение М. В. Ломоносов совместно с Г. В. Рихманом, погибшим от удара молнии во время одного из наблюдений грозного разряда.

**22. Электрофор.** На явлении индукции основано устройство прибора, который после однократного сообщения ему заряда может долгое время давать заряды.

Прибор изобретён Вольта и называется электрофором. Электрофор состоит из непроводящего круга (эбонит, смола, сера и т. п.), на который накладывается низкий полый металлический диск с изолирующей ручкой (рис. 24).

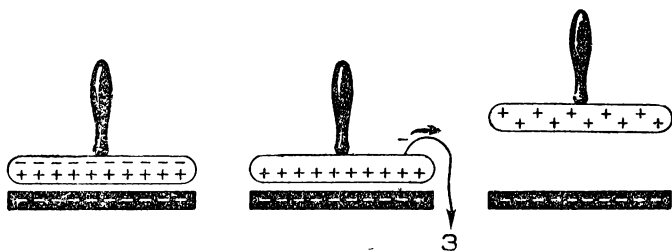


Рис. 24. Схема действия электрофора Вольта.

Натирая мехом или сукном нижний круг — изолятор, электризуют его отрицательно. На него накладывается металлический диск с изолирующей ручкой. Вследствие шероховатости поверхностей металлический диск только в очень немногих точках соприкасается с изолятором; в остальных точках диск отделён от изолятора воздушным промежутком. По индукции на нижней поверхности диска наводится заряд, разноимённый с влияющим, — положительный; на верхней поверхности — одноимённый — отрицательный. Прикоснувшись на мгновение пальцем к металлу, отводят одноимённый заряд в землю; подняв диск, получают на нём заряд, которым можно воспользоваться для электризации других тел.

Помещая опять проводник на изолирующий круг и повторяя те же операции, можно многократно получать заряды на проводящем диске, несмотря на то, что изолятору заряд был сообщён только один раз.

При каждом разъединении проводника и изолятора приходится затрачивать работу на разъединение притягивающихся разноимённых зарядов. За счёт затрачиваемой на это разъединение механической энергии и возникает потенциальная электрическая энергия проводника.

**23. Электрическая машина.** По принципу электрофора построена машина для непрерывного получения зарядов — так называемая электрофорная машина Уимшерста (рис. 25а).

Она состоит из двух непроводящих дисков, вращаемых одной рукояткой в противоположных направлениях. На наружные стороны каждого диска наклеено большое количество полосок из оловянной фольги. С каждой стороны на ось вращения надет металлический пружинный шарик, несущий на обих концах металлические кисточки, касающиеся оловянных наклеек. На концах горизонтального диаметра оба круга охватываются двумя гребёнками; каждая гребёнка соединена с отдельным передвижным проводником, оканчивающимся разрядным шариком. Эти последние (при помощи изолирующих ручек) могут сдвигаться на большее или меньшее расстояние.

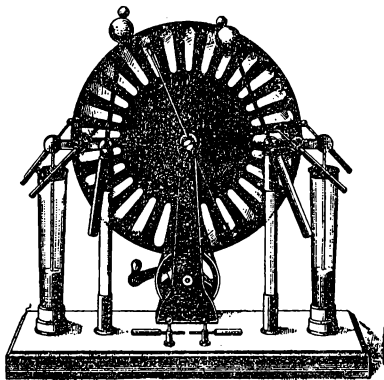


Рис. 25а. Электрофорная машина Уимшерста.

На рисунке 25б диски и наклейки представлены в сечении: первые — в виде кругов, вторые — в виде прямоугольников. Диск, имеющий станиоловые наклейки  $A_1, A_2$ , вращается по часовой стрелке, второй

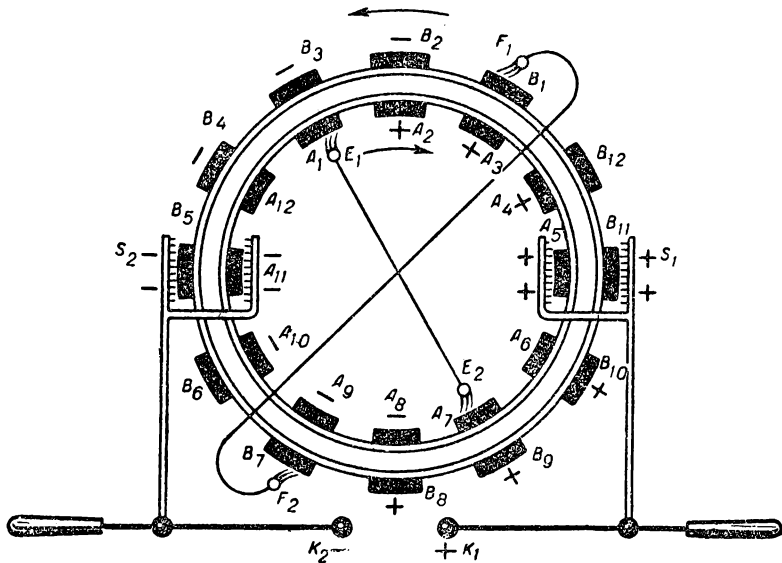


Рис. 25б.

диск с наклейками  $B_1, B_2$  вращается против часовой стрелки,  $E_1, E_2$  и  $F_1, F_2$  — металлические кисточки, соединённые с землёй через проводники, расположенные параллельно диаметру кругов и надётые на ось вращения машины;  $S_1$  и  $S_2$  — гребёнки, соединённые с разрядными шариками  $K_1$  и  $K_2$ .

Допустим, что  $B_1$ , благодаря трению о кисточку  $F_1$ , получила малый отрицательный заряд. При вращении круга против часовой стрелки  $B_1$  постепенно займёт положение  $B_2$  и  $B_3$ . Здесь она находится против соединённой с землёй наклейки  $A_1$ , на которой через влияние собирается положительный заряд. При вращении внутреннего круга по часовой стрелке заряд, возникший в  $A_1$ , постепенно займёт положение  $A_2$  и  $A_3$ ; в  $A_3$  в противоположной наклейке внешнего цилиндра он снова возбуждает отрицательный заряд.

Возбуждённый через влияние на внешней наклейке отрицательный заряд передвигается, как и первый заряд, из положения  $B_1$  в положение  $B_2$  и  $B_3$  и снова возбуждает здесь через влияние на внутренней наклейке положительный заряд. Таким образом, на внешних наклейках около  $F$  непрерывно образуется отрицательное электричество и уносится налево, в то же время на внутренних наклейках около  $E$  всё время возбуждаются посредством влияния положительные заряды и уносятся вправо.

При дальнейшем движении положительные заряды внутренних наклеек заряжают по индукции и по свойству острий гребёнку  $S_1$ , а через неё и разрядный шарик  $K_1$ .

Отрицательные заряды внешних наклеек таким же способом заряжают отрицательным электричеством гребёнку  $S_2$  и шарик  $K_2$ .

Между  $K_1$  и  $K_2$  при достаточной разности потенциалов может проскочить искра.

Нижняя половина кругов действует так же, как и верхняя половина. На  $A_7$  образуются около  $E_2$  отрицательные, а на  $B_7$  около  $F_2$  — положительные заряды, которые через гребёнки подводятся к разрядным шарикам.

Затрата механической работы при вращении идёт на то, чтобы довести потенциал после прохождения накладок у  $B_1B_7$  и  $A_1A_7$  до более высокого значения, при котором заряды около  $S_1$  и  $S_2$  смогут перейти на острия.

Этими зарядами можно пользоваться для разных экспериментальных или технических (например медицинских) целей.

Откуда же берётся первоначальный заряд наклейки?

Для начала достаточно малейших следов заряда от предыдущего заряжения, чтобы в дальнейшем шло постепенное усиление этого заряда. Таким образом, машина действует как с а м о з а р я ж а ю щ а я с я.

Машина Ван дер Графа. Машина Ван дер Графа основана на том явлении, что заряженное тело, прикасаясь к внутренней поверхности полого проводника, полностью отдаёт ему весь свой заряд. Схема устройства этой машины представлена в сечении на чертеже

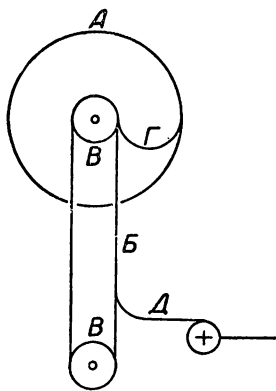


Рис. 25в.



25в. Окружность  $A$  представляет сечение полого изолированного от земли металлического шара. Через узкие щели в него входит бесконечная лента  $B$ , вращающаяся на двух роликах  $B, B$ . Вне шара лента  $B$  через проводник  $D$  заряжается от одного кондуктора электростатической машины до напряжения около 50 000 в. Другой кондуктор машины отведён к земле. Входя внутрь шара, заряженные части ленты через проводник  $G$  полностью отдают ему свой заряд. Вследствие этого заряд шара и его потенциал относительно земли непрерывно увеличиваются, и потенциал может достигнуть нескольких миллионов вольт. Такая машина применяется в опытах по расщеплению атомных ядер.

**23а. Пьезоэлектричество. Пироэлектричество.** Кристаллы некоторых диэлектриков электризуются, когда они подвергаются механическим деформациям: сжатию или растяжению. На противоположных гранях кристалла возникают при деформации разноимённые заряды. Знаки зарядов изменяются, если растяжение заменяется сжатием и наоборот.

Такое явление называется пьезоэлектрическим <sup>1)</sup>.

Пьезоэлектричество объясняется возникновением поляризации кристаллического диэлектрика при механическом воздействии на него.

В наибольшей степени явление пьезоэлектричества наблюдается на кристаллах кварца, сахара, цинковой обманки, сегнетовой соли.

Если подвести к противоположным граням кварцевой пластинки (или другой подобной) противоположные заряды, то наблюдается обратный эффект: пластинка деформируется по своей толщине. Если соединить такой пьезокварц с полюсами источника переменного тока, то он приходит в колебание вдоль своей толщины.

Наконец, возможна электризация кристаллов диэлектриков через нагревание или охлаждение их. В первом и втором случае на одних и тех же концах кристалла возникают заряды противоположных знаков.

Электричество, получаемое на кристаллах диэлектрика при изменении его температуры, называется пироэлектрическим <sup>2)</sup>.

Пироэлектричество есть разновидность пьезоэлектричества: при неравномерном нагревании кристалла внутри него возникают упругие натяжения, которые соответствуют одностороннему внешнему давлению. Вследствие этого также происходит поляризация диэлектрика.

---

<sup>1)</sup> *Пьезо* — греческое слово — значит давл ю.

<sup>2)</sup> *Пюр* по-гречески — ог о нь.

**24. Электроёмкость.** Будем заряжать различные проводники, весьма удалённые от всех других тел, одним и тем же количеством электричества (например, от электрофора) и будем измерять их потенциалы. Электромметр покажет, что потенциалы их будут различны. Чтобы довести разные проводники до одного и того же потенциала, потребуются разные количества электричества. Для характеристики этого свойства различных проводников вводится особая величина, называемая электроёмкостью. *Электроёмкость проводника измеряется величиною заряда, который изменяет потенциал проводника на единицу.*

Если обозначить заряд проводника через  $q$ , его потенциал через  $V$  и электроёмкость через  $C$ , то на каждую единицу потенциала придётся заряд  $\frac{q}{V}$ , и тогда по определению ёмкости:

$$\boxed{C = \frac{q}{V}} \quad q = CV \quad \text{и} \quad V = \frac{q}{C}. \quad (IV)$$

*Электроёмкость проводника зависит от формы и размеров проводника.* Сплошной и полый проводники одного размера и одной формы имеют одинаковую электроёмкость. Отсюда видно, что масса проводника не влияет на его электроёмкость. Проводники одной формы и размера, но из разного вещества также имеют одинаковую электроёмкость. Таким образом, последняя не зависит и от вещества проводника.

**25. Единица электроёмкости.** Чтобы вывести единицу электроёмкости в системе  $CGSE$ , надо в предыдущей формуле принять  $q$  равным единице заряда  $CGSE$ ,  $V$  — равным единице потенциала  $CGSE$ , тогда единица ёмкости равна:

$$\frac{\text{единица заряда } CGSE}{\text{единица потенц. } CGSE}.$$

Следовательно, *за электростатическую единицу ёмкости принимается ёмкость такого проводника, на котором заряд в 1  $CGSE$  изменяет потенциал на 1  $CGSE$ .*

Таким проводником является шарик с радиусом в 1 см. Единица ёмкости в системе  $CGSE$  имеет наименование „сантиметр“.

Чтобы установить единицу электроёмкости в практической системе единиц, надо положить  $q = 1$  кулону,  $V = 1$  вольту, тогда:

$$C = \frac{1 \text{ кулон}}{1 \text{ вольт}} = 1 \text{ кулон/вольт.}$$

Эта единица называется фарадой.

Следовательно, за *практическую единицу ёмкости, называемую фарадой*, принимается ёмкость такого проводника, на котором заряд в 1 кулон изменяет потенциал на 1 вольт.

Так как фарада очень крупная единица, обыкновенно измерение ёмкости производят в миллионных долях фарады; миллионная доля фарады называется микрофарадой.

Для сравнения фарады с единицей ёмкости CGSE надо кулон и вольт заменить через единицу CGSE.

$$\text{Фарада} = \frac{\text{кулон}}{\text{вольт}} = \frac{3 \cdot 10^9 \text{ CGSE}}{\frac{1}{300} \text{ CGSE}} = 9 \cdot 10^{11} \text{ CGSE} = 9 \cdot 10^{11} \text{ см.}$$

Микрофарада равна  $9 \cdot 10^5 \text{ см.}$

**26. Зависимость электроёмкости проводника от соседства других проводников.** Заменяем шарик электроскопа круглой металлической пластинкой и зарядим электроскоп до некоторого положительного потенциала, измеряемого углом расхождения листочков.

Поднесём к электроскопу другую круглую металлическую пластинку, соединённую с землёй. Листочки электроскопа опадают и притом тем больше, чем ближе подносится отведённый к земле проводник (рис. 26). Опадание листочков указывает на уменьшение потенциала. Заряд электроскопа остаётся неизменным.

Уменьшение потенциала при неизменном заряде указывает на увеличение ёмкости, как это видно из формулы (IV).

Если держать проводник на близком расстоянии от электроскопа, вставляя в воздушный промежуток между кругами пластины парафина, эбонита, стекла, слюды, то листочки опадают сильнее; следовательно, общая ёмкость электроскопа и пластины каждый раз возрастает.

Из этого опыта видно, что *электроёмкость проводника зависит не только от самого проводника, но и от близких к нему других проводников, в особенности соединённых с землёй, и от свойств окружающего диэлектрика.*

Изменение ёмкости проводника объясняется явлением индукции на окружающих проводниках.

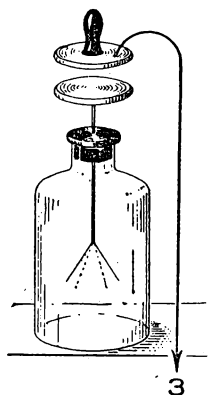


Рис. 26. Изменение ёмкости электроскопа при приближении к нему отведённого к земле металлического круга.

Если даже окружающие рассматриваемый проводник тела и не были предварительно заряжены, то при его зарядении и они заряжаются через влияние и изменяют его потенциал. Но и в этом случае изменение потенциала остаётся пропорциональным изменению заряда, поэтому данное выше определение ёмкости остаётся правильным. Практически можно осуществить систему проводников, ёмкость которых не зависит от окружающих тел. Такими системами являются конденсаторы.

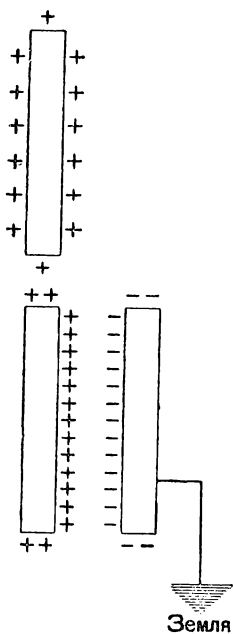


Рис. 27.

Если зарядить электричеством изолированную пластинку, то заряд на обеих её поверхностях распределяется равномерно (рис. 27).

Когда же к ней подносится другая, отведённая к земле пластинка, то заряд первой и индуктированный заряд второй как разноимённые притягиваются и собираются на внутренних сторонах обеих пластинок. Соединение с землёй нужно для того, чтобы отвести противоположный заряд данной пластинки в землю. Присутствие индуктированного разноимённого заряда и понижает потенциал первого проводника.

**27. Конденсатор.** Приближая к изолированной пластинке другую, отведённую к земле, можно, как мы видели, увеличить ёмкость первой; она теперь может вместить при том же потенциале большее

количество электричества. Поэтому совокупность двух проводников, разделённых диэлектриком, из которых один изолирован, а другой соединён с землёй<sup>1)</sup>, называется конденсатором<sup>2)</sup>, или сгустителем.

Одно из назначений<sup>3)</sup> конденсатора — собирать на изолированной пластинке при данном потенциале большие заряды, чем можно было бы получить на ней одной в отсутствии второй пластинки.

<sup>1)</sup> Соединение с землёй не является обязательным во всех случаях применения конденсатора.

<sup>2)</sup> От латинского слова *condensare* (конденсаре) — сгущать.

<sup>3)</sup> Другое применение конденсаторы находят в технике переменного тока (§ 136).

Конденсаторы в зависимости от своего устройства разделяются на несколько видов; наиболее употребительны плоские и цилиндрические.

Плоский конденсатор состоит из двух пластинок, разделённых диэлектриком. Его вид и схема заряжения представлены на рисунке 27.

Теория даёт следующую формулу для ёмкости плоского конденсатора. Если обозначить площадь пластинки через  $S$  см<sup>2</sup>, расстояние между пластинками — через  $l$  см, диэлектрическую проницаемость диэлектрика — через  $\epsilon$  и ёмкость конденсатора — через  $C$ , то:

$$C = \frac{\epsilon S}{4\pi l}.$$

Отсюда видно, что ёмкость плоского конденсатора: 1) прямо пропорциональна площади пластинок, 2) обратно пропорциональна расстоянию между ними и 3) прямо пропорциональна диэлектрической проницаемости.

Другой вид часто применяемых конденсаторов — лейденская банка <sup>1)</sup>,

Её внешний вид и схема заряжения даны на рисунках 28, а и 28, б.

Лейденская банка состоит из стеклянного цилиндра (или усечённого конуса), оклеенного изнутри и снаружи станиолом. Эти листы станиоля называются обкладками банки. Внутренняя обкладка соединена со стержнем, выдающимся наружу и заканчивающимся шариком. При заряжении банки прикасаются заряженным телом к стержню, в то время как наружная обкладка соединена с землёй.

Для приближённого вычисления ёмкости лейденской банки можно пользоваться формулой плоского конденсатора.

Если взять какой-либо конденсатор один раз с воздушным промежутком (точнее, образовать между обкладками пустоту), а другой раз заполнить промежуток каким-либо диэлектриком, то отношение ёмкости конденсатора  $C = \frac{\epsilon S}{4\pi l}$ , в случае если промежуток между пластинами заполнен диэлектриком, к ёмкости

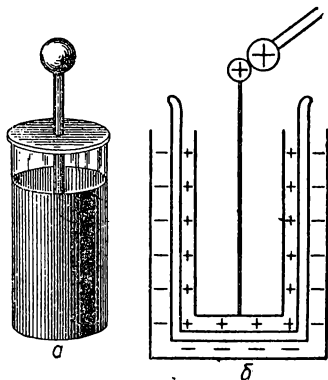


Рис. 28. Лейденская банка.

<sup>1)</sup> По названию города Лейдена, в котором она была впервые изготовлена.

$C_0 = \frac{S}{4\pi l}$  в случае безвоздушного пространства выразится так:

$$\frac{C}{C_0} = \epsilon,$$

где  $\epsilon$  — диэлектрическая проницаемость.

Это соотношение позволяет измерять диэлектрическую проницаемость различных веществ в твёрдом, жидком и газообразном состоянии.

Чтобы разрядить конденсатор, пользуются так называемым разрядником — дугообразным проводником с изолирующей ручкой.

Для разряда конденсатора один конец разрядника присоединяют к наружной обкладке, а другой — приближают к внутренней (рис. 29). На некотором расстоянии между разрядником и обкладкой

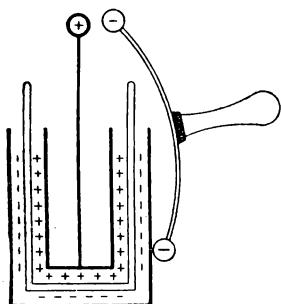


Рис. 29. Схема разрядения лейденской банки при помощи разрядника.

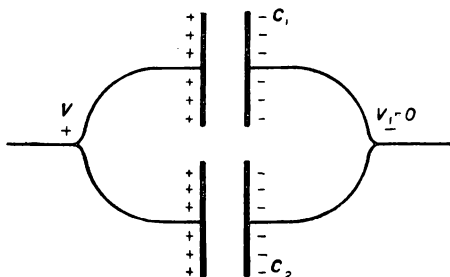


Рис. 30. Схема параллельного соединения двух конденсаторов.

проскакивает искра (причину образования искры см. § 103), и конденсатор разряжается.

**28. Батарея конденсаторов.** Даже большие лейденские банки из тонкого стекла высотой в 40 см и диаметром в 15 см имеют ёмкость около 0,001 микрофаряды. Для получения больших ёмкостей соединяют несколько отдельных банок. Соединение нескольких конденсаторов называется батареей конденсаторов. Обыкновенно соединяют между собой отдельно все внешние обкладки и отдельно все внутренние обкладки. Такое соединение называется параллельным соединением.

Рассмотрим схему параллельного соединения двух конденсаторов (рис. 30). Если внешние обкладки соединены с землёй, то потенциалы обеих внешних обкладок, соединённых между собой, одинаковы и равны нулю. Так же одинаковы потенциалы  $V$  обеих внутренних обкладок.

Тогда заряд первого конденсатора  $q_1 = C_1 V$ , а заряд второго  $q_2 = C_2 V$ . Полный заряд батареи  $Q = q_1 + q_2 = (C_1 + C_2) V$ , где  $C_1$  и  $C_2$  — ёмкости отдельных конденсаторов. Обозначая ёмкость батареи через  $C$ , можем написать по основной формуле  $Q = CV$ . Сравнивая обе предыдущие формулы, получаем:

$$C = C_1 + C_2. \quad (V)$$

При параллельном соединении конденсаторов ёмкость батареи равна сумме ёмкостей всех конденсаторов.

Батарея конденсаторов очень просто устраивается, занимает мало места и потому часто употребляется в технике, в частности в радиотехнике (рис. 31). Батарея таких

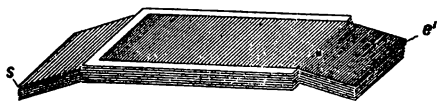


Рис. 31. Батарея плоских конденсаторов.

конденсаторов состоит из листочков станноля, проложенных парафинированной бумагой. Все нечётные листы ( $s$ ) соединяются между собой и образуют одну обкладку, все чётные ( $e$ ) соединяются между собой, образуя другую обкладку. Батареи конденсаторов при малом объёме могут иметь ёмкость в несколько десятков микрофард<sup>1)</sup>.

Батарея конденсаторов переменной ёмкости. В научных исследованиях и в технике, в особенности в радиотехнике, требуется такая конструкция батареи конденсаторов, чтобы можно было по желанию непрерывно менять ёмкость батареи. С этой целью батарею придают особое устройство (рис. 32 и рис. 182а).

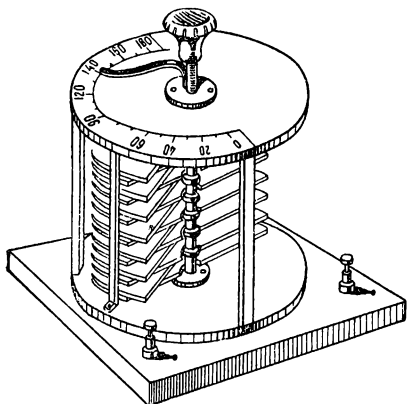


Рис. 32. Конденсатор переменной ёмкости.

<sup>1)</sup> Вместо парафинированной бумаги употребляют и другие диэлектрики, например слюду, миканит (смесь слюды с шеллаком), которые при той же толщине выдерживают без пробоя большие разности потенциалов. Так, пробой начинается при толщине в 1 см: для слюды — при 600 000 вольт, для миканита — при 350 000, для парафина — 300 000, для эбонита — при 100 000 вольт.

Одни пластины — нечётные — закрепляются неподвижно, чётные — укрепляются на оси. Чётные пластины могут вдвигаться в большей или меньшей степени в промежуток между неподвижными пластинами. От этого изменяется площадь каждого из конденсаторов, входящих в состав батареи, и, следовательно, их ёмкость. Вдвигание подвижных пластинок увеличивает ёмкость батарей.

**29. Градуирование электрометра.** На взаимодействии зарядов в плоском конденсаторе основано измерение разности потенциалов в абсолютных единицах.

Кружок *B*, вырезанный из одной пластины конденсатора, привешен к крючку коромысла весов (рис. 33).

Кружок *B* и оставшаяся после вырезания кружка часть верхней пластинки, образующая кольцо, и весы соединены с землёй, а нижняя

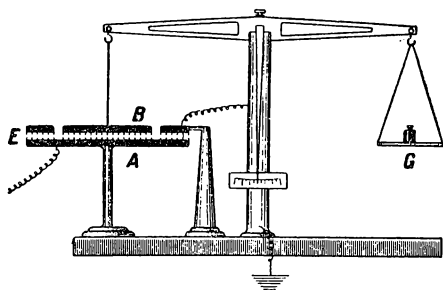


Рис. 33. Абсолютный электрометр.

пластинка соединена с проводником, потенциал которого надо измерить. Заряженная нижняя пластинка притягивает к себе кружок *B*. Для восстановления его прежнего положения на другую чашку весов кладут соответствующие разновески. Вес разновески *G* измеряет силу притяжения кружка *B*. Эта сила притяжения зависит от ёмкости конденсатора, потенциала кружка и расстояния между пластинками *A* и *B*. Следовательно, измерив силу притяжения,

зная ёмкость и расстояние между пластинками, можно вычислить потенциал. При помощи таких весов, называемых абсолютным электрометром, может быть измерен потенциал любого проводника.

Абсолютным электрометром можно воспользоваться для градуирования таких электрометров, у которых по показанию стрелки можно сразу сделать отсчёт потенциала.

#### Упражнение 4.

1. Почему притяжение лёгких тел к наэлектризованному телу происходит лучше, когда лёгкие тела лежат на подставке, отведённой к земле?

2. Почему при измерении потенциала необходимо соединять проводник с электроскопом длинной проволокой?

3. Чему равна ёмкость плоского конденсатора размером в  $5 \text{ см} \times 3 \text{ см}$  с изолирующим слоем толщиной в  $0,2 \text{ мм}$  из парафина (слюды или воздуха)?

*Отв.* Для воздуха  $6,6 \cdot 10^{-5}$  микрофарды.

4. Вычислить ёмкость лейденской банки диаметром в  $15 \text{ см}$  и с высотой обкладок в  $25 \text{ см}$ , толщина стекла  $5 \text{ мм}$ ; для стекла  $\epsilon = 5$ .

*Отв.*  $937,5$  ед. ёмк. CGSE.

5. Сколько таких банок (задача 4) надо соединить параллельно, чтобы получить ёмкость в  $0,01$  микрофарды?

*Отв.* 9.



6. Батарея из плоских конденсаторов имеет размер: длина 5 см, ширина 5 см, высота 3 см, толщина листка станиоля 0,001 см, толщина пропарафиненной бумаги 0,002 см. Какова ёмкость батареи?

7. Эталон в 1 микрофараду делается из тонких листочков станиоля, прослоенных листочками слюды толщиной в 0,1 мм. Чему должна быть равна поверхность такого конденсатора?

8. Указать признаки сходства и различия между электроёмкостью и теплоёмкостью.

9. Если имеется положительно заряженный изолированный проводник, то каким способом можно зарядить два изолированных шара с помощью этого проводника, не уменьшая его заряда, причём на одном шаре получить положительный заряд, а на другом отрицательный?

10. Два проводника имеют одинаковые размеры, причём один из них полый, а другой — сплошной. Если сообщить каждому из этих проводников одинаковый заряд, то будут ли потенциалы их одинаковы?

### ВОПРОСЫ.

1. Что называется электризацией тела?
2. Какими способами можно наэлектризовать тело?
3. Что называется проводником и непроводником электричества?
4. Как электризуются оба натираемые тела?
5. В чём состоит закон Кулона?
6. Что называется диэлектрической проницаемостью вещества?
7. Как выбрана электростатическая единица *CGS* количества электричества?
8. Какое соотношение между кулоном и электростатической единицей количества электричества?
9. Как распределяется электричество по непроводнику и проводнику?
10. Что называется объёмной плотностью электричества?
11. Что называется поверхностной плотностью?
12. Что называется напряжённостью поля?
13. Какова формула напряжённости поля?
14. Что называется силовыми линиями электрического поля?
15. Что такое потенциал?
16. Чему равняется работа по перемещению заряда в поле?
17. Что называется эквипотенциальной поверхностью?
18. Что представляют собой эквипотенциальные поверхности поля, образованного одним точечным зарядом?
19. Как выбрана единица потенциала в системе *CGS*?
20. Какое соотношение между вольтom и единицей потенциала в системе *CGS*?
21. Как измеряется работа по перемещению заряда между двумя эквипотенциальными поверхностями? Зависит ли эта работа от формы пути между ними?
22. Что представляет собой поверхность заряженного проводника по отношению к его потенциалу?
23. Что называется электрометром?
24. Что принимается за нулевой потенциал?
25. От чего зависит направление движения электричества между двумя проводниками?
26. Что называется напряжением?

27. Что называется электроёмкостью проводника?
28. Как выбрана единица электроёмкости в системе  $CGS$ ?
29. Какое соотношение между практической единицей электроёмкости и единицей электроёмкости в системе  $CGS$ ?
30. В чём состоит явление электростатической индукции?
31. Как зарядить электроскоп через индукцию и каков его заряд сравнительно с зарядом влияющего тела?
32. Изолированный заряженный проводник подносится к другому изолированному проводнику с остриём на стороне, обращённой к первому проводнику. Что получится на втором проводнике в результате индукции и влияния острия?
33. Ответить на вопрос 32 для того случая, когда проводник имеет остриё на противоположной стороне.
34. Почему лёгкие тела сперва притягиваются к наэлектризованному телу, а потом отталкиваются от него?
35. Что такое электрофор и как можно от него получать заряды?
36. Как устроена и как действует электрофорная машина?
37. Что называется конденсатором и от чего зависит его ёмкость?
38. Что называется батареей конденсаторов?
39. Чему равна ёмкость батареи при параллельном соединении конденсаторов?
40. Каково назначение конденсатора?

## II. ЗАКОНЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА.

**30. Понятие об электрическом токе.** Если соединить заряженный проводник с землёй, то его электрическое состояние ис-

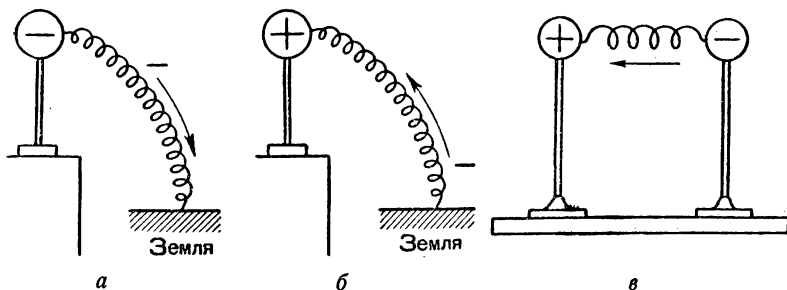


Рис. 34.

чезает. Если с землёй соединить проволокой отрицательно заряженный проводник (рис. 34, а), то электроны, находящиеся на проводнике в избытке, вследствие взаимного отталкивания начинают размещаться по всем соединённым между собой проводникам: на данном заряженном проводнике, на проводе, соединяющем его с землёй, и на земле. Но так как электроёмкость земли неизмеримо велика сравнительно с электроёмкостью других проводников, то в действительности весь избыток отри-

цательного заряда уходит в землю и проводник оказывается нейтральным. Если же с землёй соединяется проводом положительно заряженный проводник (рис. 34, б), то свободные электроны земли, притягиваясь зарядом проводника, переходят на него по соединительному проводу и нейтрализуют его. Подобное же перемещение электронов происходит при соединении одного заряженного проводника с другим (рис. 34, в).

Во всех разобранных случаях между проводниками и в соединительном проводе существовало электрическое поле. Таким образом, и здесь движение зарядов происходило в электрическом поле.

Направленное перемещение электрических зарядов в электрическом поле называется электрическим током.

Электрический ток в металлах создаётся движущимися по одному направлению электронами. Далее мы увидим, что в прочих проводниках и полупроводниках электрический ток может создаваться движением не только электронов, но и других заряженных частиц как несущих положительный заряд, так и несущих отрицательный заряд.

Основным необходимым условием существования электрического тока является наличие в проводнике электрического поля, о существовании же в проводнике электрического поля можно судить по наличию разности потенциалов.

Перемещение электрических зарядов в проводнике продолжается до тех пор, пока в нём не исчезнет электрическое поле, т. е. пока не выравняются потенциалы.

Если непрерывно восстанавливать эту разность потенциалов, то ток будет существовать длительное время.

Такое непрерывное восстановление разности потенциалов на концах проводника можно, например, осуществить, если соединить их с двумя непрерывно натираемыми телами.

Сообщим электростатическими способами, например при помощи электрофорной машины, одному проводнику положительный заряд, другому — отрицательный, соединим их полупроводником — длинной влажной бечёвкой (рис. 35) — и будем поддерживать между этими проводниками неизменную разность потенциалов. Тогда можно наблюдать непрерывное изменение потенциала вдоль цепи тока. Привесив бумажные электроскопы в разных местах цепи, можно видеть, что у положительно заряженного проводника расхождение листочков наибольшее, затем угол между листочками постепенно уменьшается, посередине цепи обращается в нуль, и затем опять начинает расти к отрицательно заряженному проводнику. Испытание положительно заряженной палочкой по-

казывает, что в первой части цепи потенциалы положительны, во второй — отрицательны.

Потенциал в каждой точке проводника можно измерить электрометром, если соединить его тонкой проволокой с исследуемой точкой проводника, а оболочку электрометра соединить с землёй.

Разность потенциалов в двух точках цепи можно измерить, если электрометр соединить с одной точкой цепи, а оболочку — с другой.

Таким образом, на всём протяжении цепи происходит непрерывное падение потенциала от наибольшего его значения до наименьшего. *Между концами любого участка цепи существует разность потенциалов, которая называется напряжением на этом участке цепи.*

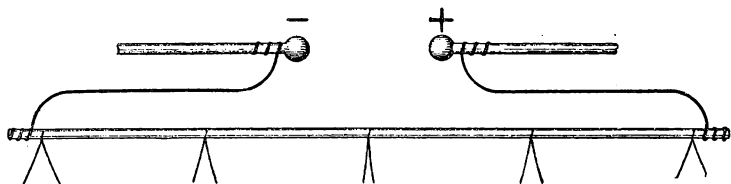


Рис. 35. Изменение потенциала вдоль цепи.

Разность потенциалов между концами участка, или, что то же самое, напряжение на этом участке, всегда численно равняется той работе, которая совершается источником тока для продвижения единицы количества электричества на рассматриваемом участке цепи.

Помимо трения и электростатической индукции существует ещё химический способ разделения электрических зарядов. Приборы, позволяющие непрерывно поддерживать разность потенциалов химическим способом, называются химическими генераторами<sup>1)</sup>, или гальваническими<sup>2)</sup> элементами. Их устройство рассматривается в последующих параграфах.

Кроме того, из начального курса известно, что в качестве источников тока применяются ещё динамомашинны.

**31. Химический способ электризации.** В 1800 г. Вольта (1745—1827) открыл, что можно получить разнородные элек-

<sup>1)</sup> Генератор — производитель.

<sup>2)</sup> По имени итальянского врача Гальвани (1737—1798), обратившего первым внимание на те явления, которые лежат в основе устройства элементов. Правильнее было бы присвоить им наименование „вольтаических“ в честь Вольта — изобретателя первого элемента.

трические заряды на двух пластинках разных металлов, если поместить их в раствор кислоты или соли. Явление химической электризации объясняется в настоящее время на основании электронной теории вещества.

По современным взглядам во всяком растворе, проводящем электричество, почти все молекулы растворимого вещества при самом растворении распадаются на две части (рис. 36). Обе эти

части оказываются не нейтральными, но несут на себе равные и разноимённые электрические заряды. Одна из частиц молекулы (состоящая из атомов водорода, металла или из группы  $\text{NH}_4$  и др.) при распаде теряет часть электронов и становится положительно заряженной; другая частица получает избыток электронов и оказывается заряженной

таким же количеством отрицательного электричества. Атом или группа атомов, несущая на себе электрический заряд, называется ионом<sup>1)</sup>. Распадение молекулы на ионы при растворении называется электролитической диссоциацией<sup>2)</sup>.

В растворе одновременно присутствуют и ионы, и целые молекулы, которые находятся в тепловом движении.

В растворе одновременно происходят два противоположных процесса. Противоположно заряженные равными количествами электричества ионы могут притягиваться и восстанавливаться в нейтральные молекулы (явление, называемое мо л и з а ц и е й). В то же время другие нейтральные молекулы ионизируются.

Высокая степень диссоциации в воде солей, кислот и щелочей объясняется большой диэлектрической проницаемостью воды, равной приблизительно 80. Силы электрического взаимодействия, по закону Кулона, между разнородно заряженными частями молекулы в воде в 80 раз слабее (§ 6), чем в воздухе (пустоте).

Поэтому уже теплового движения молекул воды достаточно, чтобы вызвать распад молекул растворённого вещества на ионы.

Условимся изображать избыток одного электрона (один элементарный отрицательный заряд) через одну чёрточку ( $\text{Cl}'$ ),

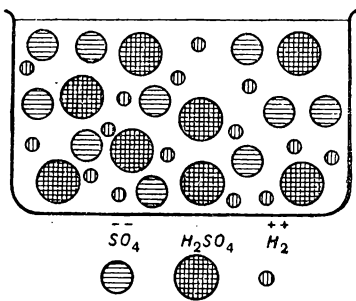


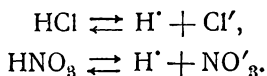
Рис. 36. Схема электролитической диссоциации.

<sup>1)</sup> *Ион* — греческое слово, обозначает идущий.

<sup>2)</sup> *Диссоциация* — латинское слово, обозначает разъединение.

двух электронов — двумя чёрточками ( $O''$ ), недостаток одного электрона (один элементарный положительный заряд) — точкою наверху ( $Na'$ ), недостаток двух электронов — двумя точками наверху ( $Ca''$ ); процесс ионизации и молизации обозначим значком  $\rightleftharpoons$ .

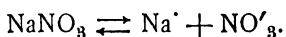
Кислоты диссоциируют на ионы водорода и ионы кислотного остатка:



Щёлочи диссоциируют на ионы металла и ионы водного остатка (гидроксил):

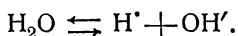


Соли диссоциируют на ионы металла и ионы кислотного остатка:



Ионы отличаются некоторыми своими свойствами от нейтральных атомов; так ион  $Na'$  не соединяется с водой в отличие от атома  $Na$ .

Вода также диссоциирует в ничтожной степени:



При погружении цинковой пластинки в раствор серной кислоты между цинком и раствором возникает особое взаимодействие, вследствие которого атомы цинка переходят в раствор. Но при переходе в раствор атом цинка оставляет на пластинке два электрона и становится *положительным ионом цинка*. *Цинковая пластинка, обогащаясь свободными электронами, ислучает отрицательный заряд.*

*Металл заряжается отрицательно, жидкость — положительно.* Стремление ионов перейти в раствор обнаруживается в так называемой упругости растворения.

Переход совершается до тех пор, пока металлом и раствором не возникнет разность потенциалов, достаточная для того, чтобы воспрепятствовать дальнейшему растворению металла, т. е. уравновесить упругость растворения.

Между металлической пластинкой, опущенной в раствор, и раствором возникает разность потенциалов. Эта разность потенциалов зависит от рода металлов и рода раствора.

**32. Химические источники тока.** Чтобы при помощи химического способа электризации получить источник тока, надо

в раствор кислоты, соли или щёлочи погрузить две разнородные металлические пластинки (одна может быть угольной).

Сосуд, содержащий раствор кислоты и две разнородные металлические пластинки, представляет собой простейший химический источник тока, или элемент (рис. 37).

Если, например, в раствор серной кислоты, куда опущена цинковая пластинка, опустить медную, то медная пластинка имеет сравнительно с цинковой очень слабую упругость растворения; поэтому разность потенциалов между медной пластинкой и раствором меньше, чем между цинковой пластинкой и тем же раствором.

Вследствие этого между цинковой и медной пластинками, опущенными в слабый раствор серной кислоты, будет существовать определённая разность потенциалов. Её можно измерить чувствительным электрометром. Она равна приблизительно 1 вольту.

Медную пластинку, имеющую более высокий потенциал, называют положительным полюсом элемента; цинковую, имеющую более низкий потенциал, называют отрицательным полюсом. Во всех элементах, в которые входит цинк, он является отрицательным полюсом.

Если соединить металлическим проводником цинковую и медную пластинки, то легкоподвижные электроны цинковой пластинки устремляются по проводнику к медной пластинке в сторону большего потенциала. Уход электронов с цинковой пластинки нарушит равновесие, которое до этого существовало между разностью потенциалов цинка и жидкости, с одной стороны, и упругостью растворения цинка — с другой. Начнётся переход в раствор ионов цинка, который и будет восстанавливать нарушенное равновесие.

С другой стороны, притекшие к медной пластинке электроны также будут нарушать равновесие между упругостью растворения меди и разностью потенциалов медь — жидкость (разность потенциалов будет увеличиваться). Для восстановления равновесия электроны медной пластинки будут переходить на положительные ионы, находящиеся в растворе вблизи медной пластинки, нейтрализовать их и превращать в атомы.

Внутри раствора будет происходить движение ионов — положительных в сторону медной пластинки и отрицательных — в сторону цинковой.

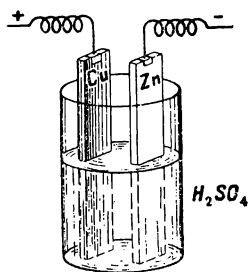


Рис. 37. Элемент Вольта.

Таким образом, во всей замкнутой цепи устанавливается непрерывное направленное движение электрических зарядов, или электрический ток. Ток будет длиться до тех пор, пока будет происходить химический процесс растворения цинка. Ток получается за счёт химической энергии веществ, вступающих в химическое взаимодействие.



Вольта<sup>1)</sup> (1745—1827).

Описанный выше элемент изобретён Вольта. Кроме описанного элемента Вольта, существуют гальванические элементы других систем и вторичные элементы, или так называемые аккумуляторы.

Последние получают запас химической энергии от других генераторов, и только потом, по мере надобности, они превращают эту химическую энергию в электрическую. О них также известно из начального курса; описание их дано в § 94.

Каждый генератор любого типа имеет определённую ЭДС, которая может быть непосредственно измерена определённым прибором.

Приборы для измерения разности потенциалов в цепи электрического тока обыкновенно градуируются на вольты и поэтому

Разность потенциалов на полюсах незамкнутого проводником гальванического элемента измеряет так называемую электродвижущую силу элемента, или сокращённо ЭДС. *Электродвижущая сила источника тока показывает ту работу, которую может затратить источник тока на продвижение в замкнутой цепи каждой единицы количества электричества.*

Описанный выше элемент изобретён Вольта.

Кроме описанного элемента Вольта, существуют гальванические

<sup>1)</sup> Вольта Александр родился в Комо в Италии; с 1779 г. профессор физики в Павии. В 1781 г. он изобрёл соломенный электрометр, в 1782 г. — конденсатор, связанный с электроскопом, электрофор.

Главная заслуга Вольта состоит в том, что он открыл возникновение разности потенциалов при соприкосновении двух металлов. Вольта изобрёл химический источник тока, названный гальваническим элементом вместо более правильного названия „вольтаического“, и построил вольтов столб — батарею значительной электродвижущей силы.



называются вольтметрами. При этих измерениях употребляются вольтметры, устройство которых сходно с устройством амперметров, известных в основных чертах из курса VII класса.

Схематическое изображение вольтметра и способ его включения в цепь даны на рисунке 45.

*ЭДС химического источника тока не зависит от размеров элемента, а зависит только от тех веществ, из которых состоит элемент.*

Если взять ряд химических источников одного и того же устройства, но с пластинами разного размера, с разными расстояниями между пластинами и т. п. и измерить их ЭДС, то они оказываются одинаковыми. Разность потенциалов на полюсах незамкнутого элемента зависит от химических процессов между веществами элемента, а эти процессы не зависят от размеров последнего.

Химический источник тока изображается схематически на чертеже двумя чёрточками (рис. 38): короткой и толстой (+), длинной и тонкой (—).

**33. Электрическая цепь и направление тока.** Совокупность источника тока (генератора), потребителя (приборов, потребляющих ток, например электрических лампочек, электромоторов), подводящих проводов и приборов для включения и выключения тока называется цепью электрического тока. В проводниках надо различать действительное и условное (техническое) направления тока. *Действительным направлением тока в металлах является направление движения электронов.* Электроны движутся по внешнему участку цепи от отрицательного полюса к положительному.

*За техническое направление тока в металлическом проводнике принимается направление по внешнему участку цепи от положительного полюса к отрицательному.*

В растворах солей, кислот и щелочей за техническое направление тока принимают направления движения положительных ионов. Внутри гальванического элемента техническое направление тока совпадает с направлением от отрицательного полюса к положительному.

*Когда в науке или технике говорят о направлении электрического тока, то при этом всегда подразумевается именно техническое направление.*

Такой выбор направления тока явился результатом исторического развития учения об электрическом токе, так как этот выбор был сделан приблизительно за столетие до открытия электронов.



Рис. 38. Схематическое изображение химического источника электрического тока.

Условное, или техническое, направление сохраняется в науке потому, что все законы и правила, связанные с направлением тока и выведенные за время столетнего развития учения о токе, относятся именно к этому первоначально принятому направлению.

Надо помнить, что ни один генератор не создаёт сам электрических зарядов; он только приводит электрические заряды в движение. Подобным образом теплота топки котла водяного отопления только направляет ток воды в определённом направлении.

**34. Сила тока <sup>1)</sup>.** Сила тока измеряется количеством электричества, проходящего через поперечное сечение цепи в одну секунду.

Если обозначить количество прошедшего через сечение цепи электричества через  $Q$ , время прохождения — через  $t$  и силу тока — через  $I$ , то на основании данного выше определения:

$$\boxed{I = \frac{Q}{t};} \quad (VIa)$$

$$\boxed{Q = It.} \quad (VIb)$$

**35. Единица силы тока.** Если в предыдущем равенстве (VIa) принять  $Q = 1$  кулону, время  $t = 1$  секунде, то:

$$I = \frac{1 \text{ кулон}}{1 \text{ сек}} = 1 \text{ амперу.}$$

За единицу силы тока принимается такая сила постоянного тока, при которой через поперечное сечение цепи проходит 1 кулон в 1 секунду.

Эта единица называется *ампёр*, в честь знаменитого французского физика Ампера. Сила тока измеряется приборами, называемыми амперметрами, в общих чертах известными из начального курса; устройство их описано в § 85; включение в цепь схематически изображено на рисунке 45.

**36. Постоянство силы тока во всех сечениях цепи.** Цепь может быть составлена из участков очень разнообразных сечений, например широкая банка гальванического элемента, толстые цилиндрические клеммы, провода, толстый прямоугольный нож рубильника, тончайший волосок лампочки накаливания. Измерительные приборы, включённые в разные участки цепи, показывают, что сила тока через любое сечение данной цепи всегда одна и та

<sup>1)</sup> Слово сила в этом применении оказывается историческим недоразумением. Сила тока не имеет ничего общего с механическим понятием силы.

*же*. Этот результат легко предвидеть. Если бы через какое-нибудь сечение, например при переходе от толстого металлического проводника к тонкому, уходило каждую секунду меньшее количество электричества, чем приходило, то на этой границе получилось бы непрерывное накопление электрических зарядов, чего нигде в цепи не наблюдается. Так и в установившемся водяном или газовом токе через любые сечения труб — широкие и узкие — проходит за единицу времени одинаковое количество вещества.

**37. Сопротивление проводника.** Электрический ток состоит из движущихся электронов в металлах и из движущихся ионов в растворах солей, кислот и щелочей. Принимающие участие в токе электроны перемещаются в металлических проводниках среди атомов, которые сами не имеют поступательного движения, а находятся в колебательном тепловом движении. При своём перемещении электроны взаимодействуют с атомами и другими электронами. При этом электроны теряют часть своей кинетической энергии, они как бы испытывают в цепи тока сопротивление своему движению.

При замыкании одного и того же источника тока различными проводниками мы будем получать в разных цепях различные силы тока. Отсюда мы заключаем, что проводники отличаются друг от друга своими сопротивлениями. Поэтому сопротивление проводника принимается за одну из физических характеристик его.

Для измерения сопротивления различных веществ установлена единица сопротивления, названная *омом* (в честь немецкого физика Ома).

*За единицу сопротивления, называемую 1 омом, принимается в практической системе единиц сопротивление такого стрезка проводника, по которому идёт ток в 1 ампер при напряжении на нём в 1 вольт.*

*За международный ом принимается сопротивление ртутного столба длиной в 106,3 см и сечением в 1 мм<sup>2</sup> при 0°<sup>1</sup>).*

Два проводника считаются имеющими равное сопротивление, если при размещении одного проводника другим сила тока в данной цепи остаётся неизменной. На этом основании оказы-

---

<sup>1</sup>) Собственно международный ом определён в следующих словах: „Международный ом — сопротивление при неизменяющемся электрическом токе и при температуре тающего льда ртутного столба длиной в 106,300 см, имеющего сечение, одинаковое по всей длине, и массу в 14,4521 г.“

Вычисляя по массе ртути, её плотности и длине ртутного столба сечение этого столба, найдём его равным 0,01 см<sup>2</sup>.

вается возможным готовить образцы (эталоны) она не только из ртути, но из разных металлов.

Обыкновенно образцы сопротивления готовятся из манганиновой (84 части Cu; 4 — Ni; 12 — Mn) проволоки, намотанной в форме катушки (рис. 39).

Как можно подобрать путём замещения образец сопротивления в 1 ом, так же можно подобрать сопротивления в 2, 3 и т. д. ома или в  $\frac{1}{2}$ ,  $\frac{1}{4}$ , 0,1, 0,01 и т. д. ома.

**38. Закон сопротивления проводника.** Законы сопротивления проводника выражают зависимость сопротивления проводника от длины его, площади поперечного сечения, температуры и вещества.

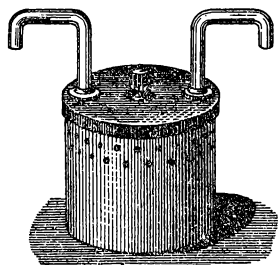


Рис. 39. Эталон сопротивления.

Каждую из этих зависимостей можно найти путём опыта. Для этого надо измерять сопротивления проводников из одного и того же вещества при разных длинах, или при разных поперечных сечениях, или при разных температурах. Также измеряются путём замещения сопротивления проводников из разных веществ при одинаковых длинах, сечениях и температурах. Все такие измерения приводят к следующим выводам:

**Сопротивление проводника:**

*1) прямо пропорционально длине; 2) обратно пропорционально площади поперечного сечения; 3) зависит от вещества проводника; 4) с повышением температуры повышается для металлических проводников, убывает для угля, растворов солей и кислот.*

Для большинства чистых металлов прирост сопротивления при нагревании на  $1^\circ$  составляет около  $0,4\%$  сопротивления при  $20^\circ\text{C}$ . Это число называется температурным коэффициентом сопротивления.

При удачном подборе составных частей можно составить сплавы с ничтожным изменением сопротивления при изменении температуры <sup>1)</sup>. Провода из таких сплавов применяются в тех приборах, где требуется постоянство сопротивления, например в эталонах ома.

<sup>1)</sup> Таковы сплавы: никелин (меди  $54\%$ , никеля  $26\%$ , цинка  $20\%$ ) — температурный коэффициент  $0,02\%$ ; константан (меди  $58\%$ , никеля  $41\%$ , марганца  $1\%$ ) — коэффициент  $0,003\%$ ; манганин (меди  $84\%$ , никеля  $4\%$ , марганца  $12\%$ ) — коэффициент  $0,001\%$ .

Так как исследования показали, что различные вещества при одинаковых условиях обладают различными сопротивлениями, то для сравнения сопротивления различных веществ применяется особая величина, называемая удельным сопротивлением.

**39. Удельное сопротивление вещества.** Удельное сопротивление вещества измеряется сопротивлением проводника из этого вещества длиной в 1 м и площадью поперечного сечения в 1 мм<sup>2</sup>.

Удельное сопротивление обозначается буквою  $\rho$  (греческая буква, произносится ро).

Таблица удельных сопротивлений веществ в  $\frac{\text{ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}}$

Серебро (прокалённое) . . . . .	0,016	Сталь мягкая . . . . .	0,18
Медь (проводниковая) . . . . .	0,0175	Свинец . . . . .	0,21
Алюминий (прокалённый) . . . . .	0,029	Нейзильбер . . . . .	0,3
Вольфрам . . . . .	0,056	Никелин . . . . .	0,4
Цинк (прессованный) . . . . .	0,060	Сталь закалённая . . . . .	0,4
Латунь . . . . .	0,08	Манганин . . . . .	0,43
Платина (прокалённая) . . . . .	0,1	Константан . . . . .	0,5
Никель . . . . .	0,070	Ртуть . . . . .	0,94
Железо (проволочное) . . . . .	0,13	Уголь . . . . .	40—60
10-процентный раствор серной кислоты . . . . .	26 000	Мрамор . . . . .	$4 \cdot 10^{15}$
„ „ едкого калия . . . . .	32 000	Слюда . . . . .	$4 \cdot 10^{17}$
„ „ нашатыря . . . . .	56 000	Стекло . . . . .	$5 \cdot 10^{17}$
„ „ медного купороса . . . . .	313 000	Фарфор . . . . .	$3 \cdot 10^{18}$
Шифер . . . . .	$1 \cdot 10^{12}$	Эбонит . . . . .	$1 \cdot 10^{22}$

**40. Формула сопротивления проводника.** Если обозначить удельное сопротивление через  $\rho$ , длину проводника через  $l$ , площадь поперечного сечения через  $S$  и сопротивление проводника через  $R$ , то на основании § 38 получим:

$$R = \rho \frac{l}{S}. \quad (\text{VIIa})$$

Если длину проводника выразить в метрах, а площадь поперечного сечения его в квадратных миллиметрах, то наименование единицы удельного сопротивления будет:  $\frac{\text{ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}}$ . Так как  $\rho = \frac{RS}{l}$ , то при  $R = 1 \text{ ом}$ ,  $S = 1 \text{ мм}^2$ ,  $l = 1 \text{ м}$  получаем  $\rho = 1 \frac{\text{ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}}$ .

Зависимость сопротивления от температуры можно также выразить формулой. Если обозначить удельное сопротивление через  $\rho$ ,

температурный коэффициент, т. е. приращение каждой единицы удельного сопротивления при нагревании на  $1^\circ$ , через  $\alpha$ , то прирост всего удельного сопротивления при нагревании на  $1^\circ$  выразится через  $\rho\alpha$ ; изменение же удельного сопротивления при нагревании на  $t^\circ$  будет  $\rho\alpha t$  и удельное сопротивление  $\rho_t$  при температуре на  $t^\circ$  выше той, для которой даны табличные значения, будет равно  $\rho_t = \rho + \rho\alpha t = \rho(1 + \alpha t)$ . Отсюда:

$$R_t = \frac{\rho l}{S} (1 + \alpha t). \quad (\text{VII6})$$

Если в цепь включён жидкий проводник, то за его поперечное сечение принимается площадь погружённой части электрода<sup>1)</sup>, при условии, что электроды располагаются достаточно близко друг к другу, а за его длину — расстояние между параллельно поставленными электродами.

Как объяснить зависимость сопротивления от температуры? Если бы атомы металла были расположены на совершенно одинаковых расстояниях друг от друга, то электроны при своём движении по металлу не отклонялись бы от своих направлений и не встречали бы сопротивления. Сопротивление создаётся всякой неоднородностью или неправильностью в расположении атомов.

Одной из причин неоднородности является тепловое движение атомов. С повышением температуры неоднородность в расположении атомов увеличивается, и сопротивление возрастает. Другой причиной неоднородности может быть наличие примесей, рассеивающих потоки электронов. Поэтому сопротивление сплавов больше сопротивления чистых металлов. Так как примеси оказывают большее влияние на рассеяние электронов, чем тепловое движение, то сопротивление сплавов значительно меньше зависит от температуры, чем сопротивление чистых металлов.

### Упражнение 5.

1. Вычислить сопротивление  $1 \text{ км}$  железного телеграфного провода сечением в  $8 \text{ мм}^2$ . Отв.  $16,25 \text{ ома}$ .

2. Какое надо выбрать сечение медного провода, чтобы он при длине в  $125 \text{ м}$  имел сопротивление в  $0,44 \text{ ома}$ ? Отв.  $5 \text{ мм}^2$ .

3. Из никелиновой проволоки диаметром в  $0,3 \text{ мм}$  изготовлено сопротивление в  $2 \text{ ома}$ . Какова длина проволоки? Отв.  $0,353 \text{ м}$ .

<sup>1)</sup> Электродами называются части цепи (обыкновенно в форме пластин), погружаемые в жидкий проводник или газ. Конечно, предполагается, что оба электрода имеют одинаковую площадь, в противном случае получается проводник с непрерывно изменяющимся сечением, и вычисление сопротивления усложняется.

4. Каково сопротивление 1 кг медной проволоки диаметром в 0,8 мм?

Плотность меди  $8,9 \frac{г}{см^3}$ .

Отв.  $\approx 8$  омов.

5. Определить сопротивление 10-процентного раствора медного купороса, если в сосуде размер электродов  $10 см^2$ , а расстояние между ними 1 см.

Отв. 3,13 ома.

6. Ток от трамвайной электростанции идёт по верхнему голому проводу через дугу вагона, вагонный электромотор и рельсы обратно к станции. Найти сопротивление верхнего провода и рельса, если вагон находится на расстоянии 1 км от станции, если верхний провод сделан из твёрдотянутой меди с удельным сопротивлением  $\rho = 0,0314$  и диаметром  $D = 1 см$ , а рельсы — из стали с удельным сопротивлением  $\rho = 0,15$  и сечением  $S = 30 см^2$ .

Отв. 0,45 ома.

7. Определить (без термометра) температуру обмотки машины, если до пропускания тока она имела сопротивление 150 омов при температуре воздуха в  $20^\circ$ , а после работы сопротивление её стало 180 омов. Провод — медный с температурным коэффициентом  $\alpha = 0,004$ .

Отв.  $74^\circ$ .

**41. Сверхпроводимость.** Для чистых металлов при охлаждении на  $1^\circ$  сопротивление уменьшается в среднем на 0,004, или  $\approx \frac{1}{273}$ . Поэтому можно было думать, что по мере приближения температуры металлов к абсолютному нулю ( $-273^\circ C$ ) их сопротивление постепенно будет также убывать до нуля. Но опыты, по крайней мере с некоторыми металлами, охлаждёнными сжиженными газами, показали иное явление. Удельное сопротивление свинца при постепенном охлаждении до  $7,3^\circ$  абсолютной температуры действительно постепенно уменьшалось, но при дальнейшем охлаждении даже на  $0,01^\circ$  оно внезапно и резко падало до исчезающе малой величины, делаясь на  $10^{10}$  раз меньше сопротивления при комнатной температуре (рис. 40).

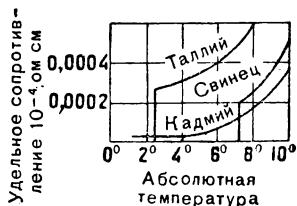


Рис. 40. Диаграмма зависимости сопротивления металлов от температуры.

Явление резкого понижения удельного сопротивления до ничтожно малой величины, наблюдаемое у некоторых металлов при температурах, близких к абсолютному нулю, называется сверхпроводимостью. Оно открыто Каммерлинг-Оннесом.

**42. Связь электропроводности с теплопроводностью.** Однако возможно сказать про какой-нибудь проводник, что он оказывает малое сопротивление или что он хорошо проводит электричество. Чем больше сопротивление, тем меньше электропроводность, и наоборот. Если удельное сопротивление вещества

обозначается буквою  $\rho$ , то его удельная электропроводность выразится величиною  $\frac{1}{\rho}$ . Вообще электропроводность всякого проводника с сопротивлением  $R$  будет обозначаться  $\frac{1}{R}$ .

Если сравнить таблицы <sup>1)</sup> электропроводности и теплопроводности, то можно заметить, что наиболее электропроводные вещества оказываются в то же время и наиболее теплопроводными (серебро, медь).

Это соотношение наводит на мысль о том, что в передаче теплоты телом путём теплопроводности принимают участие электроны.

**43. Внутреннее сопротивление источника тока.** Движение электрических зарядов встречает сопротивление не только в проводниках, составляющих внешнюю часть цепи, но и внутри источника тока, в частности внутри химического источника. Составим цепь из элемента Вольта, проводников и амперметра. При замыкании цепи амперметр отметит какую-то силу тока. Если, не изменяя внешнего участка цепи, начать раздвигать пластинки элемента, то амперметр покажет уменьшение силы тока; она будет также уменьшаться и при постепенном вынимании пластин из жидкости.

При более глубоком погружении пластин в жидкость или при сближении их сила тока увеличивается. Показания амперметра свидетельствуют, что в первом случае сопротивление источника увеличивается, во втором — уменьшается. Значит, существует сопротивление внутри самого гальванического элемента. Сопротивление источника тока называется **внутренним**.

Внутреннее сопротивление подчиняется общим законам сопротивления проводников.

**44. Реостаты.** В технике часто приходится производить постепенное изменение силы тока, например, при пуске электрических моторов, при выключении сильных токов, при изменении освещения в театрах и т. п. Изменять силу тока можно, меняя сопротивление цепи. Приборы, позволяющие вводить в цепь электрического тока изменяемое сопротивление, называются **реостатами**.

Наиболее употребительные формы реостатов следующие:

1. **Реостат с подвижной ручкой.** На раме (рис. 41) натянута спираль из проволоки различного сопротивления, соединённые между собой. Один конец цепи присоединяется к началу

---

<sup>1)</sup> Перечень металлов в порядке убывающей теплопроводности: серебро, медь, золото, алюминий, цинк, платина, никель, свинец. Таблица удельных сопротивлений веществ помещена в § 39.



первой спирали; другой конец соединён с ручкой. Ток проходит по реостату то или другое расстояние в зависимости от положения ручки. При указанном на рисунке 41 положении ток проходит через звенья  $Ka_1b_1a_2b_2a_3b_3$ . Перемещая ручку, можно включать различное число спиралей, чем можно в широких пределах менять сопротивление (но скачками) и, следовательно, силу тока. Этот вид реостата употребляется преимущественно в технических установках.

2. Реостат со скользящим контактом. Когда требуется, например при научных исследованиях, медленное и постепенное, очень малыми скачками, изменение силы тока, употребляют реостат со скользящим контактом. Он состоит из изолятора (рис. 42), на который намотана покрытая особой окалиной проволока. На ней по стержню перемещается металлический ползунок, тесно к ней прижимающийся (скользящий контакт). В местах соприкоснове-

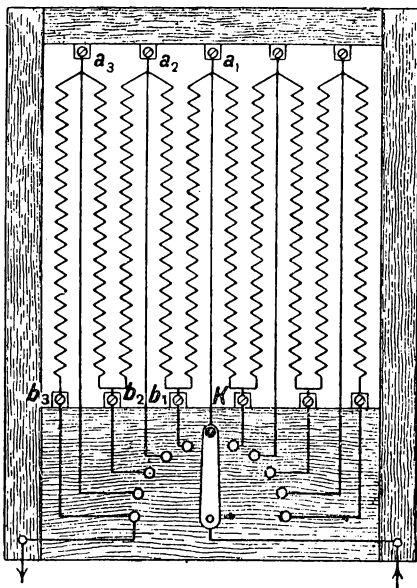


Рис. 41. Реостат с подвижной ручкой.

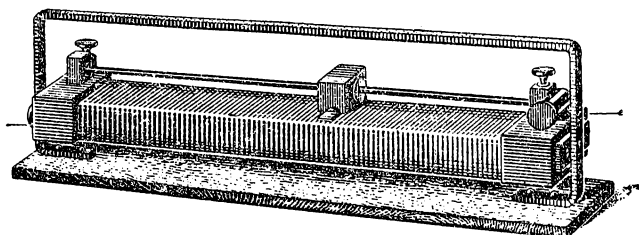


Рис. 42. Реостат со скользящим контактом.

ния с ползунком окалина соскабливается, и ползунок касается витков проволоки. Один конец цепи присоединяется к концу проволоки, другой — через стержень к скользящему контакту. По

реостату ток проходит только по тем виткам, которые находятся между концом проволоки, включённым в цепь, и контактом. Перемещая контакт, можно изменять число включённых витков проволоки и, следовательно, сопротивление.

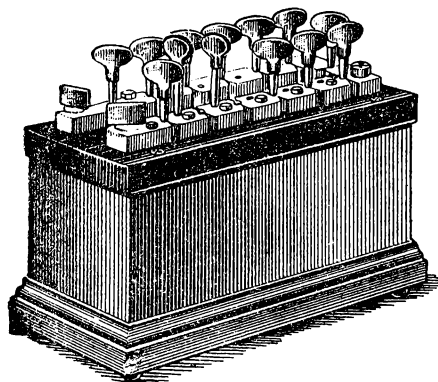


Рис. 43. Штепсельный реостат.

Для получения различного сопротивления, то тогда реостаты устраивают в форме ящика, в котором находится набор катушек из проволоки, имеющих различные, вполне определённые сопротивления (рис. 43). Реостаты такого типа называются магазинами сопротивлений, или штепсельными реостатами. На верхней крышке приделаны толстые медные полосы, разделённые промежутками, в которые вставляются штепсели. Концы каждой из последовательно расположенных катушек сопротивления прикреплены к двум соседним пластинкам (рис. 44). Когда в промежутки между пластинами вставлены металлические штепсели, соединяющие пластины в один сплошной проводник, ток идёт только по этим пластинам, минуя катушки сопротивления, так как пластины оказывают ничтожное сопротивление току. Когда же вынут один или несколько штепселей, ток проходит через включённые между промежутками сопротивления, величина которых написана в соответствующем месте крышки ящика. На рисунке 44 включены сопротивления I и III, а II выключено.

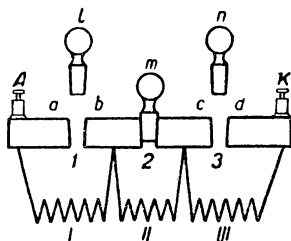


Рис. 44. Схема внутреннего устройства штепсельного реостата.

Концы цепи присоединяются к зажимам штепсельного реостата.

**45. Закон Ома.** ЭДС источника ещё не определяет силы тока в цепи. Опыты показали, что один и тот же источник тока, включённый в различные цепи, создаёт разные токи. ЭДС источника показывает только, какое количество работы может совершить источник для продвижения по цепи каждого кулона электричества. Число же кулонов, действительно проходящих ежесекундно через любое сечение цепи, т. е. сила тока, зависит, помимо ЭДС источника, также и от сопротивления самой цепи.

Как зависит сила тока в цепи от ЭДС и от сопротивления цепи, было исследовано немецким учёным Омом в 1828 г. и выражено в виде закона, известного под именем закона Ома для полной цепи.

Установим сперва зависимость между сопротивлением и силой тока при одном и том же напряжении на участке цепи (или при данной разности потенциалов на концах его).

Составим цепь по схеме рисунка 45, на котором  $R$  изображает реостат с подвижным контактом,  $A$  — амперметр,  $V$  — вольтметр. Сопротивление  $r$  между точками  $B$  и  $C$  меняется во время опыта. Для него могут быть подобраны проволоки, сопротивления которых предварительно измеряются методом замещения при помощи магазина сопротивлений. При каждом включении всякого сопротивления  $r$  подвижной контакт реостата  $R$  перемещается так, чтобы напряжение (разность потенциалов между точками  $B$  и  $C$ ) на исследуемом участке оставалось неизменным. Результаты наблюдения можно записать в следующую таблицу:

На нашей таблице даны результаты одного из опытов: сравнивая отношения  $I_1 : I_2$  и  $I_1 : I_3$



О м <sup>1)</sup> (1787—1854).

$U$ в вольтах	$I$ в амперах	$r$ в омах
$U = 2$	$I_1 = 2$	$r_1 = 1$
$U = 2$	$I_2 = 1$	$r_2 = 2$
$U = 2$	$I_3 = 0,5$	$r_3 = 4$

<sup>1)</sup> Ом Георг родился в Эрлангене в Германии, был много лет преподавателем гимназии в разных городах, с 1849 г. стал профессором в Мюнхене. Он установил экспериментально и теоретически зависимость между силой тока в цепи, электродвижущей силой и сопротивлением цепи.

с отношениями  $r_2 : r_1$  и  $r_3 : r_1$ , мы видим, что они равны. Отсюда вывод: *при одном и том же напряжении на участках цепи сила тока обратно пропорциональна сопротивлению участка.*

Оставляя без изменения на нём напряжение путём или путём смены источников тока, получим результаты, подобные занесённым в следующую таблицу:

Сравнивая отношения  $I_1 : I_2 : I_3$  с отношениями  $U_1 : U_2 : U_3$ , находим, что они равны. Отсюда вывод: *сила тока при одном и том же сопротивлении проводника прямо пропорциональна напряжению на нём.*

сопротивление участка, но меняя движения контакта на реостате

$U$	$I$	$r$
$U_1 = 2$	$I_1 = 2$	$r_1 = 1$
$U_2 = 1,5$	$I_2 = 1,49$	$r_2 = 1$
$U_3 = 2,4$	$I_3 = 2,41$	$r_3 = 1$

Если в каждой из приведённых таблиц разделить числа первого столбца, выраженные в вольтах, на числа второго столбца, выраженные в амперах, то получим числа третьего столбца, выраженные в омах (в пределах возможных ошибок наблюдения).

Отсюда закон Ома для участка цепи можно выразить формулой:

$$I = \frac{U}{R} \text{ или } U = IR,$$

$$\text{или } \frac{U}{I} = R. \quad (\text{VIII})$$

***Сила тока равна напряжению на отрезке проводника, делённому на сопротивление его.***

Для всей цепи имеет место подобное же соотношение, только вместо напряжения на участке  $U$  входит ЭДС источника, обозначаемая через  $E$ , и вместо сопротивления участка  $R$  входит полное сопротивление цепи, состоящее из суммы сопротивления внешнего участка  $r_e$  и внутреннего сопротивления источника  $r_i$ .

Зависимость между силой тока и полным сопротивлением цепи, состоящим из суммы внутреннего сопротивления источника

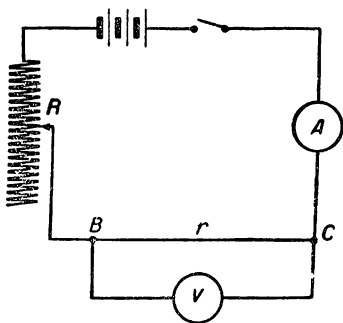


Рис. 45. Схема установки для экспериментального вывода закона Ома.

тока  $r_i$  и сопротивления внешней части цепи  $r_e$ , можно вывести из следующего опыта. Берётся гальванический элемент, сосуд которого имеет форму параллелепипеда (рис. 45а), чтобы легче было измерять расстояние между его пластинками, т. е. длину жидкого проводника. Как мы видели раньше (§ 32), ЭДС элемента не зависит ни от размеров, ни от формы элемента. Составим цепь из элемента, в котором пластины установим на определённом расстоянии, реостата и амперметра. Включив из реостата также определённое сопротивление, измерим по амперметру силу тока  $I_1$ . Затем будем раздвигать пластины элемента, при той же глубине их погружения, на двойное, тройное и т. д. расстояния и тем самым будем удваивать, утраивать и т. п. внутреннее сопротивление  $r_i$ ; одновременно будем соответственно изменять, т. е. удваивать, утраивать, и внешнее сопротивление  $r_e$ .

Измеряя для каждой установки силу тока  $I_2$ ,  $I_3$  и т. д. и сравнивая их между собою, найдём, что *сила тока в цепи обратно пропорциональна полному сопротивлению цепи.*

Можно показать, что *сила тока при одном и том же полном сопротивлении прямо пропорциональна ЭДС источника тока.*

Для этого возьмём 5 источников тока и соединим полюс каждого источника с разноимённым полюсом следующего. Присоединив вольтметр к крайним полюсам, измерим ЭДС  $E_1$ . Затем приключим к тем же полюсам внешнюю цепь, содержащую реостат и амперметр. Заметим силу тока  $I_1$ . При второй установке переключим один из источников тока в противоположном направлении. Снова измерим ЭДС  $E_2$  и после измерения присоединим ту же самую внешнюю цепь и заметим новую силу тока  $I_2$ . Для третьей установки приключим и второй источник тока в противоположном направлении и произведём таким же способом, как и раньше, измерения ЭДС  $E_3$  и силы тока  $I_3$ . Во всех трёх случаях внутренние и внешние сопротивления оставались одинаковыми. Вычисляя для каждой установки отношение  $\frac{I}{E}$ , найдём, что эти отношения одинаковы (в пределах погрешности измерения). Следовательно, при постоянном полном сопротивлении цепи сила тока в цепи прямо пропорциональна ЭДС источника.

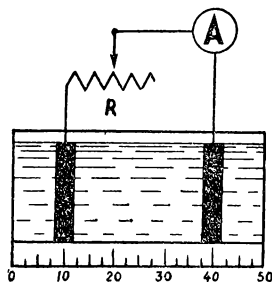


Рис. 45а.

Сила тока в цепи, выраженная в амперах, равна электродвижущей силе источника в вольтах, делённой на полное сопротивление цепи в омах.

Обозначим ЭДС буквой  $E$ . Тогда закон Ома для полной цепи может быть выражен следующей формулой:

$$I = \frac{E}{r_i + r_e}. \quad (\text{IX})$$

**46. Распределение напряжения по разным участкам цепи.** Присоединяя вольтметр к различным участкам цепи, можно проследить распределение напряжения на них.

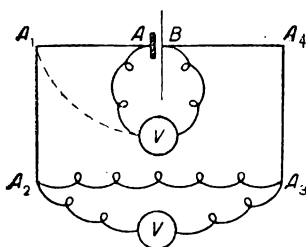


Рис. 46. Измерение вольтметром напряжения на различных участках цепи.

Составив цепь из источника тока  $AB$ , подводящих проводов и потребителя тока  $A_2A_3$  (рис. 46) и замкнув её, мы можем измерить напряжение на всём внешнем участке цепи, если присоединим вольтметр к полюсам источника тока  $A$  и  $B$ .

Если мы присоединим один зажим вольтметра к точке  $A_1$  (рис. 46), оставив второй в точке  $B$ , то показание вольтметра уменьшится сравнительно с прежним. Теперь его показание даёт разность потенциалов между точками  $A_1$  и  $B$ , т. е. работу по перемещению единицы электричества только на участке  $A_1A_2A_3A_4B$ ; в показание не входит работа на пути  $AA_1$ .

Так же будут постепенно уменьшаться показания вольтметра, если зажим его, присоединённый ранее к точке  $A_1$ , последовательно перемещать в точки  $A_2, A_3, \dots$ .

Так как с выключением каждого нового участка  $A_1, A_2, \dots$  показания вольтметра уменьшаются, то в технике принято говорить, что на участках  $AA_1, AA_2, \dots$  и вообще на любом участке происходит потеря напряжения.

Напряжение на участке называется потерей напряжения только с точки зрения потребителя энергии: напряжение на подводящих проводах не может быть использовано в приборе, к которому подводится ток.

Если мы присоединим один зажим вольтметра к точке  $A_2$ , а другой — к точке  $A_3$ , то мы измерим напряжение на участке

$A_2A_3$ . Вообще зажимы вольтметра надо присоединить к концам того участка, для которого измеряется напряжение.

Эти наблюдения подтверждают, что напряжение между участками цепи распределяется соответственно сопротивлению; формула же  $U = IR$  показывает, что *напряжение на каждом участке прямо пропорционально его сопротивлению*.

Из формулы закона Ома для полной цепи имеем  $E = Ir_e + Ir_i$ .

По предыдущему  $Ir_e$  представляет собой разность потенциалов на зажимах источника тока, или, иначе, напряжение на внешней части цепи при прохождении по цепи тока  $I$  (иногда  $Ir_e$  называют ещё напряжением на зажимах, или падением напряжения во внешней цепи).  $Ir_i$  — напряжение внутри источника при прохождении того же тока.

*ЭДС источника равна сумме падений напряжения на внешней части цепи и внутри источника при прохождении по цепи тока.*

Напряжение на зажимах источника тока замкнутого на внешнюю цепь, всегда меньше, чем ЭДС.

При постоянной ЭДС и при постоянном внутреннем сопротивлении источника тока напряжение на зажимах возрастает вместе с увеличением сопротивления во внешней цепи, но возрастание это не безгранично; при бесконечно большом сопротивлении внешней цепи (цепь разорвана) напряжение на зажимах равно ЭДС.

Напряжение уменьшается вдоль цепи тока при переходе от одного полюса к другому, подобно тому как падает и водяной напор вдоль трубы, по которой течёт ток жидкости или газа (рис. 47).

Чем больше внутреннее сопротивление, тем большую часть ЭДС составляет напряжение внутри источника ( $U_1$ ) и тем меньшую часть во внешней цепи ( $U$ ). Поэтому внутреннее сопротивление источников тока обыкновенно делают возможно малым.

В самом деле, если, например,  $E = 2$  вольтам,  $r_i = 0,1$  ома,  $r_e = 1$  ому, то  $I = \frac{2}{1,1} = 1,82$  ампера;  $U = 1,82 \cdot 1 = 1,82$  вольта;  $U_1 = 0,18$  вольта.

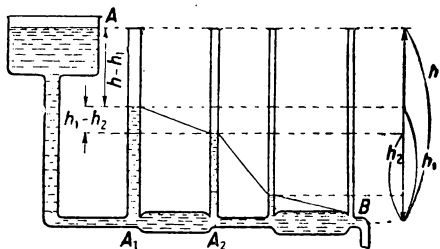


Рис. 47. Изменение напора вдоль вытекающей струи жидкости.

Если же  $E = 2$  вольтам,  $r_i = 0,5$  ома,  $r_e = 1$  ому, то  $I = \frac{2}{1,5} = 1,33$  ампера,  $U = 1,33 : 1 = 1,33$  вольта,  $U_1 = 0,67$  вольта.

Если же  $E = 2$  вольтам,  $r_i = 1$  ому,  $r_e = 1$  ому, то  $I = \frac{2}{1+1} = 1$  амперу,  $U = 1$  вольту,  $U_1 = 1$  вольту.

Примеры расчётов.

1. Какое надо выбрать сечение медного проводника длиной в 100 м, чтобы потеря напряжения на нём была 2,4 вольта при силе тока в 5 ампер?

Потеря напряжения, или, что то же самое, напряжение на участке  $U = 2,4$  вольта. Сопротивление участка:

$$R = \frac{U}{I} = \frac{2,4}{5} = 0,48; R = 0,48 \text{ ома}; R = \frac{\rho l}{S}; S = \frac{\rho l}{R};$$

$$S = \frac{0,0175 \cdot 100}{0,48}; S = 3,7 \text{ мм}^2.$$

2. Каково падение напряжения в никелиновом проводе длиной в 5 м, сечением в 0,4 мм<sup>2</sup> при силе тока в 2 ампера?

$$U = IR; R = \frac{\rho l}{S}; U = \frac{I \rho l}{S} = 10; U = 10 \text{ вольтам.}$$

### Упражнение 6.

1. Каково падение напряжения на участках, имеющих равные сопротивления?

2. Сравнить напряжения на медной и железной проволоках равной длины и одинакового сечения и включённых последовательно в одну и ту же цепь.

3. Изменится ли показание амперметра, включённого в замкнутую цепь тока, если переставить реостат с одной стороны амперметра на другую?

4. Что изменилось на данном участке цепи, если включённый последовательно с ним амперметр показывает увеличение силы тока?

5. Что изменилось на данном участке цепи, если включённый параллельно ему вольтметр показывает уменьшение напряжения?

6. В замкнутую цепь включён реостат и электрический звонок. Изменится ли напряжение на зажимах звонка, если реостат переставить в цепи с одной стороны звонка на другую?

7. Каков должен быть диаметр манганиновой проволоки длиной в 10 м, чтобы по ней шёл ток в 0,5 ампера при напряжении на ней в 40 вольт? *Отв. 0,26 мм.*

8. Каково будет сопротивление вольфрамового волоска пустотной лампочки, если длина его 456 мм, диаметр 0,021 мм, температура накала 2125°, удельное сопротивление при 25°  $\rho = 0,053$  и температурный коэффициент 0,0051? *Отв.  $\approx$  800 омов.*

9. Напряжение на зажимах замкнутой машины 120 вольт. Внешняя цепь состоит из реостата сопротивлений в 6 омов, дугового фонаря,



питаемого током в 10 ампер, и соединительных проводов в 0,5 ома. Найти сопротивление дугового фонаря, напряжение на его зажимах и потерю напряжения в реостате и соединительных проводах.

*Отв.* 5,5 ома.

10. Какова потеря напряжения на проводнике сопротивлением в 5 омов при силе тока в 3 ампера?

11. Каково сопротивление лампочки с угольным волоском, если она питается током в 0,5 ампера при напряжении на её зажимах в 120 вольт?

12. Под каким напряжением должна находиться лампочка с сопротивлением в 440 омов, если она питается током в 0,25 ампера?

*Отв.* 110 вольт.

13. Какая сила тока будет в проводнике в 0,4 ома при напряжении на нём в 2 вольта?

14. Какая сила тока будет в проводнике с сопротивлением в 220 омов при напряжении в 110 вольт?

15. Зачем вспомогательные части цепи — клеммы, замыкатели и т. п. — делают из коротких толстых медных частей?

16. Определить силу тока и напряжение на зажимах элемента в цепи, состоящей из элемента с ЭДС в 1,5 вольта с внутренним сопротивлением в 0,12 ома и из внешнего сопротивления в 1,28 ома.

*Отв.* 1,07 ампера.

17. Чтобы узнать внутреннее сопротивление элемента с ЭДС в 2 вольта, его замкнули внешним сопротивлением в 1 ом и получили силу тока в 1,2 ампера. Найти внутреннее сопротивление элемента.

*Отв.* 0,67 ома.

18. Найти ЭДС источника, если его внутреннее сопротивление равно 1,6 ома, напряжение на зажимах равно 110 вольтам, а внешнее сопротивление равно 18,3 ома.

19. ЭДС источника 125 вольт, внутреннее сопротивление 0,42 ома. Во внешнюю цепь включают дуговую электрическую лампу, требующую для спокойного горения напряжения на зажимах в 45 вольт и силу тока в 12 ампер. Какое надо включить в цепь добавочное сопротивление, чтобы лампа могла гореть? Если реостат сделан из константана диаметром в 3,6 мм, то какова длина взятой для него проволоки?

*Отв.*  $\approx 127,1$  м.

20. Какова должна быть на станции ЭДС источника тока с внутренним сопротивлением в 0,5 ома, чтобы в здании, находящемся на расстоянии 160 м, поддерживалось напряжение в 110 вольт? Сила тока в цепи 90 ампер. Провода медные с сечением в 50 мм<sup>2</sup>.

*Отв.* 165 вольт.

21. Определить силу тока в цепи в задачах 11, 16, 20, если произойдёт короткое замыкание, т. е. внешнее сопротивление станет равным нулю.

22. Какая получится выгода и отчего, если заменить один гальванический элемент другим такого же типа, но с большим размером пластин при том же внешнем участке цепи?

23. Как будет изменяться напряжение на зажимах источника, если постепенно включать всё большее и большее сопротивление во внешней цепи? К какому предельному значению будет стремиться указанное напряжение в этом случае?

24. Как будет изменяться напряжение на зажимах и к какому предельному значению будет оно стремиться по мере уменьшения сопротивления внешней цепи?

25. Каким должно быть внутреннее сопротивление амперметра, чтобы при включении его в цепь напряжение на зажимах источника тока не менялось?

47. Последовательное соединение проводников. В технике и в лабораторных работах никогда не приходится составлять внешнюю часть цепи из одного только проводника: обыкновенно друг за другом присоединяются подводящие провода, рубильники, реостат, гальванометр, приборы — потребители энергии. Соединение проводников, при котором конец одного

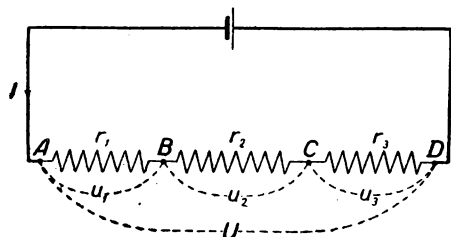


Рис. 48. Последовательное соединение проводников.

соединяется с началом другого, называется последовательным.

При последовательном соединении проводников сила тока во всех проводниках одна и та же.

Если участок цепи  $AD$  состоит из трёх последовательно включённых проводников (рис. 48):  $AB$  с сопротивлением  $r_1$ ,

$BC$  с сопротивлением  $r_2$  и  $CD$  с сопротивлением  $r_3$ , то сила тока во всех них будет одна и та же  $I$ , а напряжение на каждом из них соответственно  $U_1 = Ir_1$ ;  $U_2 = Ir_2$ ;  $U_3 = Ir_3$ . Измерив напряжение на всём проводнике  $AD$ , найдём, что оно равно сумме напряжений на отдельных участках, т. е.  $U = U_1 + U_2 + U_3$ .

Так:

$$\begin{aligned} U_1 &= Ir_1 \\ U_2 &= Ir_2 \\ U_3 &= Ir_3 \\ \hline U &= I(r_1 + r_2 + r_3). \end{aligned}$$

Если обозначить всё искомое сопротивление между  $A$  и  $D$  через  $R_{nc}$ , то для него имеет место соотношение:

$$U = IR_{nc}.$$

Из сравнения двух последних равенств следует, что

$$\boxed{R_{nc} = r_1 + r_2 + r_3.} \quad (X)$$

т. е. общее сопротивление ряда последовательно соединённых проводников равно сумме сопротивлений всех отдельных проводников.

**48. Параллельное соединение проводников.** Не всегда можно вводить проводники или приборы в цепь последовательно. Например, нельзя ввести в осветительную сеть последовательно две лампочки, рассчитанные на нормальное напряжение: они обе будут иметь неполный накал, и притом нельзя будет зажечь или погасить одну, не зажегши или не погасив одновременно другой.

Поэтому в осветительной технике так же, как и во многих других случаях, применяется соединение, называемое параллельным.

Соединение проводников называется параллельным, если одни концы всех проводников соединяются в один узел, другие концы — в другой. При параллельном соединении проводников сила тока, поступающего к узлу, равна сумме сил токов в параллельно соединённых проводниках.

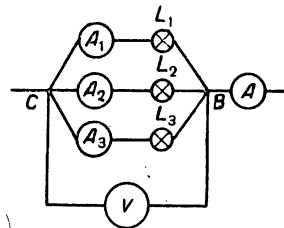


Рис. 49. Параллельное соединение лампочек.

Чтобы понять значение параллельного соединения проводников, сделаем следующий опыт (рис. 49).

Составим разветвление из трёх параллельно соединённых ветвей, включив в каждую по различной лампочке накаливания и по амперметру.

Включая первую лампочку  $L_1$ , по амперметру  $A$  отметим силу тока в неразветвлённой цепи  $I = 0,70$  ампера и по амперметру  $A_1$  — силу тока в первой ветви  $I_1 = 0,70$  ампера (числа заимствованы из одного опыта). Теперь включаем вторую лампочку  $L_2$ . Яркость первой не изменяется, вторая также светит нормально. Сила тока  $I = 1,41$  ампера; сила тока в первой ветви  $I_1 = 0,70$  ампера; во второй  $I_2 = 0,71$  ампера ( $I = I_1 + I_2$ ). Увеличение силы тока в неразветвлённой части показывает, что присоединение параллельной ветви уменьшает общее сопротивление между точками  $C$  и  $B$ <sup>1)</sup>. Если включить третью лампочку  $L_3$ , то можно видеть, что все три светят нормально. Сила тока в неразветвлённой части  $I = 2,51$  ампера; сила тока в ветвях  $I_1 = 0,70$  ампера,  $I_2 = 0,71$  ампера,  $I_3 = 1,1$  ампера<sup>2)</sup> ( $I = I_1 + I_2 + I_3$ ).

<sup>1)</sup> Сопротивление подводящих проводов ничтожно мало и может не приниматься в расчёт.

<sup>2)</sup> Можно произвести измерения, включая вторую и третью лампочки; так опыт дал для  $I_2 = 0,7$ ; для  $I_3 = 1,1$  и для  $I = 1,8$ .

Новое возрастание силы тока в неразветвлённой части указывает на новое уменьшение сопротивления между точками *C* и *B*.

Итак, *присоединение каждой новой параллельной ветви уменьшает общее сопротивление между концами разветвления, или сопротивление разветвления из параллельно присоединённых проводников меньше сопротивления каждой отдельной ветви.*

Присоединение новой параллельной ветви как бы увеличивает сечение проводника, а сопротивление уменьшается при увеличении сечения.

Найдём зависимость между сопротивлением всего разветвления  $R_{np}$  и сопротивлениями отдельных параллельно соединённых проводников  $r_1, r_2, r_3$  и т. д.

Под сопротивлением разветвления подразумевается сопротивление такого одного проводника, заменяющего разветвление, при котором напряжение на разветвлении и сила тока в цепи остаются прежними; следовательно,  $I = \frac{U}{R_{np}}$ .

Если вольтметр показывает напряжение  $U$  на разветвлении, то:

$$I_1 = \frac{U}{r_1}; I_2 = \frac{U}{r_2}; I_3 = \frac{U}{r_3}; I_1 + I_2 + I_3 = U \left( \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} + \frac{1}{r_3} \right).$$

Если сравнить показание амперметра в неразветвлённой части с показаниями амперметров в отдельных ветвях, то можно видеть, что для каждого опыта:

$$I = I_1 + I_2 + I_3.$$

Сравнивая два предыдущих равенства с  $I = \frac{U}{R_{np}}$ , можно написать:

$$\frac{U}{R_{np}} = U \left( \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} + \frac{1}{r_3} \right),$$

откуда по сокращении на  $U$ :

$$\boxed{\frac{1}{R_{np}} = \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} + \frac{1}{r_3}.} \quad (\text{XI})$$

Обратная величина сопротивления, т. е.  $\frac{1}{r}$ , называется (§ 42) *проводимостью проводника*. Таким образом, *проводимость разветвления равна сумме проводимостей параллельно соединённых проводников.*

Вычисления упрощаются, если все ветви имеют одинаковое сопротивление  $r$ ; тогда при  $n$  ветвях:

$$\frac{1}{R} = \overbrace{\frac{1}{r} + \frac{1}{r} + \frac{1}{r} + \dots + \frac{1}{r}}^{n \text{ раз}} = \frac{n}{r}, \quad \text{откуда: } \boxed{R = \frac{r}{n}}. \quad (\text{XII})$$

*Сопротивление разветвления, состоящего из  $n$  одинаковых ветвей, в  $n$  раз меньше сопротивления одной ветви.*

**49. Распределение тока между параллельными проводниками.** Измерения в опытах предыдущего параграфа дали:

$$\boxed{I = I_1 + I_2 + I_3}. \quad (\text{XIII a})$$

**Сумма сил токов в проводниках, соединённых параллельно, равна силе тока в неразветвлённой части цепи.**

Понятно, что всё то количество электричества, которое подходит к разветвлению с одной стороны, расходится по ветвям и затем выходит с другой стороны.

Чтобы сравнить силы тока в отдельных ветвях, вспомним, что:

$$\boxed{U = I_1 r_1 = I_2 r_2 = I_3 r_3}. \quad (\text{XIII б})$$

Совокупность последних равенств показывает, что:

**Силы тока в проводниках, соединённых параллельно, обратно пропорциональны сопротивлениям этих проводников <sup>1)</sup>.**

Оба вышеприведённых положения установлены немецким физиком Кирхгофом (1824—1887).

Рассмотрим несколько примеров на расчёты сопротивления и сил токов при разветвлении.

<sup>1)</sup> Из равенства (XIIIб) следует, что:

$$I_1 : I_2 = r_2 : r_1, \text{ или } I_1 : I_2 = \frac{r_2}{r_1 r_2} : \frac{r_1}{r_1 r_2}; \quad I_1 + I_2 = \frac{1}{r_1} : \frac{1}{r_2}.$$

Также

$$I_2 : I_3 = r_3 : r_2, \text{ или } I_2 : I_3 = \frac{1}{r_2} : \frac{1}{r_3}, \text{ откуда } I_1 : I_2 : I_3 = \frac{1}{r_1} : \frac{1}{r_2} : \frac{1}{r_3}.$$

**Примеры. 1.** Найдём сопротивление разветвления, если сопротивление ветвей:  $r_1 = 2$  ома,  $r_2 = 3$  ома,  $r_3 = 5$  омов. Сопротивление разветвления обозначим через  $R_{np}$ , тогда:

$$\frac{1}{R_{np}} = \frac{1}{2} + \frac{1}{3} + \frac{1}{5}; \quad \frac{1}{R_{np}} = \frac{15 + 10 + 6}{30}; \quad \frac{1}{R_{np}} = \frac{31}{30}; \quad R_{np} = \frac{30}{31};$$

$$x = 0,97 \text{ ома.}$$

2. Какое сопротивление надо присоединить параллельно к данному сопротивлению в 10 омов, чтобы сопротивление разветвления было равно 2 омам?  $r_1 = 10$ ;  $R_{np} = 2$ ;  $r_2 = x$ .

$$\frac{1}{2} = \frac{1}{10} + \frac{1}{x}; \quad \frac{1}{x} = \frac{1}{2} - \frac{1}{10}; \quad \frac{1}{x} = \frac{5-1}{10}; \quad \frac{1}{x} = \frac{4}{10};$$

$$x = \frac{10}{4}; \quad x = 2,5 \text{ ома.}$$

3. Пусть сила тока в цепи в первом примере равна 6,2 ампера; найдём силу тока в отдельных ветвях.

По правилу распределения тока между параллельными проводниками, сила тока в проводниках обратно пропорциональна сопротивлениям ветвей, т. е.:

$$I_1 : I_2 : I_3 = \frac{1}{r_1} : \frac{1}{r_2} : \frac{1}{r_3} = \frac{1}{2} : \frac{1}{3} : \frac{1}{5} = 15 : 10 : 6;$$

$$I_1 = \frac{I \cdot 15}{15 + 10 + 6}; \quad I_2 = \frac{I \cdot 10}{15 + 10 + 6}; \quad I_3 = \frac{I \cdot 6}{15 + 10 + 6}.$$

Другой приём решения. Зная сопротивление разветвления и полную силу тока в цепи, можем найти по закону Ома напряжение на разветвлении

$$U = IR_{np} = 6,2 \cdot 0,97 \approx 6 \text{ вольт.}$$

Тогда  $I_1 = \frac{6}{2} = 3$  ампера,  $I_2 = \frac{6}{3} = 2$  ампера,  $I_3 = \frac{6}{5} = 1,2$  ампера.

**50. Ламповый реостат.** На уменьшении сопротивления разветвления при включении параллельных добавочных проводников основано устройство лампового реостата.

Ламповый реостат представляет собой доску с несколькими параллельно включёнными цоколями электрических ламп (рис. 50). Этот реостат включается в цепь последовательно. Когда включена одна лампа, сопротивление реостата равно сопротивлению одной лампы  $R_1$ , когда включены две одинаковые лампы, сопротивление уменьшается до  $\frac{R_1}{2}$ , когда же включено  $n$  ламп, то сопротивление равно  $\frac{R_1}{n}$ .

На законе разветвления токов основано пользование штепсельным реостатом: при вставленных штепселях ток распределяется между сплошной толстой пластинкой и катушками обратно пропорционально их сопротивлениям. Так как сопротивление сплошной полосы близко к нулю, то практически весь ток проходит через неё.

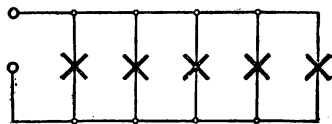


Рис. 50. Схема лампового реостата.

### Упражнение 7.

1. В цепь, по которой идёт ток в 1,4 ампера, включены параллельно между точками *A* и *B* три лампы накаливания с сопротивлением в 240, 400 и 200 омов. Найти силу тока в каждой лампе, сопротивление разветвления и напряжения на нём.

*Отв.* 85,7 ома.

2. Разветвление состоит из трёх параллельных проводников в 1 ом, 3 ома и 6 омов. Найти сопротивление разветвления и силу тока в каждом проводнике, если сила тока до разветвления равна 2,7 ампера.

*Отв.*  $\frac{2}{3}$  ома.

3. Разветвление состоит из трёх параллельных проводников с сопротивлениями в 6 омов, 0,25 ома, 0,4 ома. Найти сопротивление разветвления и силу тока в каждом проводнике, если сила тока на участке до разветвления равна 3 амперам.

*Отв.* 0,15 ома.

4. Электрический кипятильник сопротивлением в 4 ома и ламповый реостат из 10 параллельно включённых ламп накаливания с сопротивлением по 200 омов каждая включены последовательно при помощи проводов в осветительную сеть под напряжением в 120 вольт. Найти силу тока, проходящего через кипятильник и каждую лампу.

*Отв.* 5 ампер; 0,5 ампера.

5. Как, имея в своём распоряжении реостат с подвижным контактом, уменьшить сопротивление участка цепи между точками *A* и *B* вдвое, не заменяя самого провода *AB* другим?

6. Какая часть полного тока *I* пройдёт по проводнику *AB*, если параллельно включить между теми же точками *A* и *B* другой провод, сопротивление которого равно  $\frac{1}{9}$  сопротивления первого проводника?

*Отв.* 0,1.

7. Какое сопротивление надо включить параллельно с данным сопротивлением *R* между теми же точками *A* и *B*, чтобы по данному сопротивлению проходила 0,1 или 0,01 или 0,001 часть того тока *I*, который проходит по неразветвлённой части цепи?

8. От концов магистрали, введённой в квартиру, сделаны три ответвления: в первую ветвь включены параллельно 11 ламп накаливания с сопротивлением по 220 омов каждая, во вторую — 10 ламп с сопротивлением по 200 омов и в третью — 7 ламп с сопротивлением по 210 омов. Сила тока в магистрали равна 16 амперам. Определить силу тока в каждой лампе и в каждой ветви.

*Отв.* 0,56; 0,6; 0,57 А.

9. Ламповый реостат устраивается из ламп накаливания, включённых параллельно в разном числе (2; 3; 10 и т. д.). Каково наибольшее

и наименьшее сопротивление можно составить из 12 ламп с сопротивлением в 240 омов каждая? Сколько надо включить ламп параллельно, чтобы получить сопротивление в 30 омов? *Отв.* 8 ламп.

10. Чему будет равно сопротивление разветвления, если параллельно с проводником в 1 ом включить проводник в 1000 омов?

11. Изменится ли напряжение на полюсах источника, если между двумя точками цепи включить параллельное сопротивление?

**51. Батарея.** В тех случаях, когда от отдельного элемента получается в цепи недостаточный для какой-либо цели ток, можно соединять вместе несколько отдельных элементов. Соединение нескольких элементов по определённому способу называется батареей.

Батареи различаются способом соединения между собой отдельных элементов.

Соединение называется **последовательным**, если положительный полюс элемента соединяется с отрицательным полюсом следующего (рис. 51). Чтобы присоединить к такой батарее внешнюю цепь, надо один её конец соединить с положительным полюсом одного крайнего элемента и другой конец — с отрицательным полюсом другого крайнего элемента.

Соединение называется **параллельным**, если положительные полюсы всех элементов соединены между собой, а отрицательные — между собой (рис. 52). Чтобы включить внешнюю цепь, надо один конец цепи присоединить к какому-либо положительному полюсу, а другой конец — к какому-либо отрицательному полюсу (или к каким-либо точкам проводов, соединяющих между собой одинаковые полюсы).

Соединение называется **смешанным**, если все элементы разбиты на группы с одинаковым числом элементов; в пределах группы элементы соединены последовательно, а самые группы — параллельно, или наоборот (рис. 53).



Рис. 51. Схема последовательного соединения элементов в батарее.

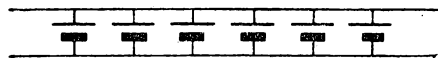


Рис. 52. Схема параллельного соединения элементов в батарее.

**52. Внутреннее сопротивление батареи.** Внутреннее сопротивление батареи при последовательном соединении одинаковых элементов будет больше внутреннего сопротивления отдельного элемента во столько раз, сколько взято элементов.



Внутреннее сопротивление батареи при параллельном соединении одинаковых элементов меньше внутреннего сопротивления отдельного элемента во столько раз, сколько взято элементов (§ 48).

При смешанном соединении расчёт ведётся следующим образом: если дано 20 элементов, соединённых в 4 группы по 5 элементов, с внутренним сопротивлением в 0,8 ома каждый, то сопротивление каждой группы по 5 последовательно соединённых элементов равно  $0,8 \cdot 5 = 4$  омам, сопротивление же четырёх параллельно соединённых групп будет в 4 раза меньше, т. е.  $4 : 4 = 1$  ому.

Вообще, если дано  $n$  элементов, соединённых в  $k$  групп по  $m$  элементов в группе ( $n = m \cdot k$ ), причём группы соединены параллельно, а элементы в группе последовательно, и если внутреннее сопротивление элемента  $r_i$ , то сопротивление каждой группы равно  $r_1 \cdot m$ ; сопротивление батареи равно  $\frac{mr_i}{k}$ .

Зная сопротивление батареи, необходимо только знать ЭДС батареи, чтобы можно было вычислить силу тока в данной цепи, сопротивление внешней части которой задано.

**53. ЭДС батареи.** Опыты показывают, что ЭДС батареи при последовательном соединении одинаковых элементов во столько раз больше ЭДС элемента, сколько взято элементов.

Данные опытов можно объяснить следующим рассуждением.

Если обозначим потенциал отрицательного полюса первого элемента справа через  $V$  (рис. 51), то потенциал положительного полюса его выразится через  $V + E$ , где  $E$  — ЭДС элемента. Отрицательный полюс второго элемента, соединённый с положительным полюсом первого, имеет одинаковый с ним потенциал, т. е.  $V + E$ .

Но положительный полюс второго элемента выше потенциала его отрицательного полюса ещё на величину  $E$  и равен  $V + 2E$ . Таков же потенциал отрицательного полюса третьего, соединённого с положительным второго. Дальнейшее возрастание потенциала идёт по тому же закону, достигая на положительном полюсе другого крайнего элемента величины  $V + nE$ ; ЭДС батареи будет равна  $(V + nE) - V = nE$ .

При параллельном соединении ЭДС батареи одинакова с ЭДС отдельного элемента.

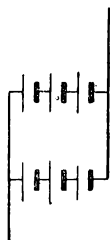


Рис. 53. Схема смешанного соединения элементов в батарее.

В этом случае положительные полюсы всех элементов соединяются между собой, все отрицательные полюсы — между собой (рис. 52). Батарея уподобляется одному элементу, пластинки которого имеют больший размер, чем у отдельного элемента, а ЭДС элемента не зависит от его размера.

При смешанном соединении ЭДС батареи определяется двумя предыдущими правилами: она равна ЭДС одного элемента, умноженной на число элементов, последовательно соединённых в каждой группе; число же групп, соединённых параллельно, не влияет на величину ЭДС.

#### 54. Наивыгоднейшее соединение элементов в батарею.

Установив формулы ЭДС и сопротивления батареи, можно рассчитать силу тока в цепи при одном элементе и при разных способах соединения их в батарею.

Сила тока в цепи, содержащей один элемент:  $i = \frac{E}{r_i + r_e}$ .

При последовательном соединении в батарею сила тока:

$$I_{nc} = \frac{nE}{nr_i + r_e}.$$

При параллельном соединении в батарею сила тока:

$$I_{np} = \frac{E}{\frac{r_i}{n} + r_e}.$$

Если внутреннее сопротивление батареи очень мало по сравнению с сопротивлением внешней цепи, т. е. если величиной  $nr_i$  можно пренебречь по сравнению с  $r_e$ , то

$$i = \frac{E}{r_e}; \quad I_{nc} = \frac{nE}{r_e}; \quad I_{np} = \frac{E}{r_e}.$$

Из сравнения этих выражений для силы тока в цепи от одного элемента и от батареи можно сделать вывод: если внутреннее сопротивление батареи мало по сравнению с сопротивлением внешней цепи, то последовательное соединение элементов в батарею даёт силу тока во столько раз большую (сравнительно с силой тока в цепи с таким же внешним сопротивлением, но от одного элемента), сколько взято элементов; батарея же параллельно соединённых элементов даёт в этом случае такую же силу тока, как и один элемент.

Если же сопротивление внешнего участка ничтожно мало сравнительно с внутренним сопротивлением элемента, т. е.  $r_e$  может быть принято за нуль, то:

$$i = \frac{E}{r_i}; \quad I_{nc} = \frac{E}{r_i}; \quad I_{np} = \frac{nE}{r_i}.$$

Вывод: если внутреннее сопротивление элемента велико сравнительно с сопротивлением внешнего участка, то при  $r_e$ , близком к нулю, параллельное соединение элементов в батарею даёт силу тока, во столько раз большую, чем сила тока в такой же цепи от одного элемента, сколько взято элементов; батарея же элементов, соединённых последовательно, даёт такую же силу тока, как и один элемент.

Только что проделанный расчёт показывает, что *последовательное соединение элементов выгоднее* <sup>1)</sup>, когда внешнее сопротивление велико сравнительно с внутренним. Параллельное — тогда, когда оно мало.

Для смешанного соединения из  $k$  групп по  $m$  элементов соединённых последовательно в каждой группе, сила тока выражается формулой:

$$I_{\text{см}} = \frac{mE}{\frac{mr_i}{k} + r_e}.$$

Вычисление показывает, что из всевозможных группировок элементов наибольшую силу тока даёт та, при которой внешнее сопротивление равно внутреннему сопротивлению батареи, т. е.

$$\frac{mr_i}{k} = r_e.$$

**55. Определение сопротивления мостиком Уитстона.** На законе разветвления тока основан один из самых точных способов измерения сопротивления. Предназначенная для этого установка называется мостиком Уитстона.

Прибор, называемый реохордом, состоит из метровой линейки (рис. 54), на которой натянута тонкая однородная проволока из никелина или другого сплава, имеющего большое удельное сопротивление. Между концами  $A$  и  $B$  проволоки включены соединённые последовательно известное сопротивление  $r$  (между  $A$  и  $C$ ) и измеряемое сопротивление  $r_x$  (между  $B$  и  $C$ ). Точка соединения обоих сопротивлений  $C$  соединена

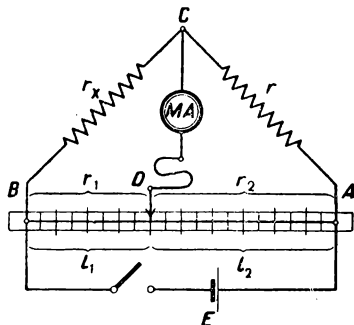


Рис. 54. Мостик Уитстона.

<sup>1)</sup> *Выгоднее* — это значит: даёт силу тока большую, чем сила тока от одного элемента.

с одним зажимом амперметра, градуированного на миллиамперы (миллиампер = 0,001 А) или гальванометра; другой зажим его присоединяют гибкой проволокой к ползунку  $D$ , скользящему вдоль однородной проволоки. Эта часть прибора  $CD$  похожа на мост, перекинутый между двумя ветвями прибора, и даёт название всему прибору.

К концам  $A$  и  $B$  реохорда присоединены провода от полюсов элемента  $E$ .

Если замкнуть цепь, ток разветвляется по ветвям  $BCA$  и  $BDA$ ; ток пройдёт также по мосту  $CD$  и даст отклонение стрелки миллиамперметра.

Передвигая ползунок  $D$  и тем меняя сопротивления частей  $r_1$  и  $r_2$ , можно добиться такого положения, что ток через мост не пройдёт. Отсутствие тока через амперметр указывает, что точки  $C$  и  $D$  находятся при одинаковых потенциалах.

Обозначим одинаковые потенциалы точек  $C$  и  $D$  через  $V$ , потенциал точки  $B$  — через  $V_1$  и потенциал точки  $A$  — через  $V_2$ ; сила тока в ветви  $BCA$  равна  $i_1$ ; в ветви  $BDA$  —  $i_2$ .

Тогда на основании закона Ома для участка цепи:

$$\begin{aligned} V_1 - V &= i_1 r_x; & V - V_2 &= i_1 r; \\ V_1 - V &= i_2 r_1; & V - V_2 &= i_2 r_2. \end{aligned}$$

Отсюда:

$$i_1 r_x = i_2 r_1; \quad i_1 r = i_2 r_2.$$

Делим почленно первое равенство на второе:

$$r_x : r = r_1 : r_2.$$

Таким образом, при отсутствии тока через мост сопротивления четырёх ветвей пропорциональны.

Но так как проволока, натянутая на линейку, однородна, то сопротивления её частей пропорциональны длинам:

$$r_1 : r_2 = l_1 : l_2 \quad \text{и} \quad r_x : r = l : l_2.$$

Из этого вывода вытекает способ пользования прибором. Включив измеряемое и известное сопротивления так, как показано на рисунке, передвигают ползунок до тех пор, пока не исчезнет ток в мостике. Затем измеряют длины  $l_1$  и  $l_2$  и вычисляют неизвестное сопротивление по формуле:  $r_x = \frac{r l_1}{l_2}$ .

Произведите на лабораторной работе измерение какого-либо неизвестного сопротивления.

## Упражнение 8.

1. 10 аккумуляторов с ЭДС = 2 вольтам и  $r_i = 0,08$  ома соединены последовательно и замкнуты цепью с  $r_e = 3,2$  ома. Найти силу тока в цепи от батареи, силу тока в цепи от одного элемента при тех же данных и силу тока в обоих случаях при коротком замыкании ( $r_e = 0$ ).

*Отв.* 5; 0,61; 25 и 25 ампер.

2. Два одинаковых элемента соединены параллельно. Чему будут равны ЭДС и внутреннее сопротивление такой пары элементов? Решить те же вопросы для случая подобного соединения  $n$  одинаковых элементов.

3. Два элемента, имеющие каждый ЭДС в 2,5 вольта и внутреннее сопротивление в 1 ом, соединены вместе параллельно; затем общий положительный и общий отрицательный полюсы соединены проводником с сопротивлением в 0,5 ома (или 5 омов). Найти силу тока в цепи и сравнить её с той силой, которая получилась бы, если бы тот же внешний проводник замыкал один элемент.

4. 10 элементов с ЭДС = 2 вольтам и с  $r_i = 1$  ому соединены параллельно и замкнуты проводником с  $r_e = 0,1$  ома. Найти силу тока от батареи, силу тока в цепи от одного элемента при тех же данных, силу тока в обоих случаях при коротком замыкании и при  $r_e = 3,2$  ома.

*Отв.* 10; 1,8; 20 и 2; 0,6 и 0,5 ампера.

5. 10 элементов с ЭДС = 1,5 вольта разделены на две группы последовательно соединённых элементов в каждой группе, группы же соединены параллельно,  $r_i = 0,8$  ома. Найти силу тока от батареи и от одного элемента, если внешнее сопротивление  $r_e = 20$  омам или 2 омам, или 0,2 ома.

*Отв.* Для батареи 0,34; 1,875; 3,4 ампера.

6. Даны 12 элементов с ЭДС = 2 вольтам, с  $r_i = 1$  ому и  $r_e = 0,75$  ома. Вычислить силу тока при всевозможных соединениях элементов (последовательном, параллельном и любом групповом) и указать наиболее выгодное соединение.

*Отв.* 4 параллельные группы по 3.

## ВОПРОСЫ ДЛЯ ПРОВЕРКИ УСВОЕНИЯ.

1. Каким свойством обладает отношение  $\frac{U}{I}$  для одного и того же участка цепи при изменении  $U$  и  $I$ ?
2. Какое свойство проводника характеризует отношение  $\frac{U}{I}$ ?
3. Как выбрана и как называется единица сопротивления?
4. Каковы выражение и формула закона Ома для участка цепи?
5. Каков закон сопротивления проводника?
6. Что называется удельным сопротивлением вещества?
7. Какова формула сопротивления?
8. Что называется электродвижущей силой источника тока?
9. Каковы выражение и формула закона Ома для полной цепи?
10. Чему равна разность между ЭДС и напряжением на зажимах источника при замкнутой внешней цепи, на что она идёт и от чего зависит её величина?
11. Что называется последовательным соединением проводников и как вычисляется в этом случае общее сопротивление нескольких проводников?

12. Что называется параллельным соединением проводников?
13. Что называется проводимостью проводника?
14. Каков закон проводимости разветвления, состоящего из нескольких различных проводников?
15. Чему равно сопротивление разветвления, состоящего из нескольких одинаковых проводников?
16. Каково соотношение между силой тока в главной цепи и силами токов в отдельных ветвях?
17. Какова зависимость между силами токов и сопротивлениями ветвей?
18. Почему в магазине сопротивления при вставленных штепселях ток не проходит (практически) через катушки сопротивлений?
19. Что называется батареей элементов? Какое соединение элементов называется последовательным, параллельным и смешанным?
20. Какова формула для силы тока батареи при последовательном соединении? При каком соотношении между внешним сопротивлением и внутренним сопротивлением батареи последовательное соединение выгоднее сравнительно с одним элементом?
21. Какова формула силы тока батареи при параллельном соединении? Каково условие выгоды этого соединения?
22. Какова формула силы тока батареи при смешанном соединении? Каково условие выгоды этого соединения?

**56. Энергия и мощность тока.** Выше (§ 36) было сказано, что во всей цепи электрического тока через поперечное сечение проводника проходит одинаковое количество электричества  $Q$ , и на каждом участке цепи существует особое напряжение или разность потенциалов.

В первой главе было показано, что перемещение  $Q$  единиц электричества от точки с потенциалом  $V_1$  в точку с потенциалом  $V_2$  происходит с затратой энергии  $A = Q(V_1 - V_2)$ .

Если эту разность потенциалов (напряжение) обозначить буквой  $U$ , а энергию, отдаваемую электрическим током, буквой  $W$ , то эта энергия для любого участка выразится формулой:

$$W = QU; \text{ для всей цепи: } W = QE^1. \quad (\text{XIVa})$$

Так как  $Q = It$ , то энергия, отдаваемая электрическим током, на участке:

$$W = IUt, \text{ во всей цепи: } W = IEt. \quad (\text{XIVб})$$

Если  $I$  измерено в амперах,  $U$  — в вольтах,  $t$  — в секундах, то  $It$  выражается в кулонах, а  $W$  — в джоулях (на основании выводов § 13).

Таким образом, мы видим, что название единицы энергии — джоуль — может быть заменено наименованием кулон-вольт:

$$\text{джоуль} = \text{кулон} \times \text{вольт}.$$

<sup>1)</sup> При условии, что нет добавочных обратных ЭДС, например ЭДС поляризации (§ 91) или индукции (§ 114).

Мощность тока на любом участке цепи измеряется количеством энергии, отдаваемым электрическим током в 1 секунду.

$$\text{Мощность } N = \frac{W}{t}.$$

Разделив обе части равенства  $W = IUt$  на  $t$ , получим:

$$\boxed{N = IU.} \quad (\text{XV})$$

В той же системе единицей мощности является ватт. Из формулы видно, что *мощность тока равняется ватту, если по проводнику проходит ток в 1 ампер при напряжении на проводнике в 1 вольт:*

$$\text{ватт} = \text{вольт} \times \text{ампер}.$$

Из курса механики известно, что джоуль иначе называется ватт-секунда, что 3600 джоулей носят название ватт-час, 360 000 джоулей называется гектоватт-час и 3 600 000 джоулей — киловатт-час.

**57. Превращение электрической энергии в тепловую.** Все опыты показывают, что прохождение электрического тока вызывает нагревание всех участков проводников, входящих в цепь.

Таким образом, в цепи мы имеем следующие преобразования энергии. В генераторе химическая (или механическая, если генератором тока является электрическая машина) энергия превращается в электрическую энергию тока электронов или ионов; в цепи же электрическая энергия превращается в теплоту и в другие формы энергии (например, химическую или энергию индукционного тока).

Если на участке цепи нет превращения электрической энергии в какой-либо иной вид энергии, то электрическая энергия на этом участке целиком превращается в теплоту; в других случаях происходит только частичное превращение электрической энергии в теплоту.

Электрический ток всегда сопровождается возникновением теплоты в проводниках, по которым он проходит.

Изучить зависимость между количеством теплоты, возникающим в цепи, и электрическими величинами, характеризующими цепь, можно самостоятельно на следующей лабораторной работе.

**58. Лабораторная работа № 1.** Вывод из опыта закона теплового действия тока.

Приборы: 1) 3 аккумулятора; 2) калориметр; 3) термометр; 4) амперметр; 5) спирали сопротивлением в 1 и 2 ома; 6) мензурка; 7) весы с разновес; 8) рубильник; 9) керосин; 10) реостат с подвижным контактом.

Измерению подлежат, с одной стороны, сила тока, проходящего по участку с измеренным заранее сопротивлением, с другой стороны — количество теплоты, выделяющейся на этом участке. Само собой понятно, что для измерения количества теплоты надо исследуемый проводник поместить в калориметр. Этим определяется вся установка опыта.

**Задание 1.** Найти зависимость между количеством выделившейся теплоты и временем прохождения тока.

Ход работы. 1. Найдите взвешиванием массу калориметра в граммах.

2. Влейте в калориметр такое количество керосина, чтобы жидкость покрывала всю спираль и чтобы столбик опущенного в жидкость термометра был виден над калориметром. Найдите взвешиванием или по мензурке массу взятого керосина  $m_1$  граммов.

3. Опустите в калориметр спираль и термометр.

4. Составьте цепь: 1—2 аккумулятора, рубильник, спираль сопротивления, амперметр.

5. Запишите начальную температуру керосина  $t^\circ = \dots$

6. Заметьте время, замкните ток, запишите силу тока  $I$  ампер, помешивайте мешалкой жидкость; через  $T_1 = 5$  минутам от начала опыта заметьте температуру керосина:  $t_1^\circ = \dots$  и через  $T_2 = 10$  минутам от начала опыта опять запишите температуру:  $t_2^\circ = \dots$  Разомкните цепь.

7. Какой формулой выразится количество теплоты  $q_1$  калорий, полученное калориметром за время  $T_1 = 5$  минутам? Какой формулой выразится количество  $q_2$  калорий, полученное калориметром за время  $T_2 = 10$  минутам? Как относятся  $q_2$  и  $q_1$  (показать, что  $\frac{q_2}{q_1} = \frac{t_2 - t}{t_1 - t}$ )?

8. Как относятся два промежутка времени  $T_2$  и  $T_1$ ? Каково соотношение между  $\frac{q_2}{q_1}$  и  $\frac{T_2}{T_1}$ ? Каков вывод из опыта?

9. Запишите полученные числа в таблицу.

Прибор №...; сопротивление  $R_1 = \dots$  омов; сила тока  $i = \dots$  ампер; масса калориметра  $m = \dots$  граммов; масса керосина  $m_1 = \dots$  граммов.

Номер	Время	Температура	Отношение промежутков времени и отношение количеств теплоты	Разность $\frac{T_2}{T_1} - \frac{q_2}{q_1}$	Разность, выраженная в % по отношению <sup>1)</sup> к $\frac{T_2}{T_1}$
	0 сек.	$t^\circ = \dots$	$\frac{T_2}{T_1} = \dots$		
	$T_1 = \dots$	$t_1^\circ = \dots$			
	$T_2 = \dots$	$t_2^\circ = \dots$	$\frac{q_2}{q_1} = \frac{t_2 - t}{t_1 - t} = \dots$		

1) Если работа идёт фронтально на несколько групп, то надо найти также среднее значение для всех групп.



**Задание 2.** Найти зависимость между количеством выделившейся теплоты и силой тока.

**Задание 3.** Найти зависимость между количеством выделившейся теплоты и сопротивлением проводника.

План и ход выполнения второго и третьего заданий составьте самостоятельно.

### 59. Закон Джоуля-Ленца для теплового действия тока.

Исследование теплового действия тока проделали независимо друг от друга русский учёный Ленц и английский учёный Джоуль. Прибором для исследования служил калориметр, в жидкость которого опускалась проволока в виде спирали (рис. 55).

Если включить в цепь источник тока, амперметр и проводочную спираль, опущенную в калориметр, то по амперметру можно измерить силу проходящего по проводнику тока. С другой стороны, по калориметрической формуле можно рассчитать количество теплоты, получающееся в калориметре. Меняя в разных опытах время прохождения тока, сопротивление проводника и силу проходящего по нему тока, можно вывести зависимость между всеми этими величинами и количеством теплоты. Из своих опытов Джоуль и независимо от него Ленц установили следующий закон, известный под именем закона Джоуля-Ленца:

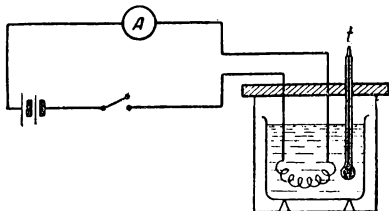


Рис. 55. Прибор для опыта Джоуля.

**Количество теплоты, выделяемой в проводнике током, прямо пропорционально квадрату силы тока, сопротивлению проводника и времени прохождения тока.**

Если энергия электрического тока на каком-либо участке цепи превращается в тепловую, то закон Джоуля-Ленца может быть выведен из установленных раньше соотношений.

В самом деле, для каждого участка электрическая энергия:

$$W = IUt \text{ и } U = IR, \text{ откуда } W = I^2Rt.$$

В этой формуле энергия выражена в джоулях.

Займствуя во второй части учебника значение термического эквивалента работы, равного  $0,24 \frac{\text{кал}}{\text{джоуль}}$ , можно выразить энергию тока в калориях:

$$Q_m = 0,24 I^2 R t.$$

Таким образом, для вычисления энергии или мощности электрического тока можно пользоваться любым из следующих выражений:

Энергия тока

Мощность

в механических  
единицах

в тепловых  
единицах

$$\begin{aligned} W &= IUt \\ W &= I^2Rt \\ W &= \frac{U^2}{R} \cdot t \end{aligned} \quad (\text{XVI})$$

$$\begin{aligned} Q &= 0,24 IUt \\ Q &= 0,24 I^2Rt \\ Q &= 0,24 \frac{U^2}{R} \cdot t \end{aligned} \quad (\text{XVII})$$

$$\begin{aligned} N &= IU \\ N &= I^2R \\ N &= \frac{U^2}{R} \end{aligned} \quad (\text{XVIII})$$



Э. Х. Ленц<sup>1)</sup> (1804—1865).

<sup>1)</sup> Ленц Эмилий Христианович (1804—1865) — член Российской Академии наук, профессор и ректор Петербургского университета.

Основные работы Э. Х. Ленца касаются вопросов электромагнетизма. Э. Х. Ленц открыл закон, определяющий направление электрического тока, возбуждённого в проводнике благодаря электромагнитной индукции. Этот закон широко известен в учении об электричестве под именем правила Ленца. Ленц установил, от чего зависит сила индуктированного тока, и показал, что к индуктированному току приложим закон Ома. Это был большой шаг вперёд в установлении единства всех явлений электричества, так как в то время считались принципиально отличными друг от друга не только электричество статическое, но и даже токи, электрический ток).

и «гальваническое» (т. е. полученные от различных источников).

Работы Э. Х. Ленца заложили основы расчёта явлений электромагнитной индукции, являющихся основой всей современной электротехники. Э. Х. Ленц установил совершенно независимо от Джоуля, и притом при помощи более точных опытов, чем Джоуль, закон теплового действия тока. Этот закон хорошо известен в физике под именем закона Джоуля-Ленца.

Э. Х. Ленц осуществил значительное количество и других работ в области электромагнетизма. В частности, он вместе с другим русским учёным Б. С. Якоби установил, от чего зависит подъёмная сила электромагнитов; он многое сделал для разработки теории динамо-машин. Благодаря своим трудам Э. Х. Ленц по праву считается одним из основоположников современной электротехники. Э. Х. Ленц участвовал в кругосветной экспедиции и написал ряд работ по физической географии. Долгое время очень большой известностью и распространением пользовались написанные Ленцом учебники по физике.

Множитель 0,24 является термическим эквивалентом соответствующей электрической энергии, вычисленной при помощи электрических величин  $I$  и  $R$  и выраженной в джоулях.

Этот эквивалент можно определить самостоятельно на лабораторной работе.

### 60. Лабораторная работа № 2. Определение теплового эквивалента электрической энергии.

Приборы: 1) калориметр; 2) термометр; 3) спираль<sup>1)</sup> с сопротивлением в 2—3 ома; 4) амперметр; 5) вольтметр; 6) 2 аккумулятора; 7) рубильник; 8) весы с разновесом; 9) часы; 10) керосин.

Ход работы. 1. Соедините положительный полюс одного аккумулятора с отрицательным другого и к свободным полюсам присоедините внешнюю цепь, состоящую из проволочной спирали, амперметра и рубильника. К концам проволочной спирали присоедините параллельно ей вольтметр (рис. 55).

2. Найдите массу калориметра  $M$  граммов.

3. Налейте в калориметр столько керосина, чтобы он целиком покрыл проволочную спираль, опущенную в калориметр, и найдите массу керосина  $m$  граммов.

4. Опустите спираль в калориметр, вставьте в него термометр и заметьте начальную температуру  $t_1^\circ$ .

5. Замкните ток, заметив время замыкания. Запишите силу тока и напряжение на спирали.

6. После того как температура керосина поднимется градусов на пять, разомкните ток и запишите время пропускания тока  $t$  секунд и конечную (наивысшую) температуру  $t_2^\circ$ .

7. Занесите числа в таблицу:

№ измерения	Масса $M$ калориметра	Масса $m$ керосина	Начальная температура $t_1^\circ$	Конечная температура $t_2^\circ$	Сила тока $I$	Напряжение $U$	Время $t$

8. Вычислите количество теплоты  $Q$  калорий, полученное керосином и калориметром при нагревании от  $t_1^\circ$  до  $t_2^\circ$ .

9. Вычислите работу тока  $W$  джоулей в спирали за время  $t$  секунд при силе тока  $I$  ампер и напряжении  $U$  вольт.

10. Найдите отношение  $\frac{Q \text{ кал}}{W \text{ джоуль}}$ .

<sup>1)</sup> Вместо спирали можно взять электрическую лампочку и включить её в осветительную сеть. Тогда вольтметр должен быть взят со шкалой около 120 вольт.

11. Повторите измерение несколько раз для разных промежутков времени, сил токов и напряжений и найдите среднее значение  $\frac{Q}{W}$ .

12. Сравните это среднее значение с табличным значением 0,24 и выразите в процентах допущенную погрешность.

13. Если работало несколько групп, надо найти среднее значение по данным всех групп.

### Упражнение 9.

1. Определить количество теплоты, развиваемое в течение часа в лампочке накаливания, потребляющей 0,5 ампера, при напряжении в 110 вольт. *Отв. 47 520 кал.*

2. Какая сила тока требуется для нагревания в течение 10 минут 500 см<sup>3</sup> воды от 16 до 100° при помощи опущенной в воду спирали с сопротивлением в 6 омов, если потеря на лучеиспускание составляет 20%? *Отв. 7,7А.*

3. На зажимах дуги сварочной машины поддерживается напряжение в 60 вольт; сила проходящего тока равна 150 амперам. Найти сопротивление дуги и мощность тока. *Отв. 0,4 ома; 9 квт.*

4. Диаметр угольного электрода для сварки равен 30 мм, длина равна 300 мм. Найти сопротивление и расход энергии в секунду на угле, если сила тока равна 800 амперам ( $\rho = 40$ ). *Отв. 0,017 ома.*

5. Сечение медных проводов, подводящих ток к электроплавильной печи, равно 4800 мм<sup>2</sup>. Общая длина их равна 13,5 м. Найти их сопротивление. Какая мощность в них расходуется при силе тока в 8000 ампер?

6. Найти коэффициент полезного действия кипятильника ёмкостью в 2,5 л, если вода, налитая в него при 12°, закипит через 15 минут при силе тока в 10 ампер и напряжении в 120 вольт. Что стоит кипячение при цене 2,5 коп. за 1 гвт-ч? *Отв. 85%; 7,5 коп.*

7. В цепь включены последовательно медная, железная и никелиновая проволоки равной длины и диаметра. В какой из проволок разовьётся наибольшее количество теплоты? Какая из двух первых проволок нагреется на большее число градусов (плотность меди  $8,9 \frac{г}{см^3}$ , железа  $7,8 \frac{г}{см^3}$ ; удельная теплоёмкость меди 0,09; железа 0,11)?

8. Внешняя цепь состоит из медной проволоки. Будет ли изменяться нагревание одной половины её, если сильно охлаждать другую?

9. Чему равен коэффициент полезного действия мотора в 10 л. с., если он берёт ток в 80 ампер при напряжении в 110 вольт?

10. Электрический кипятильник с сопротивлением в 4 ома и ламповый реостат из 10 параллельно включённых ламп накаливания с сопротивлением по 200 омов каждая включены последовательно при помощи проводов в осветительную сеть с напряжением в 120 вольт. Через сколько времени можно нагреть 200 см<sup>3</sup> воды от 0 до 100°, если коэффициент полезного действия кипятильника равен 75%?

11. В цепь включены параллельно медная и железная проволоки равной длины и сечения. В какой из проволок разовьётся большее количество теплоты за одно и то же время?

12. Электрическая кастрюля берёт 6 ампер при 110 вольтах. В ней закипает 1 л воды в течение 15 мин. Сколько лошадиных сил тратится в приборе? *Отв. 0,9 л. с.*

**61. Тепловые ампер-вольтметры.** На тепловом действии тока основано устройство приборов для измерения силы тока и напряжения. Существенную часть тепловых приборов составляет платино-серебряная проволока, закреплённая на концах в точках (рис. 56) *A* и *B*. При пропускании через неё тока она нагревается и удлиняется; середина её оттягивается при помощи латунной проволоки *b*, на середину которой действует пружина *f*. Эти перемещения проволок приводят во вращение связанное

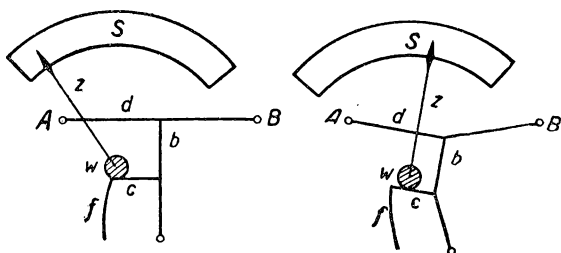


Рис. 56. Схема теплового амперметра.

с ними колёсико *w*; в результате его вращения стрелка-указатель *z* перемещается по шкале *S*.

Тепловой вольтметр отличается от амперметра того же типа лишь тем, что последовательно с проволокой в нём должно быть включено добавочное сопротивление, находящееся обычно внутри самого прибора.

**62. Термоэлектричество.** Мы рассмотрели переход электрической энергии в теплоту. Знакомство с различными видами энергии в предыдущих отделах курса показало, что в природе происходят взаимные преобразования одной формы движения материи в другую и обратно.

Возможен ли переход теплоты в энергию электрического тока? Этот переход был открыт Зеебеком ещё в 1823 г. Если спаять концами два проводника из разных металлов (рис. 57а и 57б) и один спай поддерживать при более высокой температуре, а другой — при более низкой, то по металлам проходит электрический ток, следовательно, между обоими спаями возникает ЭДС.

Электрический ток, полученный за счёт различного нагревания спаев двух проводников из различных металлов, называется термоэлектрическим током. Термоэлектрическая ЭДС для всех пар металлов ничтожно мала. Одна из наибольших ЭДС, для пары висмут — сурьма, равна 0,011 вольта при температуре спаев 0

и  $100^{\circ}$ ; в этой паре ток идёт через нагретый спай от висмута к сурьме.

Два металла, спаянные своими концами, образуют так называемый термоэлемент, если оба их спаия поддерживаются при разных температурах.

К. п. д. термоэлементов и термобатарей настолько низок, что они не получили технического значения как источники тока. Но термоэлементы находят себе применение для устройства очень чувствительных приборов, измеряющих силу тока, и для устройства термоэлектрических термометров.

**63. Термоэлектрический термометр.** Термоэлектрический термометр для измерения высоких температур состоит из двух

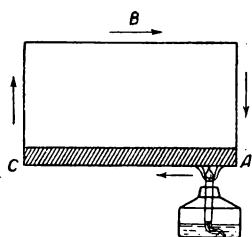


Рис. 57а. Схема термоэлемента.

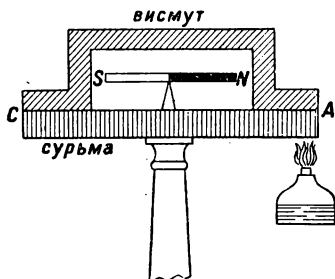


Рис. 57б. Термоэлемент.

проволок разнородных тугоплавких металлов, спаянных с одной стороны между собой и вставленных в длинную фарфоровую трубку (рис. 58); свободные концы обеих проволок соединяются с весьма чувствительным гальванометром. Когда фарфоровая трубка помещается в печь спаянными концами проволок, то этот спай нагревается, в то время как два других конца находятся при комнатной температуре. От разности температур спаев возникает ток, который и обнаруживается гальванометром. Гальванометр предварительно градуируется на градусы температуры.

Таким образом, по показанию гальванометра можно определить разность температур нагретого спаия (печи) и температуры комнаты. Прибор называется термоэлектрическим пирометром.

Подобный термометр, основанный на явлении термоэлектричества, только несколько другого устройства, применяется для измерения малых разностей температур.

**64. Вольтова дуга.** Использование тепловых действий тока идёт по двум основным линиям: техника нагревания и техника

освещения. К ним можно присоединить ещё устройство приборов для измерения температуры.

Электрическое освещение осуществляется в трёх формах: накаливание проводника в отсутствие кислорода, получение пламени в воздухе и свечение разреженного газа (§ 105).

Устройство лампочек накаливания<sup>1)</sup> известно из курса неполной средней школы.

На тепловом действии тока основан и другой мощный источник света и тепла — свечение под действием электрического тока угольных электродов. Это явление впервые в мире открыто русским учёным В. В. Петровым<sup>2)</sup> в 1802 г. Впоследствии оно было названо в честь Вольты, создавшего

1) Первую практически применимую лампу накаливания изобрёл в 1872 г. русский электротехник-изобретатель А. Н. Лодыгин (1847—1923). Под влиянием работ Лодыгина усовершенствованием ламп накаливания занялся и американский изобретатель Эдисон, ознакомившийся с образцами ламп Лодыгина. В 1890 г. Лодыгин построил лампы с тугоплавкой молибденовой и вольфрамовой нитью. Лампа с вольфрамовой нитью с тех пор нашла всеобщее применение. А. Н. Лодыгин много работал над созданием электропечей. Им также сконструирован летательный аппарат тяжелее воздуха.

2) Петров Василий Владимирович (1761—1834) — основоположник русской электротехники, действительный член Российской Академии наук.

В. В. Петров построил одну из самых больших гальванических батарей своего времени, состоящую из 4200 медных и цинковых кружков. С помощью этой батареи В. В. Петров проделал много различных исследований.

В. В. Петрову принадлежит заслуга открытия в 1802 г. свечения угольных электродов, по которым происходит электрический ток. Это открытие неверно приписывалось английскому учёному Дэви, так как Дэви указал на это явление только в 1810 г., т. е. на 8 лет после В. В. Петрова. Явление, открытое Петровым, позже было названо вольтовой дугой.

В. В. Петров, впервые получив вольтову дугу, тщательно исследовал её свойства. Он установил принципиальную возможность применения вольтовой дуги для целей освещения, а также для плавления и сварки металлов. Эти свойства вольтовой дуги широко используются в различных отраслях современной электротехники.

В. В. Петров впервые применил изоляцию проводного проводника. Он исследовал электризацию че-

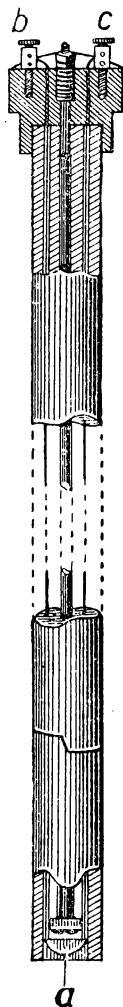


Рис. 58. Термоэлектрический термометр.

первый источник постоянного тока, вольтовой дугой. Вольтова дуга была применена в 1876 г. Яблочковым<sup>1)</sup> для освещения.

Чтобы получить дугу, надо присоединить провода к двум углям<sup>2)</sup>, привести их в соприкосновение и пропустить через угли ток в 10—12 ампер при напряжении в 40—75 вольт. На концах углей вследствие плохого соприкосновения получается наибольшее сопротивление. Следовательно на концах угля получится наибольшее выделение тепла и нагревание до высокой температуры. От этого нагревания

---

ловеческого тела при помощи „стегания“ и указал на возможность применения такой электризации для лечебных целей.

Ему принадлежат первые исследования особого свечения тел, называемого люминесценцией. Люминесценция нашла в настоящее время обширные технические применения.

В. В. Петров много работал над получением электричества от трения, над исследованием электрических явлений в газах и в пустоте, и для этих исследований он соорудил специальную электрическую машину. Свои сочинения: „Собрание физико-химических опытов“ и „Известие о гальвано-вольтовых опытах“ он писал на русском языке, для более широкого их распространения среди соотечественников. Он был неутомимым общественным деятелем, уделял много времени и труда средней школе.

1) Яблочков Павел Николаевич (1847—1894) великий русский электротехник — изобрёл в 1876 г. электрическую лампу невиданного до того образца, названную „свечой Яблочкова“. Он расположил параллельно друг другу два угольных стержня, разделённых изолирующей прокладкой. По мере сгорания углей „свеча Яблочкова“ становилась короче, а расстояние между углями не изменялось и лампа давала неизменно ровный свет.

Благодаря этому стали излишними все чрезвычайно громоздкие и ненадёжные в работе регуляторы и механизмы, лишавшие практического значения существовавшие до того различные конструкции электрических ламп.

„Свеча Яблочкова“ совершила полнейший переворот в технике электрического освещения.

Она с триумфом обошла важнейшие государства мира. Она на деле доказала практическую значимость электрического освещения. Это дало огромный толчок развитию всей электротехники вообще и, в частности, технике переменного электрического тока, так как применение переменного тока для питания „свечи Яблочкова“ оказалось значительно удобнее постоянного тока. По инициативе П. Н. Яблочкова стали конструироваться и производиться электрические машины переменного тока.

Значительны заслуги П. Н. Яблочкова и в разработке конструкций различного рода динамомашин, одна из которых носила название „динамомашинна Яблочкова“, а также в создании гальванических элементов и аккумуляторов. В частности, он построил элемент, в котором в качестве источника тока непосредственно использовалась химическая реакция горения.

П. Н. Яблочков создал особый индукционный прибор, являющийся прообразом электрического трансформатора.

2) Дугу можно получить и без углей между концами проводов.



окружающий воздух становится проводником (причина проводимости выясняется в § 100). Если теперь несколько отодвинуть угли от другого, то ток не прекращается и при раздвинутых углях. Развитие тепла становится настолько большим, что газы раскаляются, и между



А. Н. Лодыгин  
(1847—1923).



П. Н. Яблочков  
(1847—1894).

концами углей образуется выгнутая кверху (при горизонтальном положении углей) дуга из раскалённых газов, в которой носятся и раскалённые частицы угля, — это и есть вольтова дуга (рис. 59). Исследования дуги показали:

1. Положительный уголь при постоянном токе сгорает быстрее отрицательного, почему он должен делаться толще.

2. На положительном угле сгорание идёт неравномерно в разных точках: середина сгорает быстрее, отчего на нём образуется углубление, называемое **кратером**; отрицательный, наоборот, при сгорании получает заострённый конец.

3. Температура кратера обычной вольтовой дуги с угольными электродами в воздухе около  $4000^{\circ}$ , отрицательного угля — около  $3000^{\circ}$ . В соответствии с этим кратер излучает  $85\%$ , отрицательный уголь  $10\%$ , сама дуга  $5\%$  всего света. Расход энергии в вольтовой дуге доходит до 0,6 ватта на свечу (§ 168).

4. Если пропускать переменный ток через угли, то сгорание происходит равномерно.

5. Если внутрь углей вставлять стержни из прессованных солей бария, стронция, кальция, то длина дуги при том же напряжении растёт, света получается больше (расход 0,3 ватта

на свечу), возникает цветная окраска; такие угли получили название эффектных.

Чтобы дуга не прерывалась, необходимо постепенное сближение углей по мере сгорания. В фонарях для освещения сбли-

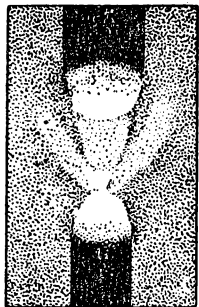


Рис. 59. Вольтова дуга.

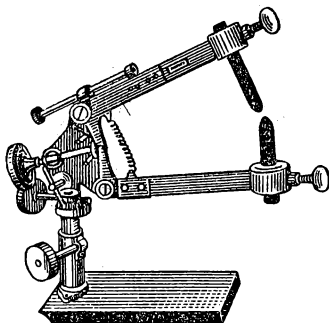


Рис. 60. Ручной регулятор вольтовой дуги.

жение производится автоматическим регулятором, соединённым с дугой; в проекционных фонарях — ручным регулятором (рис.60).

Вольтова дуга, образованная при особых условиях, дала возможность достигнуть очень высокой температуры. В 1915 г. Луммеру удалось образовать дугу в водородной среде под давлением в 22 атмосферы. Тогда яркость дуги увеличилась в 18 раз сравнительно с нормальной, а температура достигла (по вычислениям)  $7500^{\circ}$ . При этих условиях уголь благодаря высокому давлению плавился, а не переходил сразу в паробразное состояние, как при нормальном давлении.

**65. Электрические печи.** Вторая область применения теплового действия электрического тока — техника нагревания.

Не останавливаясь на электрических нагревательных приборах домашнего обихода, обратимся к электрическим нагревательным установкам производственного характера.

Электрические печи устраиваются трёх видов: печи сопротивления, печи дуговые и индукционные. Первые используют тепло, образующееся в проводниках по закону Джоуля-Ленца. Вторые используют тепло, даваемое вольтовой дугой. Принцип действия индукционных печей будет выяснен в § 113.

Электрические печи применяются для нагрева обрабатываемых предметов и плавки (рис. 61).

В металлопромышленности они применяются для закалки стали, цементирования, для плавки металлов, в керамической и стеколь-

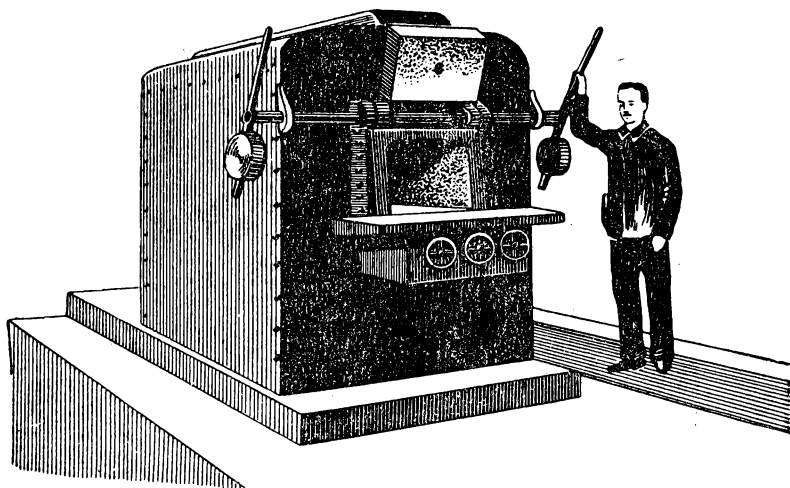


Рис. 61. Внешний вид электрической печи сопротивления.

ной промышленности — для эмалирования, обжигания изделий, плавки стекла.

**66. Дуговые печи.** Образую вольтовую дугу внутри пространства, окружённого огнеупорными кирпичами и другими изолято-

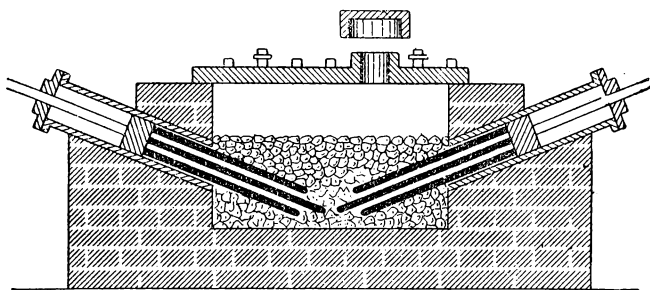


Рис. 62. Дуговая электрическая печь.

рами тепла (рис. 62), получают так называемые электрические дуговые печи с температурой до  $4000^{\circ}$ . Эти печи применяются для научных целей — для исследования свойств тел при высоких температурах, а также для технических целей — для получения веществ, добываемых при высоких температурах.

В электрической печи все тугоплавкие элементы получают в жидком состоянии, кроме углерода, который из твёрдого состояния переходит прямо в пар.

Главнейшие технические применения печи следующие:

1. Получение соединения кальция и углерода — кальция-карбида — путём восстановления негашёной извести углем. При действии воды на кальций-карбид выделяется газ ацетилен, применяемый для освещения (ацетиленовые фонари) и для получения высоких температур в смеси с кислородом (ацетиленовая сварка и резка металлов).

2. Получение соединения кремния и углерода — карборунда — вещества очень большой твёрдости; карборунд употребляется для изготовления точильных и шлифовальных камней.

3. При температуре электрической печи получают из азота воздуха окислы азота, а из них — азотная кислота и её соли. Последние же находят весьма широкое применение в сельскохозяйственной технике как удобрение.

Дуговые печи для плавки стали имеют очень разнообразное устройство. В них применяются угли, между которыми образуется дуга, теплом которой производится плавление шихты.

Коэффициент полезного действия дуговых печей доходит до

78%; расход энергии около 700 киловатт-часов на тонну литья.

**67. Электрическая сварка.** Сварка внесла переворот в металлообрабатывающую промышленность. Электрическая сварка применяется как в новых, так и в ремонтных работах. В новых работах она находит применение для сварки листов и полых тел, вытесняя старую заклёпочную скрепу, для сварки листов и стержней встык, для сварки рельсов, проводов и т. д.

Особенное значение имеет сварка в ремонтных работах, так как позволяет восстановить изношенные и повреждённые части (рис. 63), которые без этого выбрасывались бы в лом и заменялись бы новыми частями.

*Сварка даёт большую экономию в материале, в стоимости работ, во времени исполнения и обеспечивает безусловную прочность.*

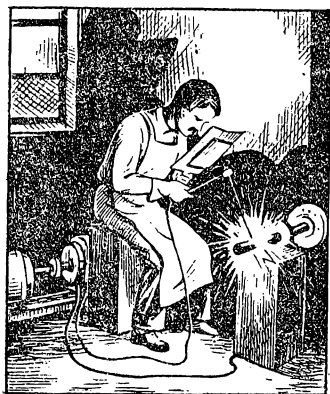


Рис. 63. Электросварка.

Электросварка производится двумя различными способами — дуговым и контактным. Первый из этих способов изобретён выдающимися русскими инженерами Н. Г. Славяновым<sup>1)</sup> и Н. Н. Бенардосом<sup>2)</sup>.

При дуговом способе свариваемая деталь соединяется с отрицательным полюсом генератора. К ней подносится электрод из угля или такого же металла, как и деталь. Образующаяся вольтова дуга расплавляет металл, заполняющий в жидком виде существующую трещину (рис. 64).

При контактном способе обе части свариваемой вещи делаются электродами и плавление их вызывается джоулевым теплом, развиваемым в месте наибольшего сопротивления — на стыке свариваемых частей.

**68. Электрические термометры сопротивления.** По мере развития металлургии, по мере расширения выплавки высококачественных сталей и различных новых сплавов, точное измерение температуры, необходимой для обеспечения высокого качества материала, выдвигается на одно из первых мест среди важнейших проблем производства. Наиболее надёжный способ измерения температуры печи даёт электриче-



Н. Г. Славянов (1854—1897).

---

<sup>1)</sup> Славянов Николай Гаврилович (1854—1897) работал в качестве металлурга на уральских заводах. Он глубоко интересовался новой в то время областью техники — электротехникой. Работая на пушечных заводах, он изобрёл в 1888—1890 гг. и практически применил электросварку. Он построил специальный сварочный аппарат. Его изобретение распространилось по всем странам под названием „*способа Славянова*“. В „способе Славянова“ электрическая дуга образуется между самой деталью и электродами того же металла, что и свариваемая деталь.

<sup>2)</sup> Бенардос Николай Николаевич (1842—1905) был выдающимся и разносторонним изобретателем. Им изобретены поворотный подъёмный однолопастный гребной винт, тормоз для железных дорог, различные электрические приборы и т. д. Им открыт свой собственный метод дуговой электросварки, в котором электрическая дуга образуется между свариваемой деталью и угольным электродом. Бенардос предназначал этот способ также и для резки металлов.

Н. Н. Бенардос тщательно и всесторонне разработал своё изобре-

ский термометр. Электрические термометры применяются и для измерения невысоких температур, обыкновенно обслуживаемых ртутными термометрами, в тех случаях, когда место наблюдения показания температуры отдалено от места измерения самой температуры.

Устройство электрических термометров сопротивления основано на изменении сопротивления проводника с изменением его температуры по формуле:

$$R = \frac{\rho l}{S} \cdot (1 + \alpha t).$$

Устройство электрического термометра сопротивления изображено на рисунке 65.

В качестве сопротивления в электрических термометрах большей частью используют платиновую спираль, которую вплавляют в кварцевую

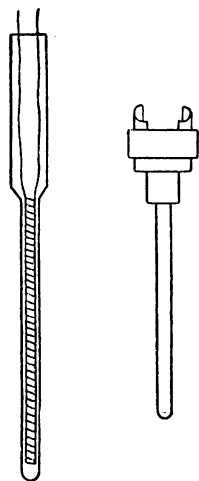


Рис. 65. Вид электрического термометра.

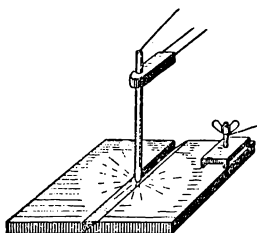


Рис. 64. Сварка по способу Славянова.

трубку, заключённую в металлический футляр для защиты от повреждений.

### Упражнение 10.

1. От предохранителей идут два медных провода длиной по 1 м и сечением в  $1,5 \text{ мм}^2$ ; в конце их включены лампы накаливания. Напряжение на вводных зажимах — 120 вольт. Провода защищены предохранителями, плавящимися при 7,5 ампера. Расплавятся ли предохранители, если произойдёт короткое замыкание перед самыми лампами (на расстоянии 1 м от предохранителя)?

2. От станции к зданию, в котором включено параллельно 200 ламп накаливания, потребляющих каждая 0,5 ампера при напряжении в 110 вольт, проведены на расстоянии 1 км два медных провода сечением в  $25 \text{ мм}^2$ . Какое количество теплоты выделяется в проводнике в 1 секунду? Какой процент от общей мощности, развиваемой во всей

тении. Он показал возможность его применения под водой; разработал сварку в струе газа; предложил систему магнитного управления сварочной дугой. Он изобрёл несколько систем автоматов для сварки.

Эти изобретения Н. Н. Бенардоса нашли всеобщее признание и широкое применение в технике. На его работах учились иностранные инженеры, специально для этого приезжавшие в Петербург.

цепи, составляет мощность, идущая на нагревание подводящих проводов? Какое количество теплоты стало бы выделяться, если бы уменьшить сопротивление подводящих проводов, увеличив их сечение до 35 мм<sup>2</sup>? Какой процент составляла бы потеря на их нагревание в этом случае? Какова выгода при плате в 25 коп. за киловатт-час? Сколько пошло бы лишнего материала провода во втором случае сравнительно с первым?

*Отв.* 3360 кал; 56%; 2400 кал;  $\approx 48\%$ ;  $\approx 0,03$  коп. в 1 сек.; 178 кг.

3. От источника тока, имеющего напряжение в 250 вольт и мощность 10 киловатт, передаётся энергия на расстоянии 8 км. Рассчитать потери энергии на нагревание за год для сечения в 25, 35, 50, 70, 95 мм<sup>2</sup>, если ток проходит в среднем 10 часов в сутки.

4. Если бы в предыдущей задаче энергию пришлось передавать на расстояние в 10 км, то какое сечение провода надо было бы выбрать, чтобы потеря энергии на нагревание составила тот же процент, что и при сечении в 70 мм<sup>2</sup>?

5. Длина платиновой проволоки термометра сопротивления равна 60 мм и диаметр равен 0,3 мм. Найти её сопротивление при 0° и предельной температуре пользования термометром в 900°.

**Литература.** Капцов Н. А., Яблочков.

### III. МАГНИТНОЕ ПОЛЕ.

**69. Магнитное действие тока.** Электрический ток производит магнитное действие. На металлургических заводах можно видеть электромагнитные краны, предназначенные для подъёма и переноса железных, стальных, чугунных материалов и изделий. Этот электромагнитный кран (рис. 66) состоит из железного сердечника, на котором намотан провод. Когда по проводу проходит электрический ток, кран притягивает к себе железные и стальные предметы, как это показано на рисунке. По прекращении тока притяжение также прекращается.

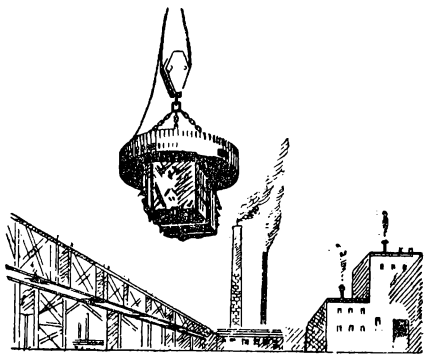


Рис. 66. Электромагнитный кран.

Изучение магнитного действия электрического тока можно вести при помощи тех же средств, какие применяются при изучении постоянных магнитов.

Поэтому предварительно вспомним основные свойства постоянных магнитов.

**70. Основные свойства постоянных магнитов.** Магнитами называются тела, притягивающие к себе железные и стальные предметы <sup>1)</sup>.

Магниты бывают естественные и искусственные. Естественные магниты — куски руды магнитного железняка, состоящей из закиси-окиси железа ( $Fe_3O_4$ ). Наиболее известные залежи этой руды в нашем Союзе — на Урале (горы Благодать, Магнитная, отсюда название города Магнитогорск) и в Курской области.

Искусственные магниты изготавливаются в виде прямых или подковообразных полос из стали (рис. 67).

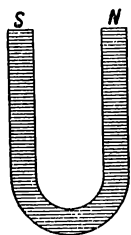


Рис. 67. Прямой и подковообразный магниты.

Кроме железа и его производных — стали и чугуна, магнитные свойства обнаруживают в более слабой степени металлы: кобальт, никель и различные сплавы. В последнее время русскими учёными Займовским и Львовым составлен сплав, обладающий особенно сильными магнитными свойствами. Этот сплав назван ими „магнико“; он состоит из никеля (13,5%), алюминия (8%), кобальта (24%), меди (3%) и железа.

В магните притягательное действие обнаруживается равномерно по всей поверхности, а сосредоточивается в двух местах, называемых полюсами и разделённых линией, по которой не проявляется притягательное действие и которая называется нейтральной (рис. 68).

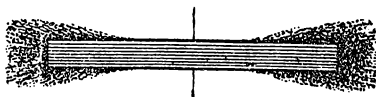


Рис. 68. Полюсы и нейтральная линия магнита.

Оба полюса каждого магнита производят на один и тот же полюс второго магнита прямо противоположные действия, следовательно, магнетизмы полюсов каждого магнита оказываются разнородными; один полюс называется северным (положительным) и обозначается буквами *N* или *n*, другой — южным (отрицательным) и обозначается буквами *S* или *s*.

Делением магнита на части невозможно получить кусок магнита с одним полюсом. *Всякая часть магнита представляет собою*

<sup>1)</sup> Магнетизм проявляется не только в притяжении железных и стальных предметов, но и в намагничении их, в изменении размеров тел при намагничении и в других явлениях.

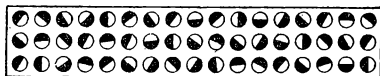


*магнит с двумя полюсами.* На этом основании магнетизм рассматривается как свойство молекул (молекулярный магнетизм) (рис. 69).

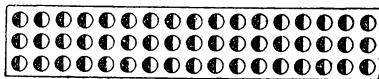
Всякий подвешенный магнит или подпертый так, что он может свободно вращаться вокруг вертикальной оси, принимает в каждом месте Земли совершенно определенное направление. Вертикальная плоскость, проходящая через полюсы такого магнита, образует на поверхности Земли сечение, называемое магнитным меридианом.

Почти во всех местах Земли магнитный меридиан не совпадает с географическим, отклоняясь от него в ту или другую сторону на разные углы (§ 77).

Для установления магнитного меридиана удобно пользоваться так называемой магнитной стрелкой — тонким магнитом, изготовленным в виде вытянутого ромба и свободно вращающимся вокруг вертикальной оси (рис. 70).



*a*



*b*

Рис. 69.

Беспорядочное (*a*) расположение молекулярных магнитов в немагнитном теле и упорядоченное (*b*) при намагничении (§ 84).

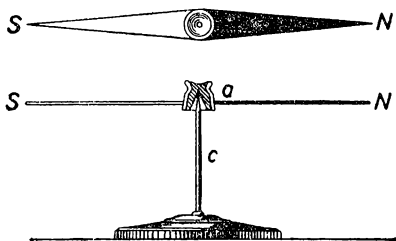


Рис. 70. Магнитная стрелка.

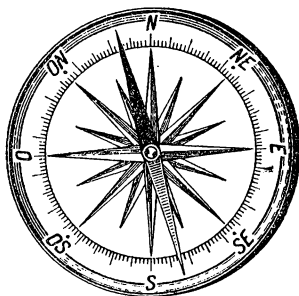


Рис. 71. Компас.

Так как один полюс магнитной стрелки направлен к северной части горизонта, а другой — к южной, то первый полюс и получил название „северного“, а второй — „южного“. Поэтому и в любом другом магните полюс, однородный с северным полюсом

магнитной стрелки, называется северным, противоположный — южным.

Магнитная стрелка входит в состав компаса — прибора, позволяющего по направлению магнитной стрелки определить направление стран света (рис. 71).

То обстоятельство, что магнитная стрелка повсеместно принимает определённое направление, объясняется тем, что сама Земля есть магнит (земной магнетизм, § 77).

**71. Закон Кулона для взаимодействия полюсов.** Опыты с двумя магнитными стрелками показывают, что *одноимённые полюсы отталкиваются, разноимённые притягиваются.*

Кулон первый изучил с количественной стороны это взаимодействие и тем положил основание точному научному исследованию в этой отрасли физики.

Закон Кулона может быть продемонстрирован на следующей установке (рис. 72). Тонкий намагниченный стержень  $n_1s_1$  (вязальная спица) укреплен так, что он может вращаться вокруг горизонтальной оси. Другой такой же магнит укреплен

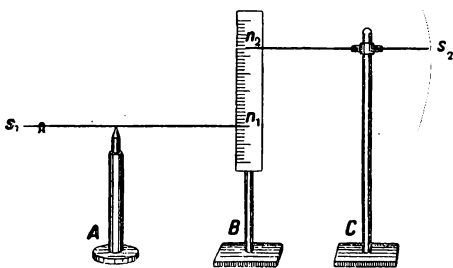


Рис. 72. Прибор для доказательства закона Кулона.

в вертикальном штативе, вдоль которого он может перемещаться. Если поместить однородные полюсы  $n_1$  и  $n_2$  обоих магнитов на одной вертикали, как показано на рисунке, то вращающийся магнит отклонится. Помещая на другую сторону магнита груз, можно вернуть вращающийся стержень в горизонтальное положение. В этом случае вращательный момент помещённого груза уравнивает вращательный момент силы взаимодействия полюсов. Из равенства моментов и из измерения плеч можно вычислить самую силу взаимодействия.

Меняя расстояние между полюсами, измеряемое по вертикальному масштабу, можно найти зависимость между силой и расстоянием при одних и тех же полюсах.

Составляя стержень из одной, двух, трёх одинаково насаженных спиц и помещая их на одном и том же расстоянии от закреплённого магнита, можно найти зависимость между силой взаимодействия и количеством магнетизма одного магнитного полюса при неизменном расстоянии обоих магнитов. Вставляя две, три намагниченные спицы в штатив, можно изучить влияние количества

магнетизма второго магнита на один и тот же полюс подвижного магнита и при одном и том же расстоянии.

Эти опыты заставляют ввести понятие о количестве магнетизма в полюсе, или о магнитной массе <sup>1)</sup>).

Закон Кулона для взаимодействия полюсов получает следующий вид:

*Два точечных магнитных полюса действуют друг на друга с силой, прямо пропорциональной произведению магнитных масс полюсов и обратно пропорциональной квадрату расстояния между ними.*

Если обозначить массу одного полюса через  $m$ , массу другого — через  $m_1$ , расстояние полюсов — через  $r$ , силу взаимодействия — через  $F$  и множитель пропорциональности — через  $k$ , то закон может быть выражен следующей формулой:

$$F = \frac{km m_1}{r^2}.$$

Относительно знака силы имеют место те же соображения, которые высказаны для силы взаимодействия двух электрических зарядов (§ 6).

**72. Единица магнитной массы.** Чтобы установить единицу магнитной массы, положим, что взаимодействуют точечные полюсы с одинаковыми массами  $m = m_1$  и что  $r = 1$  см,  $F = 1$  дине и  $k = 1$ ; тогда за единицу магнитной массы принимается такая магнитная масса, которая действует в пустоте на равную ей магнитную массу на расстоянии 1 см с силой в 1 дину.

Эта единица называется магнитной единицей массы в системе CGS и обозначается через CGSM магнитной массы.

При таком выборе единиц формула получает вид:

$$F = \frac{m m_1}{r^2},$$

откуда при данных условиях:

$$1 \text{ дина} = \frac{1 m^2}{1^2 \text{ см}^2}, \text{ или } m = \sqrt{\text{дин} \cdot \text{см}^2}.$$

**73. Магнитное поле. Напряжённость поля.** Подобно электрическому заряду магнитный полюс производит действия на тела, находящиеся на расстоянии от него: притягивает железные предметы, вращает магнитную стрелку. Это действие магнита вызывается тем, что вокруг магнита образуется магнитное поле.

---

<sup>1)</sup> Как будет выяснено в § 76, в действительности не существует никаких магнитных масс; это название неудачно, но не заменено другим.

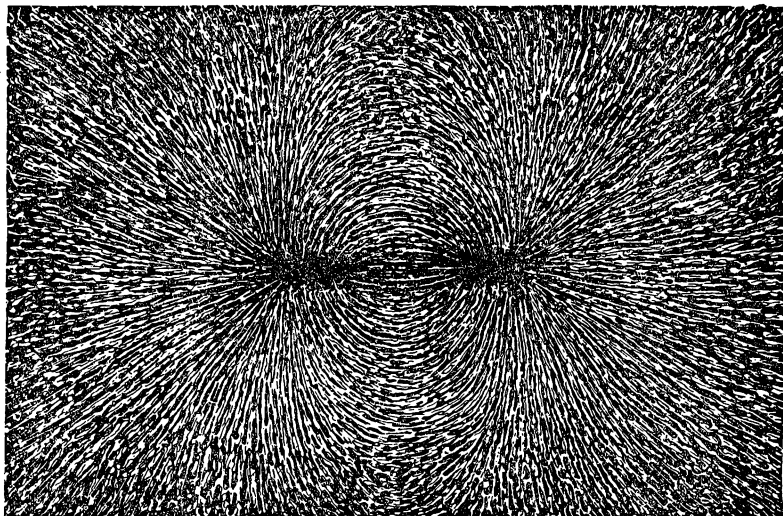


Рис. 73. Силовые линии постоянного прямого магнита.

Для сравнения различных полей вводится особая величина, называемая напряжённостью поля.

*Напряжённость поля есть величина, измеряемая силой, с которой поле действует на единицу положительной магнитной массы.*

Если обозначить напряжённость магнитного поля через  $H$ , то:

$$H = \frac{F}{m_1}; \text{ для точечной магнитной массы: } H = \frac{m}{r^2}.$$

Единица напряжённости в системе CGSM называется эрстед.

*Эрстед есть напряжённость такого поля, которое действует на единицу магнитной массы с силой в 1 дину.*

**74. Силовые линии магнитного поля.** Изучить магнитное поле магнита — это значит указать для каждой точки поля направление действующих там сил. Это можно было бы сделать, размещая в поле маленькие магнитные стрелки. Магнитные стрелки тем точнее показывали бы направление сил, чем они были бы меньше. Наилучшими показателями являются мелкие железные опилки, которые в магнитном поле сами становятся магнитами.

Посыпая экран, под которым лежит прямой магнит, железными опилками, получают определённое расположение опилок (рис. 73).

Линии, по которым располагаются железные опилки в магнитном поле, называются силовыми линиями магнитного поля.

Силовым линиям приписывают направление: *силовая линия считается выходящей из северного полюса магнита и входящей в южный.*

Тогда сила, с которой поле действует на северный, или положительный, полюс в какой-нибудь точке поля, направлена по касательной к силовой линии; сила же, с которой поле действует на южный, или отрицательный, полюс, направлена также по ка-

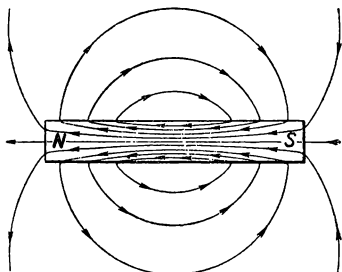


Рис. 74. Схема расположения силовых линий прямого магнита.

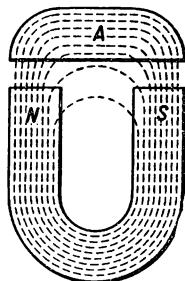


Рис. 75. Силовые линии подковообразного магнита.

А — железный якорь.

сательной, но в сторону, противоположную направлению силовой линии.

Исследования показывают, что поле существует и внутри магнита, так что и внутри магнита проходят силовые линии.

Таким образом, *силовые линии магнитного поля являются замкнутыми кривыми* <sup>1)</sup>.

Рисунок 74 даёт схематическое изображение силовых линий поля прямого магнита.

Рисунок 75 даёт расположение силовых линий подковообразного магнита.

Силовые линии между разноимёнными полюсами двух прямых магнитов, расположенных по одной прямой, представлены на рисунке 76.

Вспомним, что такие полюсы притягиваются; при притяжении силовые линии укорачиваются, сокращаются. Явление происходит

<sup>1)</sup> Кажущийся разрыв силовых линий на экране объясняется малой силой поля, недостаточной для перемещения опилок на дальнем расстоянии.

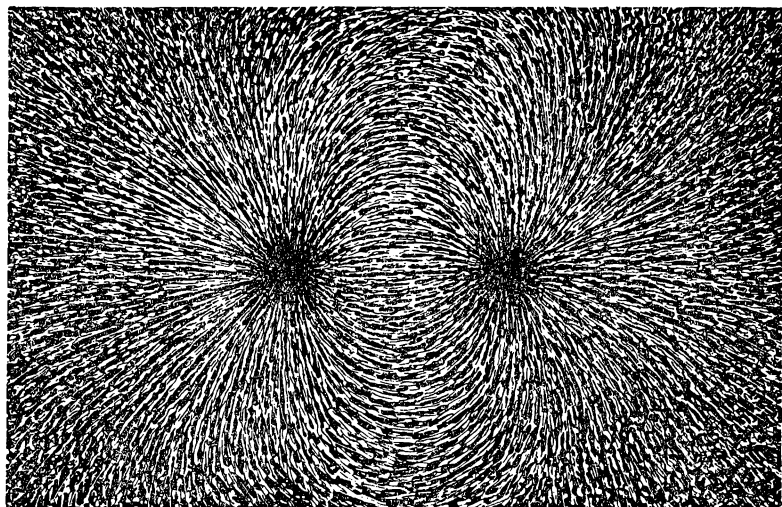


Рис. 76.

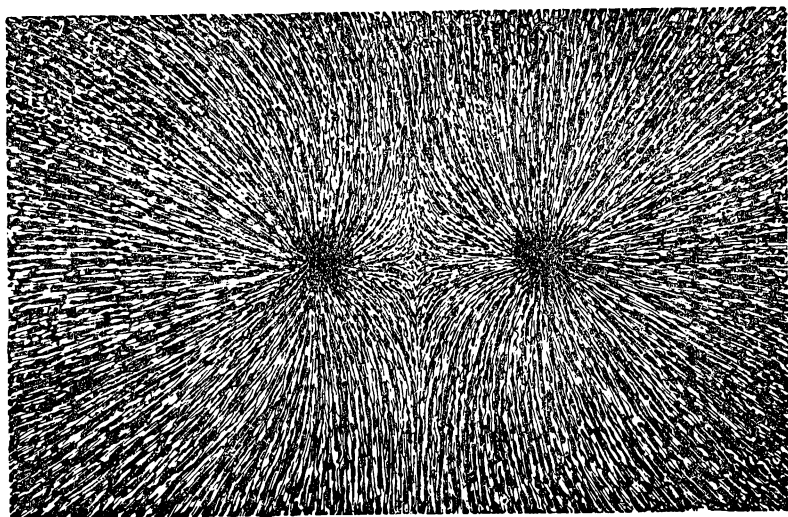


Рис. 77.

так, как будто бы вдоль силовой линии имелось натяжение, как в резиновом шнуре.

Поле между одноимёнными полюсами двух прямых магнитов, расположенных на одной прямой, показано на рисунке 77.

Такие полюсы отталкиваются; при этом отталкивании силовые линии, идущие по одному направлению, удаляются друг от друга, как бы также отталкиваются. Явление происходит так, как будто бы поперёк силовых линий существовало боковое давление, опять-таки подобно давлению в сжимающемся резиновом шнуре.

Изображая состояние поля при помощи силовых линий и приписывая им натяжение вдоль них и боковое давление перпендикулярно к ним, Фарадей (1791—1867) дал очень удобный приём не только описывать известные явления, но и предсказывать новые.

При взгляде на расположение опилок в магнитном поле видно, что в различных местах поля густота их расположения, т. е. число линий, проходящих через  $1\text{ см}^2$  площади перпендикулярно к площади, различна. Густота больше вблизи полюсов и меньше вдали от них. Также напряжённость больше вблизи полюсов и меньше вдали от них. Таким образом, густота расположения силовых линий может служить характеристикой величины напряжённости поля в этом месте.

Магнитное поле, в котором напряжённости во всех точках одинаковы по величине и направлению, называется однородным.

Такое поле посредине между разноимёнными плоскими и параллельными полюсами при значительной величине их поверхности и при равных магнитных массах.

В таком поле силовые линии могут быть представлены параллельными равно отстоящими прямыми.

**75. Магнитная индукция.** Так же, как и для электрического поля, рассмотрим действие магнитного поля на вводимые в него тела.

Если укрепить ненамагниченный стержень из мягкого железа в деревянном штативе (рис. 78) и поднести к нему на некоторое расстояние сверху магнит (т. е. ввести железо в магнитное поле), то железный стержень получает способность притягивать опилки, гвозди и другие мелкие железные тела. В присутствии магнита кусок железа сам становится магнитом. По удалении магнита

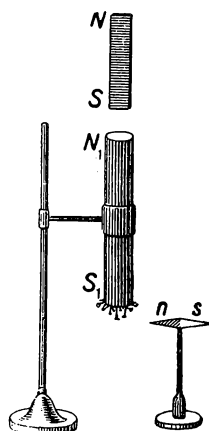


Рис. 78. Намагничивание через индукцию.

мягкое железо размагничивается. Если в предыдущем опыте при том положении магнита, которое изображено на рисунке 78, поднести к железу магнитную стрелку, то направление её вращения показывает, что на конце железа, ближайшем к южному полюсу магнита, возникает северный полюс, а на отдалённом — южный полюс. При поворачивании магнита северным полюсом к железу на ближайшем к северному полюсу конце железа возникает южный полюс, на отдалённом — северный.

Такое же возбуждение магнетизма возникает и в куске стали.

Возбуждение магнетизма в железе и стали при приближении магнита происходит и в том случае, если помещать между магнитом и стержнем листы стекла, картона, дерева, меди и других материалов (кроме намагничиваемых, главным образом кроме железа).

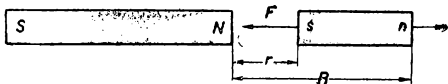


Рис. 79. Объяснение притяжения тел магнитом.

Все предыдущие опыты показывают, что при приближении магнита к куску мягкого железа

или стали в последнем „наводится“ магнетизм, причём на конце, ближайшем к полюсу магнита, „наводится“ полюс разноимённый, на конце отдалённом — полюс одноимённый с влияющим.

Возбуждение магнетизма в кусках железа и стали, введённых в магнитное поле, называется магнитной индукцией, или магнитным влиянием. По удалении железа или стали из магнитного поля магнетизм мягкого железа легко исчезает, магнетизм стали сохраняется, и требуется значительное магнитное влияние в противоположном направлении для его уничтожения.

Магнетизм, сохраняющийся в теле по удалении его из магнитного поля, называется остаточным магнетизмом.

Остаточный магнетизм объясняют существованием в теле так называемой задерживающей (коэрцитивной) силы. Так как задерживающая сила в стали гораздо больше, чем в мягком железе, то можно сказать, что остаточный магнетизм в стали устойчивее, чем в железе; поэтому постоянные магниты делаются из стали.

Проделанный опыт позволяет ответить на вопрос, как происходит притяжение магнитом железа и стали. Из опыта видно, что при самом внесении в магнитное поле куска железа или стали он становится магнитом, причём ближайшие полюсы — наводящий и наведённый — всегда разноимённые. Полюс *N* (рис. 79) наводящего магнита притягивает наведённый полюс *s* и отталкивает



наведённый полюс  $n$ ; но так как расстояние  $r$  от  $N$  до  $s$  меньше расстояния  $R$  от  $N$  до  $n$ , а действие уменьшается с расстоянием, то притяжение больше отталкивания, и кусок притягивается к магниту.

Сравнивая ход силовых линий внутри железа (рис. 80а) с ходом силовых линий в том же месте в воздухе при отсутствии железа, можно видеть, что силовой поток, т. е. число силовых линий, через поперечное сечение железа  $AB$  будет гуще, чем силовой поток через такое же сечение в воздухе (рис. 80б).

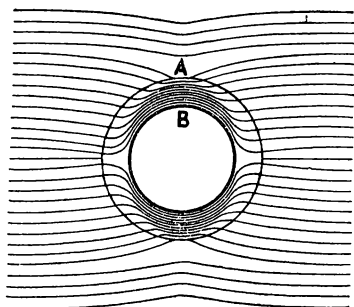


Рис. 80а. Силовые линии идут почти целиком внутри железа.

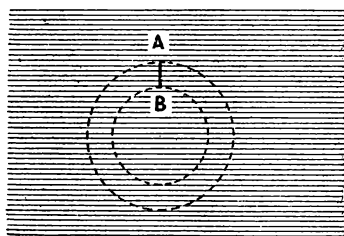


Рис. 80б.

Под действием магнита, образующего поле, железо намагничивается по индукции и само создаёт магнитное поле. Поэтому около того места, где находится железо, оба поля складываются и число силовых линий, проходящих через  $1\text{ см}^2$ , увеличивается.

Подобное же явление, только в гораздо более слабой степени, наблюдается в стали, чугуне, никеле, кобальте, в сплавах марганца и меди или марганца и алюминия, в сплаве „магнико“.

Отношение числа магнитных силовых линий, проходящих через какую-либо площадь в присутствии данного вещества, к числу магнитных силовых линий, проходящих через такую же площадь в отсутствие этого вещества (в пустоте), определяет особую для каждого вещества величину, называемую магнитной проницаемостью.

Для большинства веществ их магнитная проницаемость близка к единице. Только для железа, никеля, кобальта — так называемых ферромагнитных веществ — она значительно больше единицы, в особенности она велика для железа. Впервые магнит-

ную проникаемость железа изучил знаменитый русский учёный А. Г. Столетов (см. § 231)<sup>1)</sup>.

Первоначальные опыты над притяжением магнитом железных тел могли навести на мысль, что действие магнита обнаруживается на расстоянии без посредства промежуточных тел. Это предположение подтвердилось с первого взгляда тем наблюдением, что магниты взаимодействуют друг с другом и в пустоте, т. е. когда они помещены в пространстве, откуда выкачан воздух. В соответствии с существовавшим в то время взглядом, что тяготение действует непосредственно между телами на расстоянии без участия промежуточной среды, установилось подобное же представление о существовании такого же „дальнодействия“ и между магнитами, и между электрическими зарядами.

Фарадей отвергнул представление о дальнодействии и выдвинул на первое место значение среды при возникновении взаимодействия тел.

**76. Сравнение силовых линий магнитного и электрического полей.** Научившись исследовать силовые линии электрического и магнитного полей, естественно поставить вопрос о сравнении их между собой. По внешности они имеют много сходства. Так, ход силовых линий между двумя электрическими зарядами — разноимёнными и одноимёнными (рис. 12, 13) — напоминает расположение линий между двумя такими же магнитными полюсами (рис. 76, 77). Но по существу между этими двумя системами линий имеется глубокое различие. Электрические силовые линии начинаются и оканчиваются на электрических зарядах, между тем как магнитные силовые линии — всегда замкнутые кривые (§ 74). В то время как на конце электрической силовой линии находятся действительно существующие электрические заряды, все точки замкнутой магнитной силовой линии совершенно одинаковы: на них нигде нет магнитных зарядов — количеств магнетизма. Количества магнетизма являются воображаемыми; они введены только ради удобства при описании явления. Полюсы магнита являются не местами средоточия количества магнетизма, а местами, где магнитные силовые линии переходят из среды с одними магнитными свойствами в среду с другими магнитными свойствами, претерпевая на границе преломление.

Таким образом, нет реально существующих количеств магнетизма, а существует только магнитное поле.

---

<sup>1)</sup> Как установил А. Г. Столетов, магнитная проникаемость ферромагнитных веществ не является постоянной величиной: она зависит от напряжённости того поля, в которое введено тело.

**77. Земной магнетизм.** Как известно, магнитная стрелка, свободно вращающаяся вокруг вертикальной оси, в каждом месте Земли занимает определённое направление, но это направление меняется от места к месту. Направление магнитной оси<sup>1)</sup> такой стрелки в каждом месте Земли определяет направление магнитного меридиана данного места. Угол, составляемый магнитным меридианом  $SN$  с географическим  $CD$ , называется углом магнитного склонения. Сама магнитная стрелка, свободно вращающаяся в горизонтальной плоскости вокруг вертикальной оси, называется магнитной стрелкой склонения. Склонение называется восточным, если северный полюс стрелки отклоняется к востоку от географического меридиана, и западным, если — к западу (рис. 81). Линия, соединяющая все точки земного шара, в которых склонение равно нулю, называется нулевым магнитным меридианом. Он делит земной шар на два полушария с восточным и западным магнитными склонениями. Существование нулевого магнитного меридиана было открыто Колумбом в 1492 г.

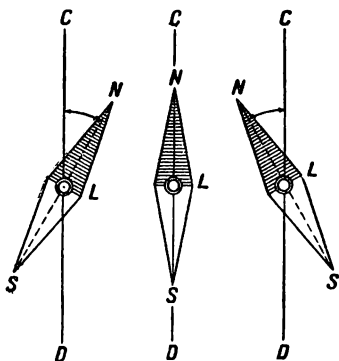


Рис. 81. Углы магнитного склонения.

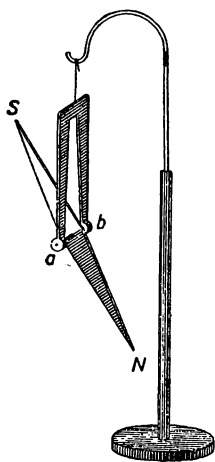


Рис. 82. Стрелка наклоения.

Магнитная стрелка, помещённая на горизонтальную ось, проходящую через её центр тяжести, называется стрелкой наклоения (рис. 82); её магнитная ось образует угол с горизонтальным направлением. Когда стрелка помещена по направлению магнитного меридиана, то в этом положении её угол с горизонтом называется углом магнитного наклоения. Наклоение называется северным, когда северный полюс стрелки лежит ниже её оси вращения, и южным, когда ниже оси вращения опускается южный полюс (рис. 83). Линия,

<sup>1)</sup> Магнитной осью называется прямая, соединяющая точки полюсов магнита.

соединяющая все точки Земли, в которых наклонение равно нулю, называется магнитным экватором. Магнитный экватор лежит недалеко от географического и делит земной шар на два полушария: с северным и южным наклонениями.

Так как склонение и наклонение магнитных стрелок наблюдается повсеместно на земной поверхности, то это указывает на повсеместное существование магнитного поля. Это поле называется земным магнитным полем.

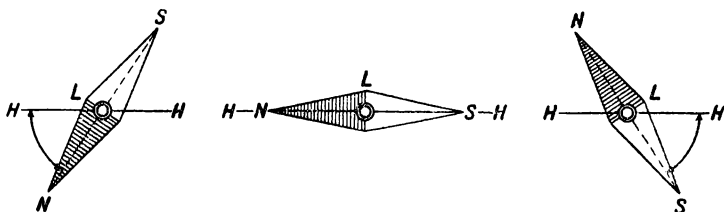


Рис. 83. Углы магнитного наклонения.

Происхождение земного магнетизма неизвестно. Во всяком случае оно не зависит от магнетизма пород, входящих в состав земной коры, которые обладают ничтожным намагничиванием и имеют очень высокую температуру <sup>1)</sup> в глубоких слоях. Напряжённость земного магнитного поля направлена в плоскости магнитного меридиана под углом наклонения к горизонту; она различна для разных мест Земли. Силовые линии земного магнитного поля для каждого места Земли можно принять за прямые, лежащие в плоскости магнитного меридиана параллельно стрелке наклонения. Для каждого места Земли магнитное земное поле однородно.

Те точки земного шара, где стрелка наклонения стоит вертикально, называются магнитными полюсами Земли. В северном географическом полушарии, где стрелка опущена к Земле своим северным полюсом, лежит отрицательный полюс земного магнетизма, в южном — положительный. Магнитные полюсы не совпадают с географическими.

Большую роль в разработке вопросов земного магнетизма сыграл русский учёный Н. А. Умов.

**78. Магнитные аномалии.** Тщательное изучение трёх элементов земного магнетизма — склонения, наклонения и напряжённости магнитного поля — показывает, что они подвержены периодическим изменениям: ничтожным — суточным и годовым и весьма

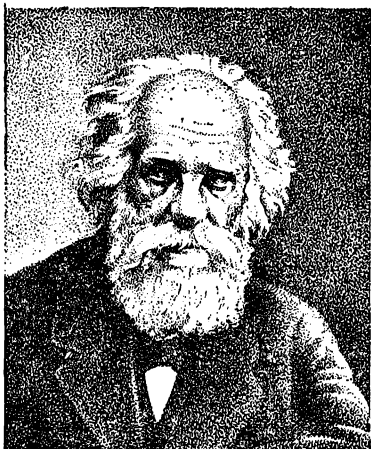
<sup>1)</sup> Намагниченные тела теряют свой магнетизм по мере нагревания.

значительным — вековым. Так, в Париже, где магнитные наблюдения ведутся давно, отмечено, что до середины XVII в. склонение было восточным, затем стало равным нулю, теперь оно западное.

Суточные и годовые изменения зависят от изменения освещения Земли Солнцем в течение суток и года.

Кроме периодических изменений, элементы земного магнетизма подвергаются время от времени весьма резким и крупным, но кратковременным изменениям, которые называются магнитными бурями. Они всегда связаны с полярными сияниями; интенсивность последних находится в зависимости от числа солнечных пятен.

В отдельных местах Земли наблюдаются иногда на сравнительно небольшом протяжении значительные отклонения величины элементов магнитного поля Земли по сравнению со значениями их в соседних



Н. А. Умов <sup>1)</sup> (1846—1915).

---

<sup>1)</sup> Умов Николай Алексеевич (1846—1915), один из крупнейших русских физиков, профессор Московского университета, председатель Общества испытателей природы.

Н. А. Умов работал в ряде областей теоретической и экспериментальной физики. Его огромной научной заслугой является введение совершенно нового представления о движении энергии. Это представление проникло теперь во все отделы современной физики. В области теоретической физики он решил в самом общем виде труднейшую проблему теории электричества — проблему движения электричества на проводящих поверхностях произвольной формы. До Умова эту задачу пытались решить крупные зарубежные учёные — Кирхгоф и Больцман. Но они смогли получить решение только для некоторых частных случаев. Ему принадлежат важные исследования в области оптики и явлений диффузии.

Н. А. Умов изучал деполяризацию света при рассеянии от матовых и шероховатых поверхностей и разработал на основе своих исследований особый метод спектрального анализа несамосветящихся тел по характеру рассеиваемого ими излучения.

Огромное значение имеют работы Н. А. Умова в области земного магнетизма.

По инициативе и проекту Н. А. Умова построен физический институт Московского университета.

местах, тогда как вообще изменение элементов происходит постепенно. Такие отклонения называются магнитными аномалиями. Причина их может заключаться в местном скоплении магнитных руд. Такова знаменитая Курская аномалия в СССР, исследование которой привело к открытию огромных залежей железной руды.

### **Упражнение 11.**

1. К полюсу магнитной стрелки поднесена сбоку стальная полоса; полюс отклонился, намагничена ли полоса?

2. К полюсу магнитной стрелки поднесена сбоку стальная полоса; полюс притянулся; намагничена ли полоса?

3. Как при помощи магнитной стрелки узнать, намагничен ли стальной стержень?

4. Даны два одинаковых стальных стержня, из которых один намагничен. Как узнать, какой именно намагничен, если больше не дано никаких приборов или принадлежностей?

5. Можно ли намагнитить земным магнетизмом стальной стержень, поместив его в плоскости магнитного меридиана параллельно стрелке наклонения? Если можно, то на каком конце стержня получится северный полюс?

6. Отчего стальные полосы и рельсы, лежащие на складах, оказываются намагниченными? В каком направлении относительно стран горизонта они должны лежать, чтобы намагничение было наиболее сильным?

7. Будет ли магнитная стрелка свободно, т. е. без бокового давления на ось, вращаться вокруг вертикальной оси, пропущенной через её центр тяжести?

8. Где надо пропустить через магнитную стрелку вертикальную ось, чтобы стрелка свободно вращалась вокруг неё (разобрать отдельно для северного и южного магнитных полушарий)?

9. Будет ли заряженная электричеством палочка притягивать или отталкивать конец магнитной стрелки склонения? Если заряженная электричеством палочка будет действовать на конец магнитной стрелки, то будет ли это действие зависеть от знака полюса?

**79. Опыт Эрстеда.** Магнитное действие тока впервые обнаружил датский учёный Эрстед в 1820 г. Если поместить проводник параллельно магнитной стрелке под нею или над нею, то при пропускании по проводнику тока магнитная стрелка выходит из плоскости магнитного меридиана и образует с ним некоторый угол. При указанном на рисунке 84 направлении тока, когда проводник протянут под стрелкой, северный полюс стрелки перемещается в сторону читателя; когда же проводник проходит над стрелкой, северный полюс отклоняется от читателя. Если изменить направление тока на противоположное,

то в обоих случаях перемещение северного полюса изменится также на противоположное.

Эти четыре опыта обнаруживают, во-первых, что *электрический ток всегда образует вокруг себя магнитное поле* и, во-вторых, что направления сил магнитного поля изменяются от точки к точке.

Чтобы запомнить, куда отклонится северный полюс магнитной стрелки при заданном положении проводника и заданном направлении тока, можно воспользоваться следующим практическим правилом, выведенным из тех же опытов: если поместить пальцы правой руки на проводник по направлению тока и ладонь обратить к стрелке, то вытянутый большой палец покажет направление вращения северного полюса стрелки (правило большого пальца правой руки).

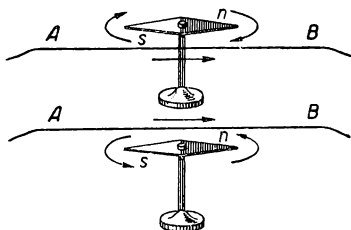


Рис. 84. Отклонение током магнитной стрелки из положения равновесия.

Направление магнитных силовых линий в магнитном поле тока может быть обнаружено так же, как и для постоянного магнита, при помощи железных опилок.

**80. Магнитное поле тока.** Чтобы найти расположение магнитных силовых линий тока, надо пропустить проводник через экран, помещённый перпендикулярно к проводнику, посыпать экран тонким слоем железных опилок и постукивать слегка по нему при прохождении по проводнику тока: тогда распределение опилок покажет расположение силовых линий. Чтобы определить направление силовых линий, надо вокруг проводника с током поставить много маленьких магнитных стрелок<sup>1)</sup>. Направления, куда будут обращены северные полюсы магнитных стрелок, покажут направления силовых линий.

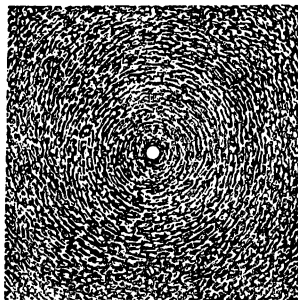


Рис. 85. Магнитные силовые линии прямолинейного тока.

рисунок 85 даёт форму

силовых линий; рисунки 86 и 87

<sup>1)</sup> Или перемещать вокруг тока одну стрелку.

показывают расположение магнитных стрелок, а рисунки 88 и 89 дают схематическое изображение формы и направления магнитных силовых линий в магнитном поле прямолинейного тока.

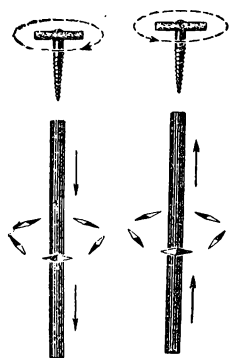


Рис. 86—87. Направление магнитных силовых линий в магнитном поле прямолинейного тока.

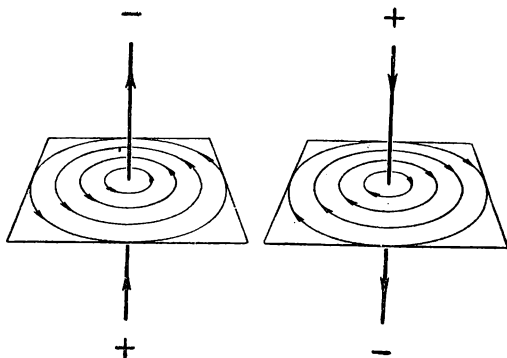


Рис. 88—89. Схемы расположения магнитных силовых линий в магнитном поле прямолинейного тока.

Из рисунков видно, что магнитные силовые линии поля прямолинейного тока — концентрические окружности, расположенные в плоскости, перпендикулярной к направлению тока.

Центры их лежат на оси проводника.



Рис. 90. Магнитные силовые линии поля кругового тока.

Для запоминания направления силовых линий знаменитый английский физик Максвелл (1831—1879) дал практическое „правило буравчика“: если ввинчивать или вывинчивать буравчик, двигая его по направлению тока, то вращение рукоятки буравчика покажет направление силовых линий тока (рис. 86 и 87).

Для кругового тока рисунок 90 даёт расположение магнитных силовых линий, а рисунки 91 и 92 — схемы расположения и направления магнитных силовых линий.

Силовые линии выходят из той стороны кругового тока, где ток кажется наблюдателю идущим против часовой стрелки, и входят в ту, где ток кажется идущим по часовой стрелке.



Поэтому круговой ток подобен магнитному листку, т. е. такому магниту, в котором расстояние между полюсами ничтожно мало сравнительно с размерами тех поверхностей, где лежат полюсы.

В технике очень часто применяются провода, намотанные на катушки. Каждый ряд такой обмотки имеет трубкообразную форму.

Такой трубкообразный проводник получил название соленоида. Рисунок 93 изображает форму расположения силовых линий соленоида, а рисунок 94 представляет схематическое изображение самого соленоида и схему расположения силовых линий.

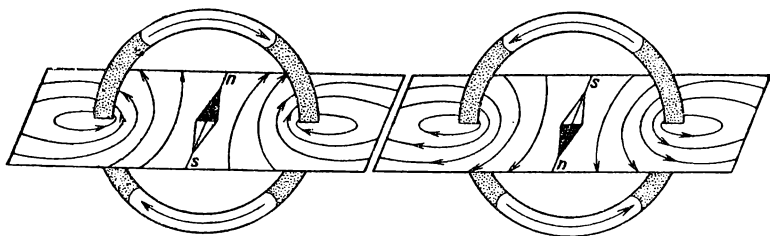


Рис. 91—92. Схемы расположения магнитных силовых линий поля кругового тока.

Сравнение силовых линий тока в катушке с силовыми линиями постоянного магнита (рис. 73 и 74) показывает, что поле тока, идущего по катушке (по соленоиду) по своим магнитным свойствам подобно полю постоянного магнита; северному полюсу магнита соответствует тот конец катушки, где для наблюдателя, смотрящего извне, ток идёт против часовой стрелки, и южному полюсу — тот, где ток идёт по часовой стрелке.

В двух последних случаях правило буравчика поможет найти относительное направление тока и силовых линий. В этих случаях надо вращать по направлению кругового тока рукоятку буравчика; поступательное движение самого буравчика укажет направление магнитных силовых линий поля (рис. 95).

Теперь становится понятным способ намагничивания постоянных магнитов при помощи электрического тока. Когда стальной стержень обмотан проводом и по нему пропущен электрический ток, то вокруг обмотки образуется магнитное поле; внутри обмотки магнитные силовые линии идут параллельно оси катушки, следовательно, параллельно стержню. На том конце его, где силовые



Максвелл<sup>1)</sup> (1831—1879).

100 и даже более  $\kappa\Gamma$  на  $1 \text{ см}^2$ .

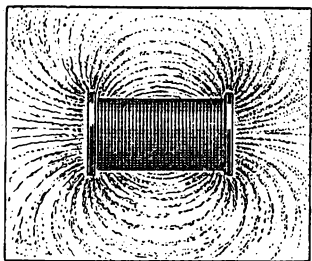


Рис. 93. Силовые линии поля соленоида.

линии входят в стержень, образуется южный полюс магнита, где они выходят, — северный.

Намагничение током было впервые произведено французским физиком Араго в 1820 г.

Подъёмная сила магнита измеряется той силой, которая необходима для отрывания от магнита притянутого им куска железа при одинаковом поперечном сечении магнита и куска железа.

Подъёмная сила стальных магнитов доходит до  $4 \kappa\Gamma$  на  $1 \text{ см}^2$  притягивающей поверхности. У электромагнитов она может достигать до

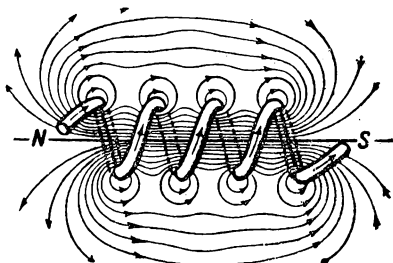


Рис. 94. Схема расположения магнитных силовых линий поля соленоида.

<sup>1)</sup> Максвелл Клерк родился близ Эдинбурга. С 1856 г. — профессор физики в Абердине, с 1871 г. — в Кембридже. Максвелл облёк в математическую форму идеи Фарадея об электромагнитном поле, разработал теорию поля и на основании её вывел заключение о том, что изменения напряжённости поля должны распространяться в окружающем пространстве волнообразно со скоростью света.

Это теоретическое исследование почти на два десятка лет опередило его опытное подтверждение.

Основываясь на связи электрических, магнитных и световых явлений и на своих исследованиях об электромагнитных колебаниях, Максвелл создал электромагнитную теорию света и тем объединил в одно целое разрозненные ранее области электричества, магнетизма и света.

В области кинетической теории газов Максвелл дал закон распределения скоростей газовых молекул.

**81. Электромагнит.** Магнитным полем тока, проходящего по катушке, можно воспользоваться для изготовления электромагнита. Электромагнитом называется стержень из мягкого железа, обмотанный изолированной проволокой, по которой можно пропускать ток. При прохождении тока по проволоке в стержне и вне его образуется магнитное поле. По прекращении тока магнетизм железа исчезает почти без остатка.

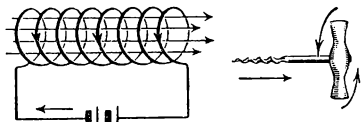


Рис. 95. Правило буравчика применительно к соленоиду.

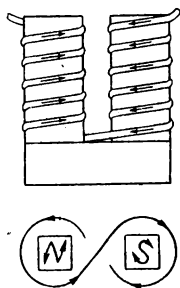


Рис. 96. Схема обмотки электромагнита.

Обмотку подковообразного электромагнита надо делать на обоих его концах в противоположных направлениях. Тогда при пропускании по обмотке постоянного тока на одном конце будет идти ток по часовой стрелке, на другом — против часовой стрелки. Схема обмотки и знаки полюсов в зависимости от направления тока показаны на рисунке 96.

Как известно из начального курса физики, электромагниты применяются в электрическом звонке, в телеграфных аппаратах, в других сигнализационных аппаратах, в электромагнитных кранах, в электрических машинах, в электрических моторах и в электрических измерительных приборах. Первый практически действующий электрический телеграф построен в России<sup>1)</sup>.

Здесь остановимся только на описании электромагнитного телефона.

**81а. Микрофон и телефон.** Два прибора — микрофон и телефон — служат для передачи звука на расстояние. Микрофон<sup>2)</sup> — прибор-передатчик, воспринимающий на станции отправления звуки. Телефон — прибор-приёмник, воспроизводя-

<sup>1)</sup> Первый в мире практически действующий электрический телеграф построил в 1832 г. русский офицер и изобретатель П. Л. Шиллинг (1786—1837). Россия была первой страной, в которой стал работать электрический телеграф, обслуживающий потребности практики.

<sup>2)</sup> Микрофон — от греческих слов: микрос — малый, фонé — звук, микрофон — передатчик слабых звуков; телефон — от слов: теле — далеко, фонé — звук; телефон — приёмник звуков на дальнем расстоянии.

ший звуки на приёмной станции. В последнем приборе и применяются электромагниты.

Звуковая волна, как известно (ч. II), представляет собой совокупность продольных колебаний воздуха; на протяжении волны происходит чередование сгущений и разрежений воздуха.

Каждый звук характеризуется тем или другим числом колебаний в секунду. Назначение микрофона — превратить падающие на него звуковые колебания в колебания силы постоянного электрического тока, пропускаемого через микрофон. Изменять силу постоянного тока в цепи можно посредством изменения сопротивления участка цепи. Микрофон устраивается так, чтобы его

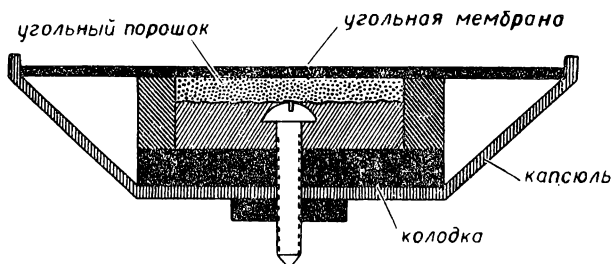


Рис. 96а. Микрофон.

электрическое сопротивление менялось в зависимости от звуковых колебаний, падающих на него.

Телефонный микрофон заключает в себе угольную мембрану, зажатую по краям в капсюле. Против мембраны, позади её, расположена угольная колодка; промежуток между мембраной и колодкой заполнен угольным порошком (рис. 96а).

Мембрана соединяется с одним концом электрической цепи, колодка — с другим. Мембрана и колодка соединяются между собою только через порошок. В ту же цепь, в которую включены мембрана и колодка микрофона, входят источник тока и обмотка электромагнитов телефона на приёмной станции.

Когда перед микрофоном происходит разговор, на его мембрану попадают звуковые волны. Когда на мембрану падает сгущение воздуха, то она сильнее сжимает угольный порошок; число точек соприкосновения между зёрнышками угольного порошка увеличивается, и вместе с этим уменьшается сопротивление этого участка цепи, а сила тока возрастает. Когда же сгущение сменяется разрежением воздуха, давление мембраны на порошок уменьшается; вследствие этого сопротивление микрофона

увеличивается и сила тока уменьшается. В течение каждого периода звукового колебания сила тока в электрической цепи то увеличивается, то уменьшается; таких изменений силы тока в секунду будет столько, сколько колебаний звука. Этот изменяющийся по силе ток поступает в телефон.

Наиболее распространённой формой телефона является электромагнитный телефон (рис. 96б). Он состоит из сильного постоянного магнита, на полюсные наконечники которого  $NS$  надеваются две катушки  $Q$ , последовательно соединённые одна с другой. Над полюсными наконечниками находится очень тонкая (около 0,2 мм) мембрана  $M$  из мягкого железа. Мембрана зажата через прокладочные кольца  $K$  по окружности при помощи амбушюра  $A$  (раструба) и корпуса телефона  $B$ .

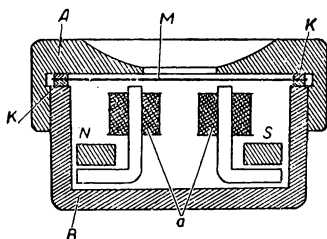


Рис. 96б. Разрез телефона.

Всякое увеличение силы тока в цепи вызывает увеличение магнитного поля электромагнита, что влечёт за собой общее усиление магнитного поля; мембрана телефона притягивается сильнее к магниту. Всякое же ослабление силы тока влечёт за собой ослабление магнитного поля и отход мембраны вследствие упругости от магнита. Следовательно, мембрана телефона совершит столько колебаний в секунду, сколько их делает сила тока в цепи под влиянием колебаний мембраны микрофона, включённого в цепь. Колебания мембраны телефона вызывают колебания воздуха, а эти последние воспринимаются ухом слушателя как звук. Звуки, передаваемые телефоном, имеют ту же высоту, что и звуки, воспринимаемые микрофоном.

Кроме описанных главных частей, телефонная установка дополняется ещё звонком для вызова абонента.

Телефон обыкновенно на каждой станции соединяется с микрофоном в один прибор, образуя микрофон.

**82. Действие магнитного поля на подвижной ток. Правило Флемминга.** Чтобы обнаружить действие магнитного поля на ток, подвесим вертикально лёгкий и гибкий металлический проводник. Поместим подковообразный магнит так, чтобы силовые линии его шли горизонтально и чтобы гибкий проводник помещался по середине между полюсами магнита. Тогда при пропускании тока по проводнику мы увидим, что он или втягивается в промежуток между полюсами магнита, или выбрасывается из него по направлению  $F$ , в зависимости от направления тока

и направления силовых линий. Четыре возможных случая такого движения представлены на рисунке 97.

Для запоминания направления движения проводника при заданных направлениях силовых линий и тока Флемминг дал следующее правило трёх пальцев левой руки (рис. 98):

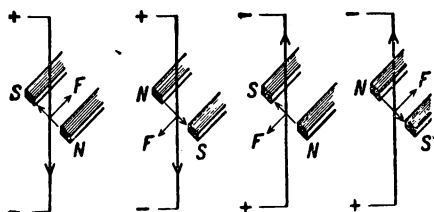


Рис. 97. Движение подвижного проводника в магнитном поле в зависимости от направления силовых линий и направления тока.

Надо раздвинуть под прямым углом большой и указательный пальцы левой руки, а средний поставить перпендикулярно к двум первым; затем указательный палец направить по направлению силовой линии, средний — по направлению тока; тогда большой палец покажет направление движения проводника.

На рисунке 98 буквы  $H$  показывают направления магнитных силовых линий, буквы  $I$  — направления токов, буквы  $F$  — направления движения проводника.

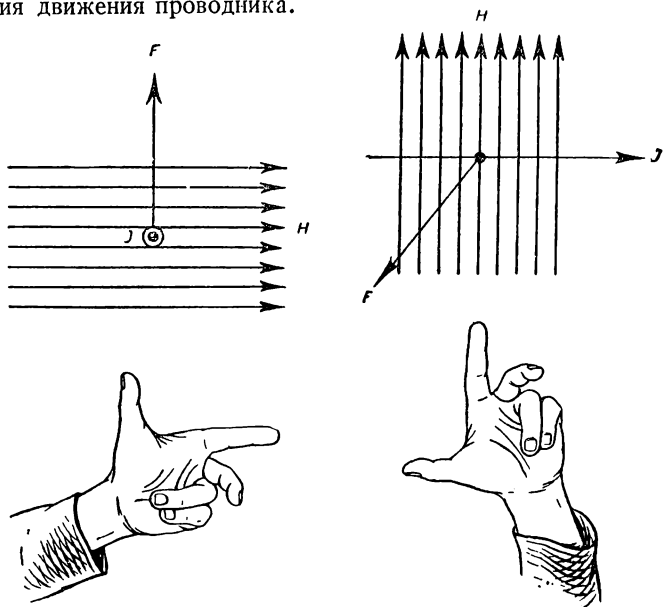


Рис. 98. Правило трёх пальцев левой руки Флемминга.

Действие магнитного поля на проводник с током является следствием взаимодействия магнитных полей магнита и тока. Это взаимодействие может быть объяснено на основании тех натяжений и боковых давлений, которые приписываются по Фарадею силовым линиям магнитного поля. Пусть рисунок 99 изображает расположение силовых линий магнита и прямого тока, идущего перпендикулярно к рисунку от читателя. В правой части рисунка силовые линии обоих полей имеют одинаковые направления и взаимно отталкиваются; в левой части — противоположные, здесь поле ослабляется и принимает вид, показанный на рисунке 99а. Поэтому подвижной проводник смещается влево, как это и следует по правилу Флемминга.

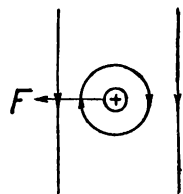


Рис. 99.

Параллельные прямые — силовые линии магнитного поля; окружность — силовая линия тока,  $F$  показывает направление движения проводника.

Что касается взаимодействия магнитов с круговыми токами и соленоидами или этих последних друг с другом, то оно определяется по закону взаимодействия магнитных полюсов, так как каждый круговой ток или соленоид, обтекаемый током, подобен магниту (§ 80).

**83. Взаимодействие токов.** Так как каждый прямолинейный ток образует вокруг себя магнитное поле, то между двумя прямолинейными проводниками с токами должно быть взаимодействие.

Чтобы изучить взаимодействие параллельных токов, надо подвесить на близком расстоянии друг от друга два гибких лёгких проводника и пускать через них токи один раз в одинаковых, другой раз в противоположных направлениях (рис. 100).

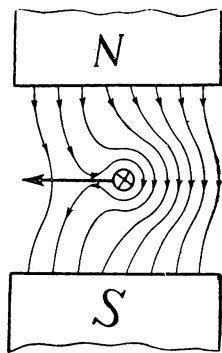


Рис. 99а.

Опыты показывают, что *токи, одинаково направленные, притягиваются, противоположно направленные — отталкиваются.*

Если подвижные проводники стоят под углом друг к другу, то при пропускании по ним тока они устанавливаются так, чтобы токи стали параллельными и одинаково направленными.

Это взаимодействие можно объяснить с точки зрения натяжений и давлений в силовых линиях; для этого при помощи опилок образуем силовые линии двух параллельных токов. Рисунки 101 и 102 дают такие поля для обоих случаев. Из рисунка 101 видно, что

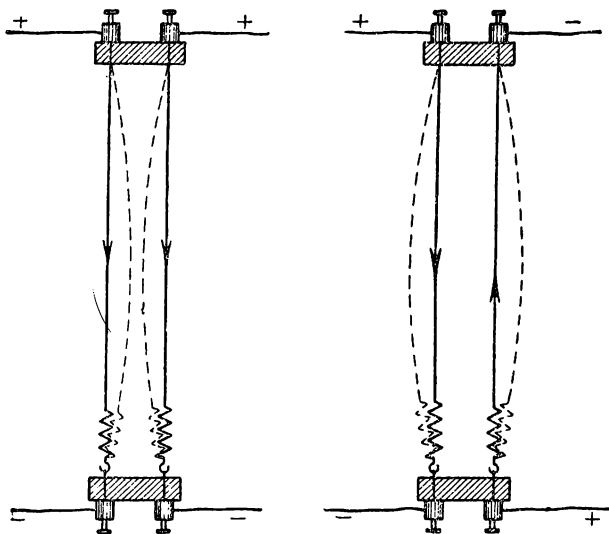


Рис. 100.

Слева — токи, одинаково направленные, притягиваются;  
справа — токи, противоположно направленные, отталкиваются.

оба тока охватываются общими силовыми линиями. Эти силовые линии стремятся сократиться по длине и при своём сокращении увлекают и проводники, сближая их.

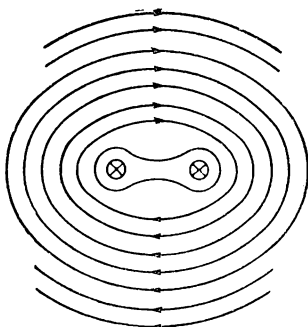


Рис. 101. Магнитные силовые линии поля, образованного двумя параллельными одинаково направленными токами (значок  $\otimes$  показывает, что токи идут от читателя).

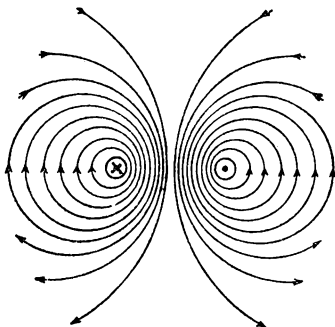


Рис. 102. Магнитные силовые линии поля, образованного двумя параллельными противоположно направленными токами (значок  $\odot$  показывает, что ток идёт к читателю).



Между токами, противоположно направленными, магнитные силовые линии имеют одинаковые направления (рис. 102); существующее поперёк силовой линии боковое давление отталкивает их друг от друга и удаляет проводники.

**84. Гипотеза Ампера о происхождении магнетизма.** Изучение магнитного действия тока установило, что, во-первых, *электрический ток всегда сопровождается магнитным полем, его окружающим*, и, во-вторых, магнитное поле тока, идущего по катушке (соленоиду), имеет расположение силовых линий, одинаковое с полем прямого магнита.

Это воспроизведение при помощи электрического тока магнитных явлений, известных до того времени только для постоянного магнита, привело к новой гипотезе о происхождении магнетизма.

Опираясь на магнитное действие тока и воспроизведение при помощи тока свойств постоянных магнитов, великий французский физик **А м п е р** (1775—1836) высказал в 1822 г. гипотезу, что *всякое магнитное поле имеет электрическое происхождение*.

Так как при разломе магнита на любые малые части каждая частица представляет собой полный магнит с двумя полюсами, то на этом основании магнетизм можно считать молекулярным свойством: каждая молекула тела является магнитом с двумя различными полюсами на двух противоположных сторонах. По гипотезе Ампера магнетизм молекулы объясняется тем, что *молекула обтекается молекулярным электрическим током*.



Рис. 104. Схема амперовых токов в магните.

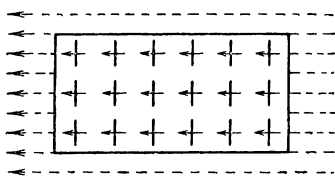
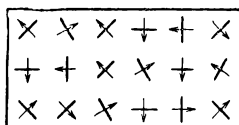


Рис. 103. Расположение молекулярных токов в немагнитном и намагниченном телах.

Стрелки показывают направление силовых линий круговых токов, изображённых в сечении отрезками.

все молекулярные токи видны идущими против часовой стрелки, при взгляде на южный — по часовой стрелке.

Наука XX в., раскрывая строение атомов из положительно заряженных ядер и вращающихся по орбитам вокруг центрального ядра электронов, может дать объяснение сущности молекулярных токов. Электрон, находящийся в движении по орбите, как всякий движущийся заряд, также образует вокруг себя магнитное поле.

Магнитные поля электронов в своей совокупности и создают магнитное поле молекулы.

При таком объяснении возникает новый вопрос. Вращающиеся электроны имеются в атоме каждого химического элемента. Почему же магнитные свойства наблюдаются только у немногих веществ, которые перечислены в § 70? Ещё в 1846—1847 гг. Фарадей открыл, что магнитное поле действует на все без исключения тела, но проявляется это действие различно и в различной степени. Это различие объясняется тем, что магнитные поля отдельных электронов, входящих в состав молекулы сложного вещества, при одних расположениях орбит могут взаимно как бы уничтожаться, при других — дают некоторое результирующее поле.

Итак, *магнетизм есть неотъемлемое свойство всякого движущегося заряда*. Электрический ток и магнитное поле — это два проявления единого процесса — движения электрических зарядов.

#### **84а. Тела парамагнитные, диамагнитные и ферромагнитные.**

Остановимся несколько подробнее на объяснении магнетизма, данным в предыдущем параграфе. Каждый замкнутый ток характеризуется особой величиной, называемой „магнитным моментом“ и пропорциональной произведению силы тока на площадь, обтекаемую током. По современным взглядам электрон не только движется по орбите вокруг ядра, но и вращается вокруг оси. В атомах и сложных молекулах многочисленные электроны могут двигаться по различным орбитам, различно расположенным в пространстве. Их магнитные моменты, зависящие как от движения по орбите, так и от вращения вокруг оси, складываясь, образуют общий магнитный момент атома или молекулы.

Если общий магнитный момент атома или молекулы отличен от нуля, то тело оказывается парамагнитным. Пока такое тело находится вне магнитного поля, его молекулярные токи и вращения вокруг осей направлены совершенно беспорядочно, и поэтому результирующее магнитное поле вокруг тела равно нулю. Под влиянием внешнего поля все молекулярные магниты стремятся расположиться в направлении силовых линий; но этому препятствует тепловое движение, поддерживающее первоначальное беспорядочное движение. В результате этих двух действий в теле образуется некоторое небольшое количество цепочек молекулярных магнитов, располагающихся по на-

правлению силовых линий. На том конце тела, где силовые линии входят в него, появляется южный магнетизм, где выходят, — северный.

Если тело может свободно перемещаться в магнитном поле, то парамагнитное тело располагается вдоль силовых линий и вытягивается в пространство между полюсами сильного магнита.

Парамагнитными телами, например, являются марганец, платина, алюминий, растворы солей железа, кислород.

Если общий магнитный момент атома или молекулы равен нулю, то тело оказывается диамагнитным. Когда такое тело попадает в магнитное поле, то поле по индукции вызывает в нём изменение движения электронов. По закону Ленца это изменение таково, что оно противодействует вызывающей его причине, т. е. внешнему магнитному полю. Значит, в атомах или молекулах появляются собственные магнитные моменты, направленные противоположно силовым линиям. Образующиеся цепочки молекулярных магнитов направлены навстречу полю. На том конце диамагнитного тела, где силовые линии внешнего

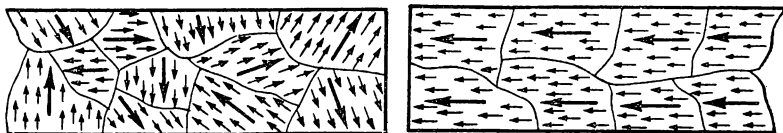


Рис. 104 а и б.

поля входят в него, появляется северный магнетизм, где выходят, — южный. Поэтому диамагнитные тела становятся поперёк силовых линий и выталкиваются из пространства между полюсами магнита<sup>1)</sup>.

Диамагнитными телами, например, являются висмут, медь, серебро, золото, некоторые газы, вода.

Третью группу составляют тела ферромагнитные — железо, никель, кобальт и сплавы, упомянутые выше, в § 70. В них без всякого участия внешнего поля, благодаря особенностям в строении электронных оболочек атомов, уже существуют многочисленные группировки из миллионов атомов с одинаково направленными магнитными полями (рис. 104а). В магнитном поле поля этих областей самопроизвольного намагничивания элементарных магнитов приближаются к направлению внешнего поля (рис. 104б). Если внешнее поле имеет значительную напряжённость, то области самопроизвольного намагничивания закрепляются в новом положении. Тело и после вынесения его из магнитного поля сохраняет остаточный магнетизм.

### Упражнение 12.

1. Примените „правило левой руки“ к взаимодействию двух параллельных токов, считая, что каждый находится в поле другого, т. е. через него проходят силовые линии другого, и объясните направление движения.

<sup>1)</sup> По-гречески *para* значит вдоль, *dia* — поперёк.

2. К востоку или к западу от магнитного меридиана мог бы быть отклонён земным магнетизмом прямолинейный ток, перпендикулярный к силовым линиям земного магнитного поля и идущий сверху вниз?

3. Как могла бы установиться под действием земного магнетизма лёгкая подвижная прямоугольная рама, обтекаемая током (каков был бы угол плоскости рамы с плоскостью магнитного меридиана)? В восточной или западной ветви рамы шёл бы нисходящий ток?

4. Какое положение относительно магнита займёт при пропускании тока подвижной проводник рисунка 105?

5. Какое положение займёт подвижной соленоид (рис. 106) относительно магнита при прохождении по соленоиду тока? Что произойдёт, если изменить на противоположное направление тока? направление магнита?

6. Какое движение получит катушка (рис. 107) относительно электромагнита при данных направлениях тока? при перемене направления обоих токов? при перемене одного?

7. Какое взаимное положение примут две катушки, по которым идёт ток направления, указанного на рисунке 108? Как изменится положение, если изменится направление тока в левой катушке? в правой? в обеих?

8. Почему металлическое колесо, опущенное нижним концом в чашку с ртутью и помещённое между полюсами подковообразного магнита (рис. 109), начинает вращаться, если через ртуть и колесо пропущен электрический ток?

9. Почему гибкий проводник, по которому идёт ток, спирально огибает помещённый возле него прямой магнит, как показано на рисунке 110? В каком направлении

идёт ток по проводнику (проделайте опыт)?

10. Какое движение получил бы гибкий вертикально висящий проводник с током (предыдущая задача), если бы к нему поднести справа горизонтально расположенный магнит?

Сделать чертежи, задав различные направления тока и различные расположения полюсов.



А м п е р <sup>1)</sup> (1775—1836).

---

<sup>1)</sup> Ампер Андре́ родился в Лионе во Франции; с 1807 г. профессор сперва в Бурге, затем в Парижской политехнической школе. Ампер дал правило пловца для определения направления отклонения магнитной стрелки под действием электрического тока, устроил „астати́ческую стрелку“ для гальванометра, на которую не действует земной магнетизм; он изучил на опыте взаимодействие токов и разработал теорию этого взаимодействия; он изучил магнитные свойства тока, протекающего по спиральному проводнику, названному им соленоидом; наконец, он дал теорию магнетизма, навсегда разрушившую прежнюю раздельность учений об электричестве и магнетизме и объединившую в одно целое эти две отрасли физических явлений.

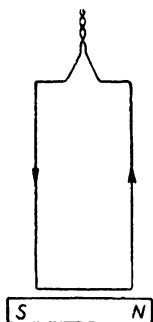


Рис. 105.

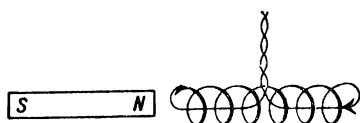


Рис. 106.

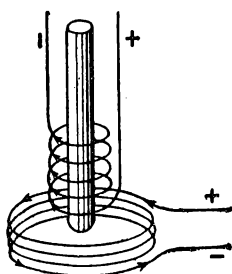


Рис. 107.

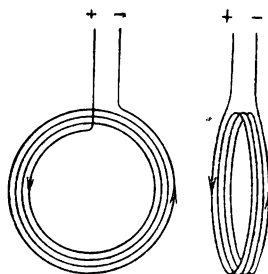


Рис. 108.

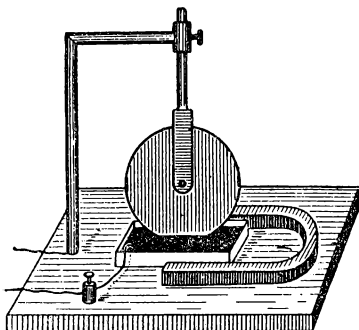


Рис. 109.

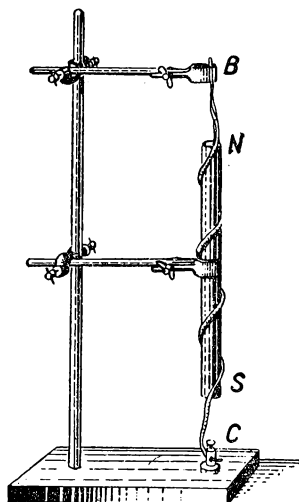


Рис. 110.

**85. Электрические измерительные приборы.** На взаимодействии магнитов и токов основано устройство приборов для измерения силы тока и напряжения. Если укрепить неподвижно (рис. 111) подковообразный магнит и между его полюсами по-

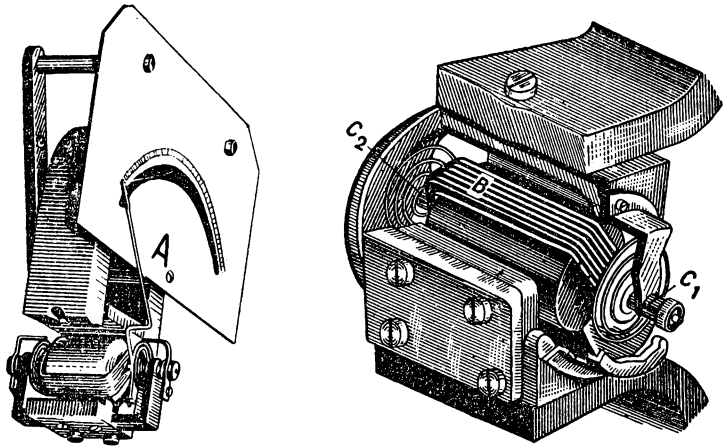


Рис. 111. Подвижная часть амперметра.

местить на остриях ось  $C_1C_2$  лёгкой рамки с намотанной на неё изолированной проволокой  $B$ , то при пропускании тока по проволоке рамка будет поворачиваться в магнитном поле вследствие разобранных выше взаимодействий.

Тонкие спиральные пружины, скреплённые с рамкой, противодействуют этому повороту и стремятся вернуть её в первоначальное положение.

Поэтому угол поворота рамки зависит от силы тока. Угол поворота рамки увеличивается с увеличением силы тока. Направление вращения зависит от направления тока. С осью рамки скрепляется лёгкая стрелка, которая показывает угол поворота рамки. Прибор называется гальванометром Дебре — д'Арсонваля (рис. 112).

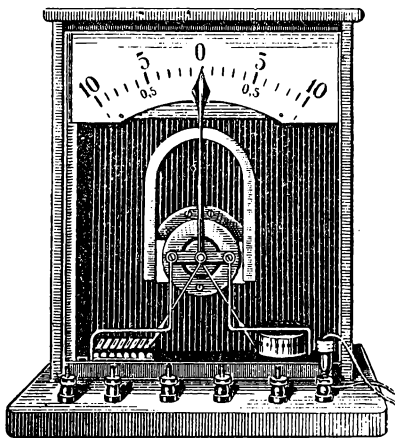


Рис. 112. Гальванометр Дебре — д'Арсонваля.

Если прибор предварительно проградуирован и деления на скале нанесены в амперах, то прибор получает название амперметра, если в вольтах — вольтметра.

В школьном демонстрационном приборе соединены обыкновенно амперметр и вольтметр.

Амперметры (рис. 111) всегда включаются в цепь последовательно и устраиваются с очень малым сопротивлением, чтобы поглощаемая амперметром энергия была как можно меньше и включение его не нарушало бы работы цепи. Зная силу тока и сопротивление  $R$ , можно рассчитать для каждой силы тока напряжения на зажимах прибора  $U = IR$  и нанести на шкале соответствующие значения напряжения в вольтах; такой прибор называется вольтметром.

Вольтметр включается параллельно проводнику между его концами. Чтобы поглощать как можно меньше энергии и не нарушать распределения напряжения в цепи, вольтметры устраиваются с очень большим сопротивлением (упр. 7, задача 10).

При изготовлении амперметров они включаются последовательно в одну цепь с прибором, градуированным по химическому действию тока, и размечаются по его показаниям.

Каждый прибор построен для определённых предельных значений измеряемой величины.

Если через амперметр пропустить более сильный ток, чем тот, для которого этот прибор предназначен, или если к вольтметру приложить напряжение, превосходящее напряжение, предельное для этого вольтметра, то приборы могут быть испорчены. Но одним и тем же амперметром можно измерять токи в 10, 100 и вообще в  $n$  раз большие, если к зажимам амперметра параллельно ему подключить сопротивление (шунт), величина которого составляет  $\frac{1}{9}$ ,  $\frac{1}{99}$ ,  $\frac{1}{999}$  и вообще  $\frac{1}{n-1}$  сопротивления амперметра (упражнение 7, задачи 6 и 7).

Чтобы разметить шкалу вольтметра на деления разного значения<sup>1)</sup>, надо присоединять при градуировке добавочные сопротивления последовательно к вольтметру.

<sup>1)</sup> Например так, чтобы каждое деление соответствовало 1 вольту, или 5 вольтам, или 10 вольтам.

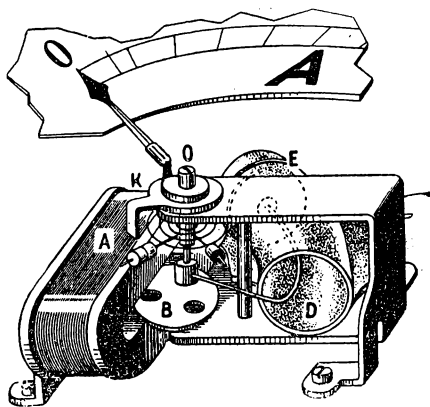


Рис. 113. Электромагнитный амперметр.

Электромагнитные амперметры и вольтметры состоят из катушки, по которой пускается измеряемый ток, и пластинки из мягкого железа, помещённой на пружине перед отверстием катушки. При прохождении через катушку тока любого направления пластинка втягивается в катушку на большую или меньшую глубину, в зависимости от силы тока (рис. 113). Нанесение делений на шкалу прибора в амперах, вольтах или их долях производится так же, как и для приборов с постоянным магнитом и подвижной рамкой.

Соединённая со стержнем стрелка, перемещающаяся своим концом по шкале, показывает значение силы тока.

Приборы электромагнитной системы пригодны и для постоянного и для переменного тока.

### **ВОПРОСЫ, ДЛЯ ПРОВЕРКИ УСВОЕНИЯ.**

1. Что называется напряжённостью магнитного поля?
2. Что показывает силовая линия?
3. Что принимается за направление силовой линии?
4. Каковы форма и направление силовых линий в поле прямого и подковообразного магнита?
5. Замкнуты или разомкнуты силовые линии поля магнита?
6. Какие места магнита называются его полюсами?
7. Что называется углом склонения? магнитным меридианом? какие бывают склонения?
8. Что называется углом наклона? магнитным экватором? какие бывают наклоны?
9. Чем объясняются склонение и наклонение?
10. Какова форма и направление силовых линий магнитного поля прямолинейного, кругового и соленоидального токов?
11. Существуют ли магнитные полюсы из силовой линии тока?
12. Что называется электромагнитом?
13. Описать устройство электромагнита и положение полюсов в зависимости от направления тока.
14. Указать применения электромагнита.
15. Сформулировать правило Флемминга для действия магнитного поля на подвижной ток.
16. В чём состоит взаимодействие токов?
17. Как устроены амперметры и вольтметры?
18. Как включаются в цепь амперметры и вольтметры?

## **IV. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК ЧЕРЕЗ ЖИДКОСТИ И ГАЗЫ.**

**86. Электрический ток через жидкости.** Электрический ток в металлах (и угле) образуется электронами, движущимися между ионами или молекулами; самые же ионы и молекулы не движутся вдоль тока. Такие проводники называются проводниками первого рода; их проводимость называется электронной.



В растворах кислот и солей и в газах электричество перемещается вместе с частицами вещества.

Жидкими проводниками являются растворы солей, кислот и щелочей или расплавленные соли, молекулы которых при растворении или расплавлении распадаются на части, называемые ионами.

Если брать в отдельности растворитель и твёрдую соль, то каждое из этих тел не проводит тока. Но если в сосуд с дистиллированной водой всыпать соль, то при включении такого раствора в цепь можно обнаружить прохождение тока. Как было выяснено в § 31, молекулы соли, кислоты и щёлочи при растворении распадаются на две части, на два иона, из которых один всегда водород или металл, другой — кислотный или водный остаток.

При растворении соли, кислоты или щёлочи атомы водорода или металлов лишаются одного или нескольких своих электронов и потому оказываются заряженными положительно (положительный ион); другая частица каждой молекулы — кислотный или водный остаток — получает избыток электронов и потому оказывается заряженной отрицательно (отрицательный ион).

Для включения раствора в цепь его наливают в сосуд, называемый электролитической ванной, и в него опускают концы цепи. Конец провода, или электрод, соединённый с положительным полюсом источника тока, называется анодом, соединённый с отрицательным полюсом, — катодом.

Если включить раствор в цепь электрического тока (рис. 114), то между электродами образуется электрическое поле. Ионы, т. е. атомы или группы атомов, обладающие электрическими зарядами, придут в движение: положительно заряженные ионы — по направлению напряжённости поля, т. е. к катоду, отрицательно заряженные ионы — по противоположному направлению, т. е. к аноду.

Отрицательные ионы, прошедшие к аноду и называемые поэтому анионами, отдают свои лишние электроны аноду, а через него и через соединительный проводник — положительному полюсу источника, возмещая на нём недостаток электронов; положительные ионы, пришедшие к катоду и потому называемые катионами, получают недостающие им электроны из избытка их на катоде. Частицы вещества, сделавшиеся теперь таким образом

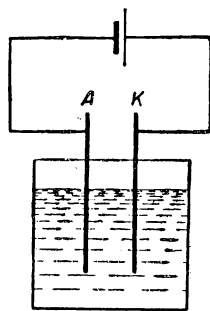


Рис. 114. Электролитическая ванна.

нейтральными, выделяются<sup>1)</sup> на электродах, но не внутри жидкости. Эта нейтрализация ионов на поверхности электродов является необходимым звеном в прохождении тока через электрическую цепь; иначе и в электродах и вблизи них в электролитическом растворе скопились бы очень большие заряды, которые воспрепятствовали бы дальнейшему прохождению тока.

Таким образом, устанавливается в цепи непрерывный ток: электроны отрицательного полюса источника приходят к катоду, на нём они нейтрализуют катионы, отталкивая в свою очередь в соответствующем количестве анионы к аноду; электроны анионов переходят на анод и по соединительной проволоке — на положительный полюс источника; так устанавливается по внешней цепи *перемещение электронов* от отрицательного полюса источника тока к положительному. При этом *через жидкость электричество переносится вместе с частицами вещества*.

Перенос электричества частицами вещества, именно, частями молекулы, называется ионной проводимостью.

Только те растворы проводят электричество, которые заключают в себе ионы<sup>2)</sup>. Такие жидкие проводники называются проводниками второго рода.

Выделение частей молекул на электродах называется электролизом<sup>3)</sup>; сами проводники второго рода называются электролитами.

Основным условием электролиза является распад молекулы при растворении на два иона. При прохождении тока происходит выделение их, как первичных продуктов распада, на электродах и нейтрализация их. Так, при прохождении тока через раствор соляной кислоты  $\text{HCl}$  на катоде выделяется водород  $\text{H}$ , на аноде — хлор  $\text{Cl}$ .

Движение ионов можно обнаружить на таком опыте. Прямоугольный кусок фильтровальной бумаги смачивается раствором серноокислого натрия и фенолфталеина и кладётся на стеклянную пластинку. Поперёк бумаги помещается белая нитка, смоченная раствором едкого натра.

Если на равных расстояниях от нитки прижать к бумаге электроды (рис. 115), то при включении тока ионы гидроксила ( $\text{OH}$ ) начинают двигаться к аноду, создавая на пути малиновую окраску.

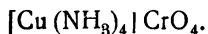
---

<sup>1)</sup> В виде атомов или групп атомов.

<sup>2)</sup> Растворы, не распадающиеся на ионы, не проводят электричества; таков раствор сахара в дистиллированной воде.

<sup>3)</sup> По-гречески *лизис* значит разъединение.

Двустороннее движение можно обнаружить, если бумагу смочить в растворе поваренной соли, а нитку — в растворе соли:



Движение ионов характеризуется их подвижностью. Подвижность ионов измеряется скоростью движения их в электрическом поле при падении потенциала в 1 вольт на 1 см.

Подвижность ионов при 18° в  $\frac{\text{см}}{\text{сек}} : \frac{\text{вольт}}{\text{см}}$ .

Гидроксоний $\text{H}_3\text{O}^+$ . . . . .	$3,3 \cdot 10^{-3}$
Натрий $\text{Na}^+$ . . . . .	$0,46 \cdot 10^{-3}$
Железо (двухвал.) $\text{Fe}^{2+}$ . . . . .	$0,48 \cdot 10^{-3}$
Гидроксил $\text{OH}^-$ . . . . .	$1,82 \cdot 10^{-3}$
Хлор $\text{Cl}^-$ . . . . .	$0,68 \cdot 10^{-3}$
Кислотный остаток $\text{SO}_4^{2-}$ . . . . .	$0,76 \cdot 10^{-3}$

**87. Вторичные реакции при электролизе.** В большинстве случаев ионы в момент выделения на электродах вступают в химическое взаимодействие или с электродами, или с окружающей

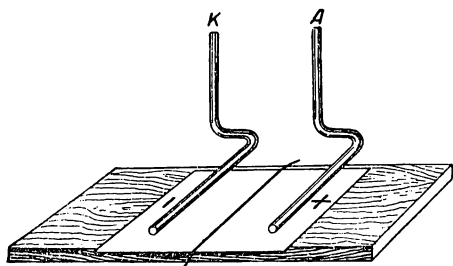


Рис. 115.

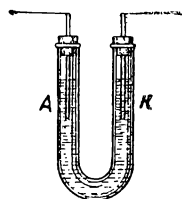


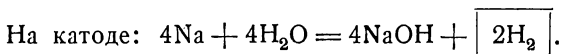
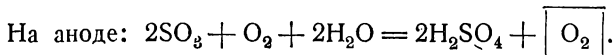
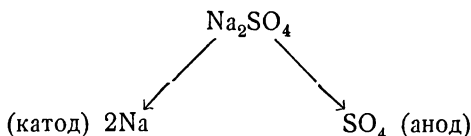
Рис. 116. Прибор для электролиза раствора солей.

жидкостью. Такие взаимодействия ионов называются **вторичными реакциями**.

Вторичные реакции могут дать на электродах продукты, сильно отличающиеся от первичных ионов.

Примеры вторичных реакций.

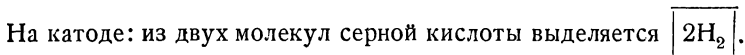
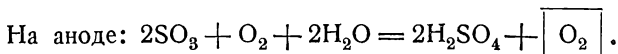
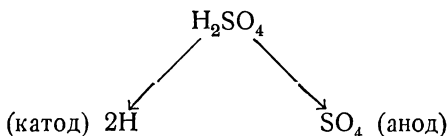
1. Электролиз раствора сернокислого натрия ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) или калия ( $\text{K}_2\text{SO}_4$ ) (рис. 116):



Окончательные продукты: серная кислота, щёлочь, водород и кислород; два последних — в отношениях, в которых они входят в состав молекулы воды.

Громадные запасы глауберовой соли ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) в Кара-Богаз-Гольском заливе Каспийского моря могут быть таким образом превращены в ценные продукты: серную кислоту и едкий натр.

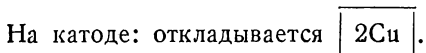
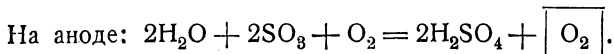
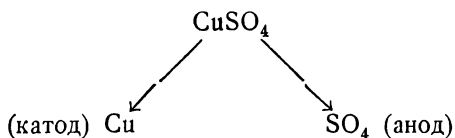
2. Электролиз раствора серной кислоты  $\text{H}_2\text{SO}_4$  происходит следующим образом:



Серная кислота восстанавливается, а продуктами распада являются водород и кислород в том соотношении, в котором они входят в состав молекул воды. Таким образом, в результате вторичной реакции получается разложение воды. Между тем электролиз воды как первичное действие тока не происходит, так как дистиллированная вода — непроводник.

Группа  $\text{SO}_4$  неустойчива, отдаёт кислород  $\text{O}$  и превращается в молекулу  $\text{SO}_3$  серного ангидрида. Эта последняя образует с водой серную кислоту.

### 3. Электролиз раствора медного купороса ( $\text{CuSO}_4$ ):



Если анод сделан из меди, то медь растворяется в образовавшейся около анода серной кислоте.

В результате медь анода переходит в раствор, на катоде выделяется такое же количество меди; крепость раствора остаётся без изменения.

На этой последней реакции основываются технические приложения электролиза: гальваностегия — покрытие одного металла другим; гальванопластика — получение металлических оттисков с рельефных предметов; электрометаллургия — получение чистых металлов.

#### 88. Лабораторная работа № 3. Изучение законов электролиза.

Приборы: 1) 2 аккумулятора; 2) ванна; 3) пара медных и пара цинковых электродов; 4) амперметр; 5) рубильник; 6) реостат с подвижным контактом; 7) весы и разновес; 8) провода; 9) спиртовка; 10) растворы различных солей; 11) часы с секундной стрелкой (10 и 11 общие для всего класса).

I. Найти зависимость количества выделенного при электролизе вещества от времени прохождения тока.

Ход работы. 1. Взвесьте оба медных электрода (при недостатке времени — только катод).

2. Налейте в ванну раствор медного купороса.

3. Составьте цепь: аккумулятор, амперметр, реостат, рубильник, электроды ванны (если взвешена одна пластинка, её надо поместить на место катода); замкнув ток, заметьте время.

4. По прошествии времени  $t_1$  разомкните ток, выньте электроды из раствора; высушите их в токе тёплого воздуха над пламенем горелки; взвесьте на весах, запишите, на сколько увеличилась масса катода и на сколько уменьшилась масса анода;

среднее из этих чисел примите за количество выделенной меди  $m_1$ , миллиграммов.

Таблица для записи.

Масса до замы- кания тока		Масса по раз- мыкании тока		Изменение массы		Количество выделенно- го вещества $m$ милли- граммов	Время опыта $t$ секунд	Сила тока $I$	$\frac{t_2}{t_1}$	$\frac{m_2}{m_1}$
анод	катод	анод	катод	анод	катод					

5. Составив цепь попрежнему, установите при помощи реостата ту же силу тока, что и в опыте 3, и пропустите ток в течение другого времени  $t_2$ .

6. По предыдущему вычислите количество выделенной за время  $t_2$  меди  $m_2$  миллиграммов.

7. Найдите отношения  $\frac{m_2}{m_1}$  и  $\frac{t_2}{t_1}$  и сравните их между собой. Какой можно сделать вывод из опыта?

II. Найти зависимость количества выделенного вещества от силы тока.

III. Сравнить отношение количеств металлов, выделенных при одинаковых условиях, с отношением их химических эквивалентов<sup>1)</sup>.

План и ход работы по второму и третьему заданиям составьте самостоятельно.

**89. Законы Фарадея для электролиза.** Хотя впервые электролиз водного раствора кислоты током был произведён в 1800 г., но вследствие сложности вторичных реакций только в 1833 г. Фарадею удалось установить из своих опытов следующие законы электролиза.

**Первый закон.** *Количество выделенного при электролизе вещества прямо пропорционально силе тока и времени его прохождения* (т. е. пропорционально количеству электричества, прошедшего через электролит).

<sup>1)</sup> Химическим эквивалентом называется частное от деления атомного веса вещества на его валентность; валентность элемента равна числу атомов водорода, которое замещается данным элементом в химических соединениях.

*Количество вещества, выделенное одним кулоном, называется электрохимическим эквивалентом* данного вещества.

Если обозначить электрохимический эквивалент вещества через  $K$   $\frac{\text{миллиграммов}}{\text{кулон}}$ , силу тока — через  $I$  ампер, время прохождения — через  $t$  секунд, весовое количество выделенного вещества в миллиграммах — через  $m$ , то первый закон может быть выражен соотношением:

$$m = KIt. \quad (\text{XIXa})$$

**Второй закон. Электрохимические эквиваленты веществ прямо пропорциональны их химическим эквивалентам.**

Второй закон устанавливает, что отношение электрохимического эквивалента  $K$  к химическому эквиваленту  $M$  того же вещества есть величина постоянная; по измерению оно равно 0,01036 (см. таблицу); отсюда  $\frac{K}{M} = 0,01036$ ;  $K = 0,01036 \cdot M$ , или  $K = 0,01036 \frac{A}{n}$ , где  $A$  — атомный вес,  $n$  — валентность, а  $\frac{A}{n}$  — химический эквивалент вещества.

Оба закона могут быть объединены формулой:

$$m = 0,01036 \cdot \frac{A}{n} It \text{ миллиграммов.} \quad (\text{XIXб})$$

Оба закона могут быть объединены в следующей словесной формулировке:

**Количество выделенного при электролизе вещества прямо пропорционально химическому эквиваленту вещества и количеству электричества, прошедшего через электролит.**

Эти законы надо понимать так, что при прохождении тока через раствор соли азотнокислого серебра каждый кулон выделит 1,118 мг серебра; при прохождении через хлорную и хлористую соль при любом основании кулон выделит 0,3672 мг хлора; при прохождении через те соли железа, где оно двухвалентно, кулон

выделяет 0,2895 мг железа, а из тех солей, где железо трёхвалентно, кулон выделяет в полтора раза меньшее количество, т. е. 0,1930 мг.

На основании химического действия тока можно дать определение ампера независимо от кулона, как это сделано в международном определении. *Международный ампер есть такая сила постоянного тока в цепи, при которой из раствора серебряной соли выделяется на катоде 1,118 мг серебра в 1 секунду.*

**90. Числовое значение заряда электрона в кулонах.** На основании формулы закона Фарадея можно рассчитать, сколько потребуется кулонов, чтобы выделить грамм-эквивалент любого вещества.

Грамм-эквивалентом вещества называется масса вещества, число граммов которой равно химическому эквиваленту этого вещества.

**Таблица электрохимических эквивалентов.**

	Электрохимический эквивалент	Атомный вес $A$	Валентность $n$	Химический эквивалент $M$	Отношение $\frac{K}{M}$
<b>Катионы</b>					
Алюминий . . . . .	0,0932	26,97	3	8,99	0,01036
Водород . . . . .	0,01044	1,008	1	1,008	0,01036
Железо . . . . .	0,2895	55,84	2	27,92	0,01036
„ . . . . .	0,1930	55,84	3	18,61	0,01036
Золото . . . . .	0,681	197,2	3	65,73	0,01036
Калий . . . . .	0,4052	39,096	1	39,1	0,01036
Медь . . . . .	0,659	63,57	1	63,57	0,01036
„ . . . . .	0,3294	63,57	2	31,78	0,01036
Натрий . . . . .	0,2388	22,997	1	22,997	0,01036
Никель . . . . .	0,3040	58,69	2	29,34	0,01036
Серебро . . . . .	1,118	107,88	1	107,88	0,01036
Свинец . . . . .	1,074	207,2	2	103,6	0,01036
Цинк . . . . .	0,3387	65,38	2	32,69	0,01036
<b>Анионы</b>					
Бром . . . . .	0,828	79,916	1	79,916	0,01036
Иод . . . . .	1,315	126,92	1	126,92	0,01036
Кислород . . . . .	0,0829	16	2	8	0,01036
Хлор . . . . .	0,3672	35,457	1	35,457	0,01036
ОН . . . . .	0,1762	17,008	1	17,008	0,01036
SO <sub>4</sub> . . . . .	0,4975	96,06	2	48,03	0,01036
CO <sub>3</sub> . . . . .	0,3108	60	2	30	0,01036
NO <sub>3</sub> . . . . .	0,642	62,01	1	62,01	0,01036



Грамм-эквивалент вещества выразится числом граммов, которое найдём в столбце таблицы с заголовком „Химический эквивалент“, т. е. числом  $\frac{A}{n}$  граммов.

Если в формулу (XIXб) вставить  $m = \frac{A}{n}$  (граммов) =  $1000 \frac{A}{n}$  (миллиграммов), то получим:  $1000 \frac{A}{n} = 0,01036 \cdot \frac{A}{n} \cdot It$ , откуда:  $It = \frac{1000}{0,01036} = 96\,500$  кулонов <sup>1)</sup>.

На основании кинетической теории вещества высчитано, что в грамм-эквиваленте любого одновалентного вещества заключается  $6,026 \cdot 10^{23}$  атомов, в грамм-эквиваленте двухвалентного вещества атомов вдвое меньше, трёхвалентного — втрое меньше и т. д.

Когда при электролизе выделяется грамм-эквивалент любого одновалентного вещества, то с одной стороны через электролит проходит 96 500 кулонов, с другой — подходит к электродам  $6,026 \cdot 10^{23}$  ионов. Отсюда можно заключить, что на долю каждого иона одновалентного вещества приходится:

$$e = \frac{96\,500}{6,03 \cdot 10^{23}} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ кулонов.}$$

Наименьшее количество электричества, или элементарный электрический заряд, обнаруживающийся в явлениях электролиза (так же как и во всех других известных явлениях), равен  $1,6 \cdot 10^{-19}$  кулонов. В системе CGSE элементарный заряд выражается числом  $4,8 \cdot 10^{-10}$ .

Во всех явлениях электричества принимает участие или один элементарный заряд, или кратное число их.

В настоящее время известны три элементарные частицы материи, обладающие равными и наименьшими по величине зарядами. Это: электрон, имеющий отрицательный заряд, протон (ядро атома водорода) и позитрон, имеющие положительные заряды.

Мы можем теперь сказать, что ионом называется атом или совокупность атомов вещества, имеющих один или несколько элементарных зарядов (положительного или отрицательного знака).

---

<sup>1)</sup> С точностью до сотен. Это число можно вычислить для любого вещества и по первой формуле  $m = KIt$ , откуда  $It = \frac{m}{K}$  и  $m = \frac{A}{n}$ .

Так, ион водорода есть атом водорода, несущий положительное электричество, по количеству равное заряду электрона (т. е. атом лишён своего электрона); ион меди при электролизе медного купороса есть атом меди с положительным электричеством, равным по абсолютной величине заряду двух электронов; ион хлора — соединение атома хлора с электроном; ион кислотного остатка ( $\text{SO}_4$ ) — соединение группы атомов  $\text{SO}_4$  с двумя электронами.

### Упражнение 13.

1. Сколько никеля выделит из раствора сернокислого никеля ток в 2 ампера в течение 1 ч. 40 м.?

*Отв.* 3,648 г.

2. Какая сила тока требуется, чтобы при разложении раствора серной кислоты выделить в 1 час 1 л водорода (при нормальных условиях)? Сколько граммов воды при этом будет разложено?

*Отв.* 2,39 А.

3. При градуировании амперметра найдено, что ток выделил в 50 мин. 0,5 г серебра. Найти силу тока.

4. Сколько времени надо пропускать ток в 0,8 ампера, чтобы на катоде размером в  $1 \text{ дм}^2$  выделился из медного купороса слой меди в 0,6 мм толщиной?

*Отв.*  $\approx 56$  час.

5. Через ванну с 10-процентным раствором медного купороса и медными пластинами размером  $8 \text{ см} \times 10 \text{ см}$  пущен ток от аккумулятора ( $\mathcal{E}_{\text{ДС}} = 2\text{в}$ ). На каком расстоянии надо поставить пластины, чтобы за 4 часа получить на катоде слой меди в 0,1 мм? Внутренним сопротивлением аккумулятора и сопротивлением проводов пренебречь.

*Отв.*  $\approx 0,75 \text{ см}$ .

6. В цепь включены амперметр и ванна с раствором медного купороса. Амперметр показывал 4 ампера, на катоде ванны за 100 сек. отложилось 123 мг меди. Проверить показание амперметра.

7. До каких пор будет продолжаться процесс электролиза медного купороса, если электроды взяты угольные? медные?

8. На медном электролитическом заводе поставлено 400 ванн. В каждой ванне 20 катодов. Катоды в ванне соединены параллельно, ванны — последовательно. Размер катодной пластинки  $1000 \text{ мм} \times 800 \text{ мм}$ . Плотность<sup>1)</sup> тока равна  $200 \text{ а/м}^2$ . Найти выпуск меди за сутки.

*Отв.*  $\approx 36 \text{ т}$ .

Если сечение обозначить через  $S$ , то плотность тока равна  $\frac{I}{S}$ .

9. Какова плотность тока, проходящего через ванну медного электролитического завода, если каждый катод даёт в сутки 8 кг чистой меди при размере в  $1000 \text{ мм} \times 900 \text{ мм}$ ?

*Отв.*  $316 \text{ а/м}^2$ .

10. Сколько энергии расходуется на тонну выделенной в сутки меди в задаче 8, если напряжение на ваннах равно 110 вольт?

*Отв.*  $\approx 235 \text{ квт-ч}$ .

11. Сколько электронов в 1 сек. проходит через сечение цепи, если сила тока равна 1 амперу?

<sup>1)</sup> Плотность тока измеряется силой тока, приходящейся на единицу площади поперечного сечения.

12. Ток в 2 ампера проходит в течение 10 мин. через раствор серной кислоты. Найти объём образовавшихся кислорода и водорода.

$$\text{Плотность } \text{H}_2 = 0,00009 \frac{\text{г}}{\text{см}^3}; \text{ плотность } \text{O}_2 = 0,00143 \frac{\text{г}}{\text{см}^3}.$$

Отв. Для  $\text{H}_2$  около 140 см<sup>3</sup>.

13. Сколько нужно времени, чтобы при силе тока в 1 ампер покрыть поверхность металлической пластинки в 100 см<sup>2</sup> слоем серебра в 0,01 см толщины?

$$\text{Плотность серебра } 10,5 \frac{\text{г}}{\text{см}^3}.$$

Отв. 2 ч. 36,5 м.

**91. Поляризация элементов.** Если в цепь гальванического элемента Вольта включить амперметр, то можно заметить постепенное падение силы тока. Это падение связано с появлением на положительном полюсе пузырьков водорода, получающегося при электролизе серной кислоты <sup>1</sup>).

Слои газов — плохой проводник, они увеличивают внутреннее сопротивление элемента, отчего уменьшается сила тока в цепи. В то же время образуется как бы новый элемент с электродами: медь, покрытая водородом, и цинк, покрытый кислородом. Атомы водорода будут переходить в раствор в виде положительных ионов, атомы кислорода — в виде отрицательных ионов. Возникает ЭДС, противоположная ЭДС начального элемента Вольта и уменьшающая её до 0,77 вольта.

Образование ЭДС противоположно направленной ЭДС элемента, называется поляризацией элемента. Возникающая ЭДС называется ЭДС поляризации.

Устранение поляризации называется деполяризацией. Оно может быть осуществлено или механически — очищением пластинки от пузырьков водорода, или химически — соединением водорода с другими веществами в момент его появления у полюса.

Элементы, в которых поляризация устранена химическим способом, называются неполяризуемыми.

**92. Неполяризующиеся элементы. 1. Элемент Даниэля.** Этот элемент состоит (рис. 117) из стеклянной цилиндрической банки *a*, в которую опускается медный цилиндр *c*; в него вставляется сосуд из пористой глины *r*; в последний помещается цинк *z*; в пористый сосуд наливается слабый раствор серной кислоты, в стеклянный — раствор медного купороса <sup>2</sup>).

<sup>1</sup>) И здесь ион водорода идёт по току; только надо вспомнить, что внутри элемента ток идёт от отрицательного полюса к положительному.

<sup>2</sup>) Иногда цинк делается в виде цилиндра и помещается с серной кислотой в стеклянный сосуд, тогда медь и медный купорос находятся в пористом сосуде.

Так же, как в элементе Вольта, положительные ионы цинка переходят в раствор, образуя сернокислый цинк. Ионы водорода через пористую перегородку переходят в стеклянный сосуд, вытесняют положительные ионы меди из медного купороса, занимают их место и восстанавливают серную кислоту. Ионы меди подходят к медной пластинке и отдают ей положительные заряды (точнее — заимствуют от неё электроны), осаждаются в виде нейтрального медного слоя на медной же пластинке. Таким образом, вызывающий поляризацию водород находится в связанном состоянии; поверхности металлических пластинок остаются неизменными, ЭДС элемента сохраняется постоянной. ЭДС элемента Даниэля равна 1,1 вольт.

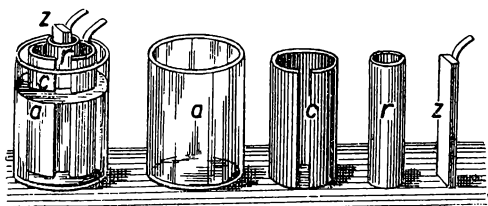


Рис. 117. Элемент Даниэля.

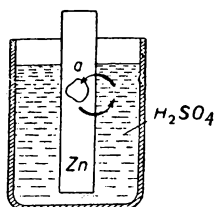


Рис. 118. Паразитный ток.

При разборе элемента Вольта было отмечено, что растворение цинка в кислоте может происходить только при прохождении тока. Но так обстоит дело только в том случае, когда цинк химически чистый. В продажный цинк вкраплены частицы чужеродных металлов *a*, и тогда в таких местах создаётся местный элемент: цинк, металл, серная кислота; в такой замкнутой цепи возникает местный паразитный ток (рис. 118), и цинк растворяется, хотя бы полюсы самого элемента не были замкнуты цепью. Для устранения паразитных токов цинк амальгамируется, т. е. натирается ртутью, отчего получается раствор цинка в ртути, покрывающий цинк в виде амальгамы, а примеси отделяются от кислоты амальгамой.

2. *Элемент Грене*. Деполяризатором служит второй электролит, наливаемый в один сосуд с первым. Полюсами элемента Грене (рис. 119) служат цинк и уголь (две угольные пластинки, соединённые вместе). Жидкость состоит из смеси раствора серной кислоты и раствора двуххромового калия<sup>1)</sup>.

<sup>1)</sup> Примерный состав: 100 частей воды, 16 частей двуххромового калия, 37 частей серной кислоты.

Главным в процессе работы и этого элемента является растворение цинка; цинковая пластинка является отрицательным полюсом; выделяющийся на угле водород окисляется в воду за счёт кислорода двуххромокислого калия ( $K_2Cr_2O_7$ ), очень богатого кислородом и переходящего вследствие реакции с водородом в соединения, менее богатые кислородом. Угольная пластинка — положительный полюс. Электродвижущая сила элемента Грене равна 2 вольтам.

3. *Элемент Лекланше.* Деполяризатором служит твёрдое вещество — перекись марганца ( $MnO_2$ ). Смесь  $MnO_2$  с угольным

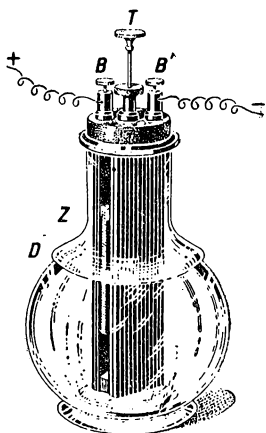


Рис. 119. Элемент Грене.

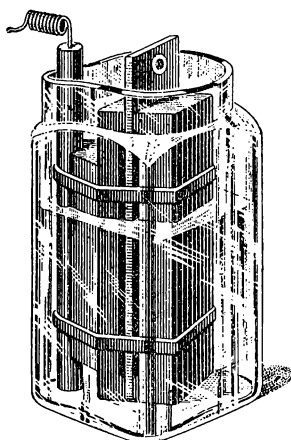


Рис. 120. Элемент Лекланше.

порошком прессуется в виде пластинок (агломерат) и скрепляется с углем. Элемент состоит из цинковой пластинки (отрицательный полюс), из угольной пластинки, скреплённой с агломератом (положительный полюс), и 20-процентного раствора нашатыря  $NH_4Cl$  (рис. 120).

Электрохимический процесс состоит, как и в элементе Вольта (§ 32), в растворении цинка<sup>1)</sup> и выделении на угле водорода.

В момент выделения на угольной пластинке водород окисляется в воду за счёт кислорода перекиси марганца, восстанавливающейся в соединение, менее богатое кислородом. Таким образом, перекись марганца является деполяризатором. Так как деполяризатор твёрдый, то деполяризация идёт медленно; при длительном действии элемента его электродвижущая сила всё же

<sup>1)</sup> Получается соединение  $Zn(NH_3)_2Cl_2$ .

изменяется. Он преимущественно применяется при кратковременном пользовании (для электрических звонков). Электродвижущая сила элемента Лекланше равна 1,5 вольт.

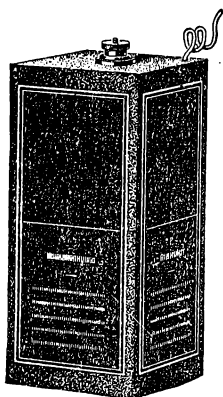


Рис. 121. Сухой элемент.

Элементы Лекланше часто употребляются в виде сухих элементов. В сухих элементах раствором нашатыря пропитывается какое-либо вещество, сильно поглощающее и удерживающее влагу, например древесные опилки. Сухой элемент тщательно закупоривается (рис. 121). Сухие элементы находят широкое применение в карманных фонарях, в проводках электрических звонков и других сигнализаторов, в лабораторных работах и т. д.

**93. Поляризация электродов.** ЭДС поляризации, рассмотренная нами в гальваническом элементе, возникает также и при электролизе любых электролитов при условии, что электроды изменяются (например, покрываются инородными веществами).

Пропустим в течение некоторого времени через прибор, предназначенный для электролиза серной кислоты (рис. 122), ток; затем отключим источник тока и соединим электроды через гальванометр; гальванометр покажет существование тока, направление которого внутри прибора противоположно току, производившему электролиз. Это появился ток поляризации; внутри сосуда ток идёт от бывшего катода к бывшему аноду, а по внешней цепи — от анода к катоду. Прежняя катодная пластинка оказалась покрытой водородом, прежняя анодная — кислородом. Ионы водорода и кислорода переходят в раствор, как описано в § 91. ЭДС поляризации даёт ток поляризации, который длится до тех пор, пока водород и кислород не исчезнут с электродов.

Электролиз любого электролита возможен только тогда, когда напряжение на зажимах ванны больше ЭДС поляризации. Описанный выше прибор может

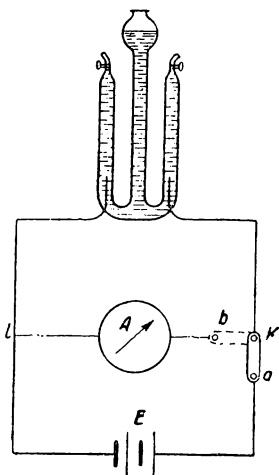


Рис. 122. Опыт, доказывающий появление тока поляризации.

в виде энергии тока поляризации возвращать обратно в цепь затраченную электрическую энергию (за исключением неизбежных потерь). На этом основании прибор этот можно назвать вторичным элементом, или аккумулятором (накопителем энергии).

Наиболее употребительны два вида аккумуляторов: кислотные и щелочные.

**94. Аккумуляторы.** *Кислотный, или свинцовый,* аккумулятор состоит из свинцовых пластин, опущенных в 20-процентный раствор серной кислоты (рис. 123).

Пластины электродов представляют собою свинцовую раму или пластину с ребристой поверхностью (рис. 123а), заполненную веществами, вступающими в реакцию. Таким

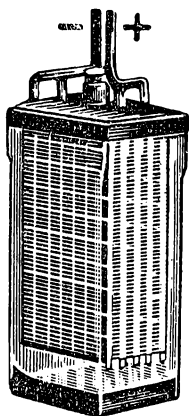


Рис. 123. Кислотный аккумулятор.

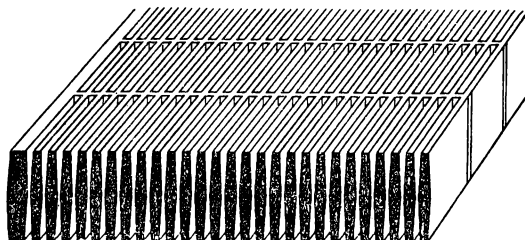


Рис. 123а. Положительная пластинка аккумулятора.

веществом на отрицательном полюсе заряженного аккумулятора является губчатый свинец, имеющий благодаря губчатости большую поверхность соприкосновения с жидкостью, на положительном полюсе — пористый слой перекиси свинца.

Для того чтобы после работы аккумулятора снова зарядить его, присоединяют его полюсы к одноимённым полюсам источника тока. При прохождении тока через аккумулятор в нём происходит электролиз серной кислоты; водород, выделяющийся на катоде, восстанавливает чистый свинец из его сернокислой соли, а кислород, выделяющийся на аноде, окисляет свинец сернокислой соли в перекись свинца с образованием серной кислоты.

Таким образом при зарядении после достаточно долгого пропуска тока мы будем иметь одну пластинку чистого свинца, другую — покрытую перекисью свинца, а концентрацию серной

кислоты в растворе — увеличившейся. При разрядке аккумулятора все процессы происходят в обратном направлении, возвращая в виде электрического тока энергию, затраченную при зарядке.

При разрядке аккумулятора свинец и перекись свинца переходят в сернокислую соль свинца, а концентрация серной кислоты уменьшается.

При зарядке ЭДС аккумулятора быстро поднимается до 2,1 вольта, под конец доходит до 2,7 вольта. При разрядке ЭДС быстро падает с 2,7 до 2 вольт, долго остаётся на этой величине и затем медленно спускается. Ниже 1,85 вольта продолжать разрядку аккумулятора не следует.

При разрядке ниже этого предела на электродах получается белый слой свинцовой соли серной кислоты  $PbSO_4$ , трудно растворимой, отчего ёмкость и к. п. д. аккумулятора понижаются.

Плотность тока не должна превышать 0,5 ампера на 1 дм<sup>2</sup> пластины. От неосторожного обращения или от очень сильного разрядного тока (при коротком замыкании) пластинки разрушаются, и аккумулятор портится. Аккумуляторы также портятся, если их держать незаряженными.

Большой прочностью по отношению к сильным разрядным токам и механическим сотрясениям обладают щелочные аккумуляторы, первым изобретателем которых был американец Эдисон. В них электролитом служит 20-процентный раствор едкого кали; отрицательным полюсом — стальная пластина, покрытая смесью окиси железа и окиси ртути; положительным полюсом — стальная пластина со смесью окиси никеля с графитным порошком. Пластина и жидкость помещаются в железный никелированный ящик с одним небольшим отверстием, замкнутым пробкой.

Реакции при разряде и заряде в железо-никелевом аккумуляторе не вполне выяснены. ЭДС щелочного аккумулятора — около 1,3 вольта.

**95. Ёмкость аккумулятора.** Ёмкостью аккумулятора называется полное количество электричества, которое может дать аккумулятор при разрядке. Ёмкость выражается в ампер-часах; ампер-час равен 3600 кулонам. Аккумулятор ёмкостью, например, в 20 ампер-часов может дать всего 72 000 кулонов. Использовать такое количество можно различными способами: или пропускать по цепи в течение 20 час. ток в 1 ампер, или за 10 час. при силе тока в 2 ампера, или сперва в течение 4 час. — ток в 0,5 ампера, затем в течение 16 час. — ток в  $\frac{3}{4}$  ампера и, наконец, в течение 6 час. — ток в 1 ампер и т. д.



Свинцовые аккумуляторы устраиваются ёмкостью от 5 до 1 000 ампер-часов; на каждый килограмм его веса приходится от 3,5 до 6 ампер-часов.

**96. Коэффициент полезного действия аккумулятора.** Если аккумулятор заряжался в течение  $t$  часов током в  $I$  ампер при напряжении на его пластинах в  $U$  вольт, то энергия, затраченная на заряд его  $W = IUt$  ватт-часов.

Если при разрядке аккумулятор давал в течение  $t_1$  часов ток  $I_1$  ампер при напряжении на пластинах в  $U_1$  вольт, то энергия разряда  $W_1 = I_1 U_1 t_1$  ватт-часов. Коэффициент полезного действия аккумулятора равен

$$\eta = \frac{W_1}{W} = \frac{I_1 U_1 t_1}{I U t}.$$

В современных аккумуляторах этот коэффициент доходит до 75—85%.

### 97. Применение аккумуляторов.

1. Аккумуляторы позволяют сохранять энергию, переносить её в любое место и использовать в любое время. Батареи аккумуляторов служат хорошим источником постоянного тока для лабораторий.

2. Иногда на электрических станциях батарея аккумуляторов включается параллельно динамомашине (рис. 124). При небольшом расходе в цепи энергии, получаемой от динамомашин, можно направлять избыток её на заряд аккумуляторов (замкнуть  $K_3$ ,  $K_1$  на  $b$  и  $K_2$ ); при большом расходе энергия аккумуляторов складывается с энергией динамо для питания цепи.

Присоединяя  $K_1$  к  $a$ , можно питать внешнюю цепь только от динамо; присоединив  $K_1$  к  $b$ , можно только заряжать батарею; разомкнув  $K_1$  и  $K_3$  и замкнув  $K_2$ , можно питать сеть только от аккумуляторов.

3. Аккумуляторы применяются для освещения автомобилей, автобусов, вагонов.

4. Батареи аккумуляторов питают моторы для передвижения небольших экипажей, например платформ для подвозки грузов к вагонам на крупных станциях. В частности аккумуляторы дают ток для питания моторов в подводных лодках при движении под водой.

5. Наконец, аккумуляторы находят применение в радиоустановках для питания ламповых приёмников.

### Упражнение 14.

1. Ёмкость аккумулятора 20 ампер-часов. Сколько кулонов электричества можно от него получить? Какой ток он может дать в течение 10 суток, работая 12 час в сутки?

Отв. 0,17 А.

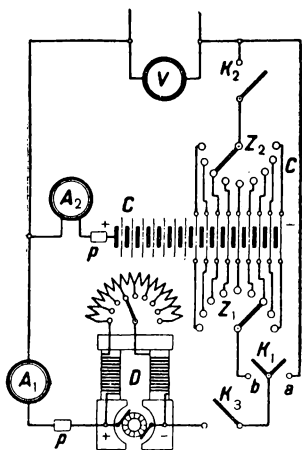


Рис. 124. Схема присоединения к динамо батареи аккумуляторов.

2. Зарядка аккумулятора током в 5 ампер при напряжении на его пластинках в среднем в 2,15 вольт продолжалась 10 ч. 10 м. При разрядке аккумулятор давал ток в 6 ампер при напряжении в 2 вольта в течение 7 ч. 20 м. Найти коэффициент полезного действия аккумулятора.

*Отв.* 0,81.

3. ЭДС элемента Вольта равна 1 вольту; ЭДС поляризации в нём равна 0,5 вольта. Какова будет мощность тока во внешней цепи с сопротивлением в 9 омов, если внутреннее сопротивление элемента равно 1 ому?

*Отв.* 0,0225 вт.

4. Батарея аккумуляторов заряжалась в течение 15 час. током в 10 ампер при напряжении на зажимах батареи в 20 вольт. Разрядный ток в 5 ампер при напряжении в 18 вольт продолжался 12 час. Найти коэффициент полезного действия батареи аккумуляторов.

*Отв.* 0,36.

5. ЭДС аккумулятора 2 вольта; внутреннее сопротивление 0,01 ома, предельная сила разрядного тока 20 ампер. Во сколько раз сила тока при коротком замыкании ( $r_e = 0$ ) будет превосходить предельную?

*Отв.* 10.

6. Напряжение в сети должно быть равно 110 вольтам; при зарядке наименьшее напряжение аккумулятора 1,8 вольта; среднее 2,2 вольта; наибольшее при зарядке 2,75 вольта. Сколько аккумуляторов необходимо включить в батарею, чтобы она поддерживала напряжение цепи при наименьшем и нормальном напряжении каждого?

*Отв.* 61; 50.

7. Какое количество свинцовых аккумуляторов (рассчитывая по наименьшему напряжению при разрядке) и какой ёмкости надо приобрести для питания дежурного освещения в течение 4 ночных часов 100 25-ваттных лампочек, горящих под напряжением 100 вольт? Расстояние от станции до места потребления 91,5 м; площадь сечения провода 16 мм<sup>2</sup>.

*Отв.* 58 аккумуляторов.

8. Аккумулятор на 20 ампер-часов служит для накала двух ламп радиоприёмника. На сколько часов хватит заряда аккумулятора, если через каждую лампу проходит ток силою в 0,05 ампера? (Лампы соединены параллельно.)

9. Автомобильная аккумуляторная батарея составлена последовательно из трёх аккумуляторов по 2 вольта и с внутренним сопротивлением 0,1 ома каждый. Сопротивление внешней цепи 11,7 ома. Найти силу тока и падение напряжения на внутреннем сопротивлении аккумулятора.

*Отв.* 0,05 вольта.

10. Батарея в 116 вольт с внутренним сопротивлением в 0,3 ома заряжает аккумуляторную батарею с обратной ЭДС поляризации в 100 вольт и полным сопротивлением в 0,2 ома. Провода, соединяющие между собой положительные полюсы обеих батарей, имеют сопротивление в 0,5 ома; провода, соединяющие отрицательные полюсы, — сопротивление в 1 ом. Зарядка продолжается 10 час.

Найти: 1) силу заряжающего тока; 2) полное число кулонов, протекающих по цепи; 3) напряжение в проводах, соединяющих положительные полюсы; 4) напряжение в проводах, соединяющих отрицательные полюсы; 5) падение потенциала на внутреннем сопротивлении заряжающей батареи; 6) падение потенциала на внутреннем сопротивлении аккумуляторной батареи; 7) электрическую энергию, развиваемую зарядной батареей; 8) энергию, идущую на зарядку аккумуляторной батареи (при ЭДС = 100 вольт); 9) энергию, потраченную на нагревание сопротивлений в обеих батареях и в соединительных проводах; 10) показание вольтметра на полюсах заряжающей батареи при замкнутой цепи; 11) показание вольтметра на полюсах аккумуляторной батареи при

замкнутой цепи; 12) мощность заряжающей батареи; 13) стоимость зарядки при цене  $20 \frac{\text{коп.}}{\text{квт-ч}}$ .

Отв. 1) 8 ампер; 3) 4 вольта; 8) 28 800 000 джоулей; 11) 101,6 вольта; 13) 1 р. 86 к.

**98. Техническое применение электролиза.** Прикладная электрохимия распадается на две основные части: гальванотехнику и электрометаллургию.

Гальванотехника охватывает случаи электролитического осаждения металлов непосредственно на готовые промышленные изделия или на определённым образом подготовленные формы этих изделий.

Электрометаллургия состоит в получении путём электролиза чистых металлов.

Гальванотехника оперирует с водными растворами металлических соединений. В зависимости от цели осаждения металла и толщины осаждаемого слоя гальванотехника подразделяется на три вида: гальваностегию, гальванотипию и гальванопластику.

Гальваностегия состоит в покрытии металлического предмета тонким (от нескольких микронов) слоем другого металла для того, чтобы предохранить первый металл от порчи или придать изделию большую прочность или красоту.

Гальванопластика имеет задачей получение толстых осадков (от десятых долей до нескольких миллиметров), отделяемых от оригиналов и употребляемых в качестве самостоятельных предметов.

Гальванотипия имеет целью получение массивных оболочек с предметов искусства и техники (восковые статуи, кружева, ткани) или с естественных предметов (листья, цветы, плоды, насекомые).

Во всех случаях гальванотехники предмет, покрываемый осаждающимся металлом, помещается в электролитическую ванну в качестве катода. Анодом служит металл, который должен быть осаждён на данном предмете. Электролит состоит из водного раствора соли осаждаемого металла. Выбор соли данного металла, состав и концентрация раствора и сила тока, допускаемая для той или другой цели, зависят от многих обстоятельств и не могут быть здесь рассмотрены, составляя чисто техническую задачу.

Ограничимся здесь рисунком гальванической ванны (рис. 125), в которой производится осаждение металла, и рисунком (рис. 126), показывающим способ подвеса металлических предметов для гальваностегии на катоде (например для никелирования).

Отметим частные случаи гальванотехники.

Матрицы для граммофонных пластинок изготавливаются гальванопластически с основной напетою пластинки.

Звук записывается на восковой пластине. С этой восковой пластины получают электролитическим способом металлический рельефный отпечаток.

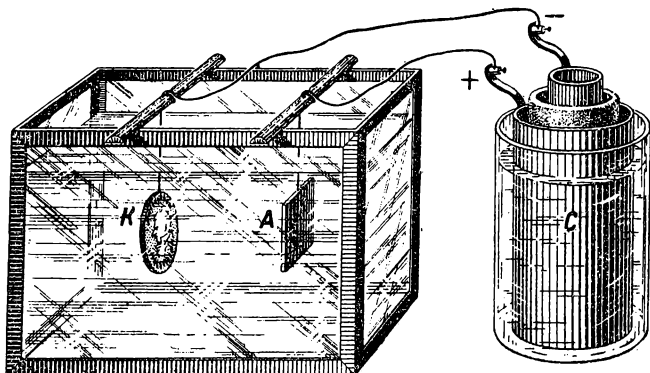


Рис. 125. Ванна для гальванопластики.

Вдавливая металлический отпечаток в пластичную массу (разного состава у разных заводов), можно приготовить большое число пластинок, совершенно сходных с оригиналом.

Типографское клише покрывается гальваностегически тонким слоем более выносливого металла. Таким образом, количество от-

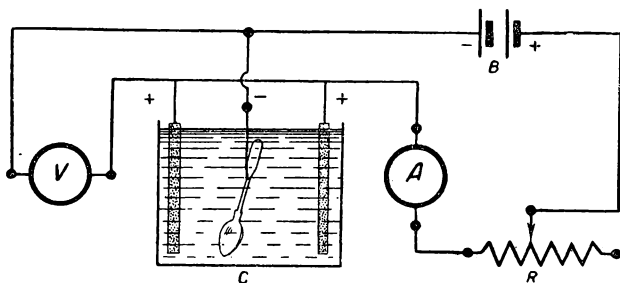


Рис. 126. Прибор для гальваностегии.

тисков увеличивается во много раз; например, медное клише допускает до 40 000 оттисков, а медное гальванохромированное — до 1 500 000.

Гальванопластику изобрёл русский учёный Б. С. Якоби.

**99. Электрометаллургия.** Электролизом пользуются для получения многих чистых металлов. Укажем здесь, как этим спосо-

бом добывают медь и алюминий. Для получения меди электролитическим путём чаще всего в качестве исходного сырья пользуются довольно распространённой в природе медной рудой — медным колчеданом<sup>1)</sup>. Выплавленная из руды так называемая чёрная медь (медь, содержащая ряд примесей) поступает на электролитный завод, где из неё путём электролиза выделяется химически чистая — рафинированная — медь. Получение её сводится к следующему. В больших электролитических ваннах, наполненных раствором медного купороса, в качестве анода используют чёрную медь, а в качестве катода — тонкие листы чистой меди. Напряжение на ваннах и ток устанавливают определённой величины<sup>2)</sup>. Происходит электролиз, в результате которого из чёрной меди в раствор выходят ионы меди, а из раствора медь отлагается на катоде.

Для получения алюминия подвергают электролизу не растворы солей этого металла, а расплавленные окислы его. Для этой цели пользуются большими угольными тиглями (рис. 127).

В тигли всыпают глинозём ( $Al_2O_3$ ), полученный путём переработки руд, содержащих алюминий (бокситы); тигель при этом служит катодом; угольные стержни, вставляемые в тигель, служат анодом. Сначала угольные стержни опускают до соединения с тиглем и пропускают сильный ток. Приподняв стержни, получают



Б. С. Якоби<sup>3)</sup>  
(1801—1874).

1) У нас на Урале, в местечке Карабаш, имеются богатые залежи этой руды, где она и обрабатывается. Обильное месторождение медной руды находится также в Джезказгане и во многих других районах СССР.

2) Порядок выделения металлов из электролита зависит от напряжения на ванне; медь выделяется при меньшем напряжении, чем большинство металлов.

3) Гальванопластику открыл русский академик Якоби Борис Семёнович (1801—1874).

В материалах, посвящённых пятидесятилетнему юбилею открытия гальванопластики, находим следующее высказывание Русского технического общества: „Полстолетия назад было сделано одно из важнейших открытий в области прикладных знаний, оказавшее громадное влияние на развитие и распространение наук и искусств. Это открытие — гальванопластика. В истории образованности открытие гальванопластики должно быть приравнено по своему значению к открытию книгопечата-

вольтову дугу, которая расплавляет глинозём. После этого ток проходит через жидкость и производит электролиз. Чистый алюминий в расплавленном виде скопляется на дне тигля, как на катоде. Время от времени его выпускают из нижнего отверстия тигля. Металлы натрий, калий, магний и др. добываются подобным же образом.

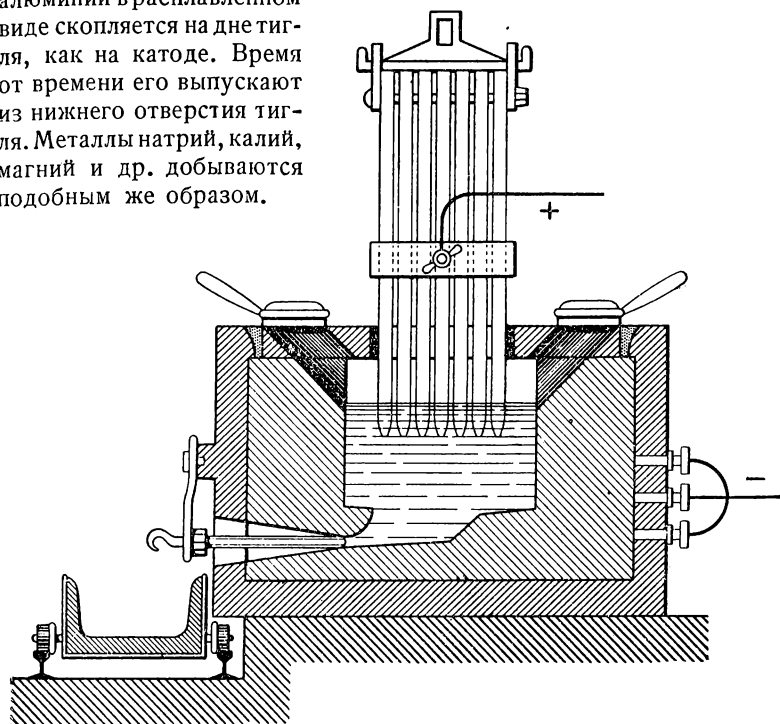


Рис. 127. Получение алюминия электролизом.

У нас в Союзе за время социалистических пятилеток построены большие алюминиевые заводы, покрывающие потреб-

ния, а для России открытие это имеет ещё и другую цену — оно сделано в России русским учёным, академиком Якоби\*.

Б. С. Якоби разработал конструкцию электродвигателя, признанную в его время наиболее удачной, и издал сочинение „О применении электромагнетизма для приведения в движение машин“. В сентябре 1838 г. по Неве прошло первое в мире судно, приводившееся в движение электродвигателем Якоби.

Известны также его труды в области телеграфии; им созданы буквопечатные аппараты и предложен способ изоляции подземного провода.

ность в алюминии социалистического строительства (в особенности самолётостроения).

До революции страна должна была пользоваться заграничным алюминием.

Алюминиевые заводы, как потребляющие большое количество электроэнергии, строятся преимущественно около больших гидроэлектростанций.

**99а. Коррозия металлов.** Во всех металлических сооружениях, состоящих из соединения разнородных металлов, при покрытии их влажной плёнкой из воздуха, во влажной почве или при соприкосновении с водой происходит электролиз, разрушающий металлы. Этот процесс разрушения металлов называется коррозией. От коррозии приходит в негодность за 30 лет около 40% всех железных изделий. Особенно сильное разрушение от коррозии происходит при контакте металлов с другими металлами, имеющими меньшую упругость растворения. Так, в некоторых местах Южной Америки, где воздух содержит много влаги и соляной пыли, самолёты из дуралюминия разрушались через несколько месяцев, несмотря на самый тщательный уход. С коррозией ведётся усиленная борьба. В особенности важна эта борьба в нашем Союзе, так как широко развивающаяся социалистическая промышленность требует многочисленных металлических сооружений. Во время Великой Отечественной войны советские учёные изобрели эффективные способы борьбы с коррозией.

**100. Электропроводность газа.** Газы и пары при обыкновенных условиях являются плохими проводниками электричества. Этим объясняется возможность электростатических опытов, при которых заряд, сообщённый изолированному проводнику, может длительное время оставаться на проводнике. Наблюдаемые во время этих опытов постепенные потери зарядов происходят большей частью вследствие недостаточной изоляции подставок или подвесов.

Кулон ещё в конце XVIII в. во время своих исследований над взаимодействием наэлектризованных тел нашёл, что наэлектризованный изолированный проводник теряет свой заряд не только через подставку, но и прямо в окружающий воздух. Этим наблюдением был установлен факт электропроводности воздуха при обыкновенных условиях.

В настоящее время известно много способов повышать электропроводность воздуха. Простейший из них — внесение в воздух или вообще в газ пламени. Если к заряженному телу, например к электроскопу, поднести пламя спички или горелки, то заряд быстро исчезает и листочки электроскопа опадают.

Возникновение электропроводности газов в этом случае объясняется расщеплением в пламени молекул газа на две части: электрон и положительный ион. *Разделение молекул газа на электрон и положительно заряженный ион называется ионизацией газа.*

Такое же действие производят и другие явления, излагаемые в дальнейших частях книги: удар электронов и ионов (§ 102); катодные лучи (§ 106); анодные лучи (§ 107); ультрафиолетовые лучи (§ 208); рентгеновы лучи (§ 219); лучи радиоактивных веществ. Все перечисленные частицы и лучи, вызывающие ионизацию, называются ионизаторами.

Ионизация газа и ионизация жидкости различаются между собой.

Электролитическая диссоциация жидкости состоит в распаде молекулы на две части, несущие на себе заряды.

При ионизации газа от молекулы всегда отделяются электроны, и остаётся ион в виде положительно заряженной части молекулы.

Но электроны и газовые ионы в большинстве случаев присоединяются к одной или нескольким нейтральным молекулам, и таким образом в газе возникают обычные ионы, лёгкие или тяжёлые, в зависимости от числа присоединённых нейтральных молекул; эти подвижные газовые ионы приходят в движение в электрическом поле и создают электрический ток в газах.

Положительно заряженный проводник притягивает к себе отрицательные ионы, созданные каким-либо ионизатором, и отталкивает от себя положительные ионы. Притянувшиеся к положительно заряженному проводнику отрицательные ионы отдают недостающие этому телу электроны, уменьшают его положительный заряд и нейтрализуются сами. Подобное же происходит и с отрицательно заряженным проводником.

Процесс ионизации газа всегда сопровождается противоположным ему процессом восстановления нейтральных молекул из разнородно заряженных ионов вследствие их взаимного притяжения. Восстановление молекул из ионов называется молизацией газа, или рекомбинацией ионов. При ионизации газа каким-либо ионизатором может наступить подвижное (динамическое) равновесие, при котором в каждую единицу времени столько же восстанавливается молекул, сколько распадается на ионы (сравнить с динамическим равновесием, наступающим при насыщении пространства паром). Если прекратить действие ионизатора, то молизация начнёт преобладать над ионизацией, и электропроводность газа уменьшается. *Проводимость газа —*



явление временное<sup>1)</sup>. Этим ионизация газа отличается от ионизации растворов. В растворе количество диссоциированных молекул остаётся неизменным.

**101. Зависимость между силой тока в газе и разностью потенциалов.** Как известно, в металлических проводниках существует электронная проводимость, т. е. ток состоит из движущихся электронов; электролиты обладают ионной проводимостью, т. е. в них электрический ток образуется ионами, движущимися по двум противоположным направлениям.

Как для проводников первого рода, так и для проводников второго рода сила тока в проводнике и разность потенциалов на его концах (или напряжение на проводнике) связаны между собой законом Ома.

Подчиняется ли ток в газе тому же закону?

Исследование в газе производится в ионизационной камере. Эта камера (рис. 128) представляет собой металлический ящик *A*, внутри которого помещён изолированный плоский конденсатор *C*. Одна пластина его отведена к земле, другая соединяется с одним полюсом батареи *B*, второй полюс которой отведён к земле.

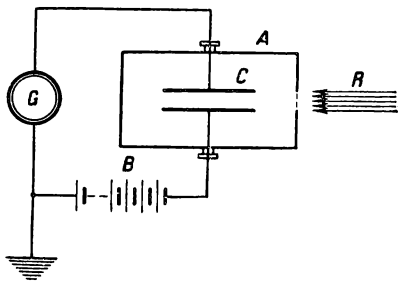


Рис. 128. Ионизационная камера.

Изменяя число элементов в батарее, можно пластине конденсатора, соединённой с полюсом батареи, сообщать различные потенциалы.

При отсутствии ионизатора чувствительный гальванометр *G*, включённый в цепь, не покажет никакого тока в цепи.

Приблизим теперь к окошку в ионизационной камере какой-либо ионизатор, например рентгенову трубку.

Предположим сперва, что обе пластины конденсатора соединены с землёй. Тогда тока между пластинами и дальше по цепи не будет даже при наличии ионизатора. В отсутствии поля ионы совершают беспорядочное движение.

Дадим теперь одной пластине малый положительный потенциал. Напряжённость возникшего поля будет двигать ионы в

<sup>1)</sup> Наблюдавшаяся Кулоном электропроводность воздуха при отсутствии пламени объясняется тем, что постоянно действует какой-либо из других перечисленных выше ионизаторов.

определённом направлении: положительные ионы будут двигаться в направлении силы поля от положительно заряженной пластины к пластине с нулевым потенциалом, отрицательные ионы — в противоположном направлении. Возникает ток, сила которого измеряется гальванометром.

Будем постепенно увеличивать потенциал пластины; сила тока постепенно увеличивается.

Измерения силы тока и прикладываемого к пластинам напряжения обнаруживают, что при малых напряжениях сила тока прямо пропорциональна разности потенциалов или напряжению. Следовательно, *при малых напряжениях ток в газе подчиняется закону Ома*. В этом случае из всего числа ионов, образуемых ионизатором, большая часть молизуется, и только остающаяся часть достигает пластин, составляя электрический ток.

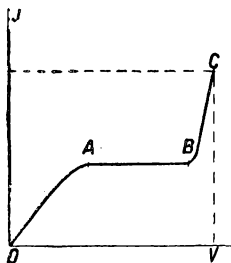


Рис. 128а.

Если составить график зависимости силы тока от напряжения, отлагая на оси абсцисс в виде отрезков значения напряжения и на оси ординат — значения соответствующих сил тока, то эта часть явления выразится частью графика  $OA$ , близкой к прямой, проходящей через начало координат (рис. 128а).

При дальнейшем возрастании разности потенциалов, приложенных к пластинам, возникает такая сила поля, при которой скорости ионов возрастут настолько, что рекомбинации ионов происходить не будет<sup>1)</sup>.

В таком случае все ионы, образуемые в единицу времени ионизатором, будут уводиться силой поля; сила тока достигает наибольшей возможной для данного ионизатора величины. Дальнейшее увеличение разности потенциалов уже не может увеличить силу тока, так как нет резервных ионов, которые могли бы быть дополнительно пущены в ход. С этого момента сила тока перестаёт зависеть от напряжения.

Ток, сила которого не зависит от разности потенциалов, называется током насыщения.

К току насыщения уже неприменим закон Ома. На графике эта часть явления изображается прямой  $AB$ , параллельной оси абсцисс.

<sup>1)</sup> Если она и будет происходить, то практически ею можно пренебречь.

При дальнейшем увеличении разности потенциалов сила тока начинает возрастать очень быстро. Такое непропорционально большое возрастание силы тока сравнительно с возрастанием напряжения указывает на то, что появились ионы ещё от какой-то другой причины сверх тех, которые образованы данным ионизатором. Этой новой причиной является ионизация толчком или ударом.

Эта последняя стадия явления представлена на графике частью *BC*.

**102. Ионизация толчком.** По мере возрастания силы поля скорости газовых ионов возрастают; вместе со скоростью растёт и их кинетическая энергия. При некоторой разности потенциалов, превышающей величину, соответствующую току насыщения, кинетическая энергия некоторых быстрее ионов становится достаточной, чтобы при столкновении с нейтральной молекулой расщепить её на ионы (электрон и положительный ион).

При дальнейшем возрастании разности потенциалов растёт и число ионов, кинетическая энергия которых достаточна для расщепления встречных молекул. Тогда один ион может создать при своём движении множество ионов: после первого столкновения иона с молекулой получатся три иона; эти ионы в свою очередь под действием сил электрического поля приобретают большие скорости и при столкновении с нейтральными молекулами расщепляют их и т. д.

Таким образом, три иона при дальнейшем столкновении с нейтральными молекулами составят вместе с вновь образованными ионами девять ионов; эти девять при следующем столкновении вместе с новыми ионами дадут двадцать семь и т. д. Число ионов растёт, как растёт снежный ком при падении с горы, поэтому это быстрое нарастание числа движущихся ионов называется ионной лавиной.

Итак, одним из способов ионизации является ионизация толчком, при которой кинетическая энергия движущихся ионов достигает значения, достаточного для расщепления толчком нейтральных встречных молекул на ионы.

Сила тока в случае, когда начинается ионизация толчком, возрастает значительно быстрее возрастания напряжения.

*Итак, сильное электрическое поле в пространстве между электродами само может создать условие, необходимое для прохождения электрического тока через газ; для этого достаточно, чтобы в этом пространстве был хоть один ион.*

Разрядный ток в газе, происходящий при достаточно высокой разности потенциалов и не прекращающийся после

прекращения действия ионизатора, называется самостоятельным разрядом. Разрядный ток, проходящий только при действии ионизатора, называется несамостоятельным разрядом.

**103. Разряд в газах при атмосферном давлении.** Так как в воздухе всегда имеется небольшое количество ионов и так как сильное электрическое поле само производит дальнейшую ионизацию толчком, то при значительной разности потенциалов между электродами может происходить разряд и в отсутствие постороннего ионизатора.

Разряды при атмосферном давлении известны трёх различных видов.

1. *Тихий разряд.* а) При достижении определённой разности потенциалов начинается не светящийся (тёмный) разряд. Он не сопровождается световыми явлениями и может быть отмечен электрометром по падению потенциала проводника. Такой разряд при данной разности потенциалов легче всего начинается между остриём и плоскостью.

б) *Кистевой разряд.* Условия его возникновения: повышение разности потенциалов между электродами, увеличение силы тока между ними, небольшие размеры электродов, значительное расстояние между ними.

Вид кистевого разряда: у анода светящаяся фиолетовая кисть, у катода — светящаяся звёздочка. Кистевой разряд состоит из маленьких искр, быстро гаснущих по мере удаления от проводника.

Подобное же сияние происходит на концах мачт, верхушках деревьев и на других остриях в тех случаях, когда напряжение электрического поля в атмосфере достигает громадных размеров; это сияние носит название „огней Эльма“.

Сила тока при таком тихом разряде измеряется десятитысячными долями ампера.

В случае наличия острия на одном из электродов разряд начинается при меньших потенциалах, чем в том случае, когда электроды не имеют остриёв; при этом для того случая, когда остриё имеет отрицательный заряд, разрядное напряжение меньше, чем для случая положительно заряженного острия. Если остриё заряжено отрицательно, то к нему устремляются положительные ионы, которые, помимо ионизации газа по пути к острию, выбивают ещё электроны из самого отрицательно заряженного острия. Это последнее явление не имеет места, если остриё заряжено положительно, поэтому в этом случае число ионов газа, принимаю-

щих участие в электрическом токе, при том же напряжении меньше, чем в случае отрицательного заряда на острие.

в) **Коронный разряд.** На проводах высокого напряжения, по которым передаётся энергия от электростанций, в особенности в случае наличия на них неровностей, острых краёв и т. д., в темноте наблюдается свечение. Это свечение покрывает провод светящимся чехлом, получившим название *короны*. В случае короны происходит разряд между проводами. Однако наличие второго провода не обязательно, его может заменять земля, т. е. разряд может происходить между проводом и землёй. Корона является источником потерь в линиях передачи высокого напряжения.

II. *Разряд в виде вольтовой дуги.* Если расстояние между электродами уменьшается и сами электроды нагреваются, то между ними начинается разряд в форме вольтовой дуги, состоящей не только из раскалённых газов, но и раскалённых паров тех металлов, из которых сделаны электроды. Присутствие паров можно узнать по линиям в спектре дуги. Образование и применение вольтовой дуги рассмотрено в § 64.

III. *Искровой разряд.* Когда напряжение между какими-либо точками достаточно для ионизации толчком, но нет непрерывного притока электричества, необходимого для поддержания постоянного тока, то возникает кратковременный разряд, обнаруживающийся в виде *искры*. Искровой разряд, например, происходит между концами вторичной обмотки в индукционной катушке, между обкладками конденсаторов, соединяемыми разрядником, между двумя разноимённо заряженными облаками или между облаком и землёй. Искровой разряд атмосферного электричества называется *молнией*. Давление, образуемое ионами в электрической искре, достигает нескольких сот атмосфер; поэтому искрой можно пробить толстый картон или стекло. Сотрясения, получаемые молекулами при столкновении их с быстро движущимися электронами и ионами, обнаруживаются в выделении тепла и в образовании звуковых волн.

Для всякого газа существует определённая разность потенциалов, ниже которой через него не может проскочить электрическая искра, как бы ни был тонок слой газа между электродами. Такими предельными значениями для разности потенциалов являются: у воздуха 341 вольт; у кислорода 455 вольт; у водорода 278 вольт; у углекислого газа 419 вольт.

Длина искры может служить приближённой мерой разности потенциалов между электродами.

Если электроды взяты в форме дисков, то:

Длина искры в <i>см</i> . .	0,02	0,043	0,091	0,215	0,286	0,323
Разность потенциалов в вольтах . . . . .	1000	2000	4000	8000	10 000	11 000

**104. Молния.** Молния наиболее грандиозная форма искрового разряда в нижнем слое атмосферы, выравнивающая потенциалы между облаком и землёй или между облаками.

Линейная, или искровая, молния возникает, когда напряжённость поля атмосферного электричества достигает  $30\,000 \frac{\text{вольт}}{\text{см}}$ . Толщина канала молнии 40—50 *см*; канал почти всегда разветвляется. Длина молнии доходит до 10 *км*. Сила тока доходит в среднем до 20 000 ампер. При продолжительности молнии в 0,001—0,2 сек. в ней проходит не более 100 кулонов электричества.

**105. Разряд в разрежённых газах.** Ионы могут получать необходимую для разрушения молекул кинетическую энергию не только от увеличения напряжения, но и при неизменном напряжении благодаря увеличению свободного пути пробега от столкновения до столкновения с молекулой; на длинном пути более длительное действие силы может сообщить большую скорость, так что приобретённой в конце пути энергии будет достаточно для расщепления молекулы при меньшем сравнительно напряжении. Увеличение пути пробега газовых ионов может быть достигнуто разрежением газа в стеклянной трубке. Чтобы наблюдать разряд в разрежённых газах, электроды вплавляются в трубку, откуда выкачивается воздух, и соединяются с источником напряжения (с проводниками электрофорной машины или с концами вторичной обмотки катушки Румкорфа, § 134).

По мере выкачивания газа из трубки, при одном и том же расстоянии электродов, электрический разряд меняет свой вид.

Первоначальный тлеющий разряд сменяется тонким искровым жутиком и при давлении, равном 0,01 атмосферного давления, переходит в широкий светящийся столб с различным свечением у анода и катода (рис. 129, *a*). При дальнейшем разрежении воздуха анодное сияние становится розоватым, катодное — голубоватым (рис. 129, *b*). Далее сияние распадается на слои (рис. 129, *c, d*). При ударе о молекулы скорость иона умень-

шается, и прежняя величина скорости снова достигается только после нового пробега, поэтому ионизация от столкновения получается только в некоторых местах трубки. Свечение возникает в тех частях трубки, где происходит ионизация толчком; отсюда простекает слоистость свечения. При миллионной доле атмосферного давления сияние исчезает совсем, а начинает светиться стекло против катода (рис. 129, e).

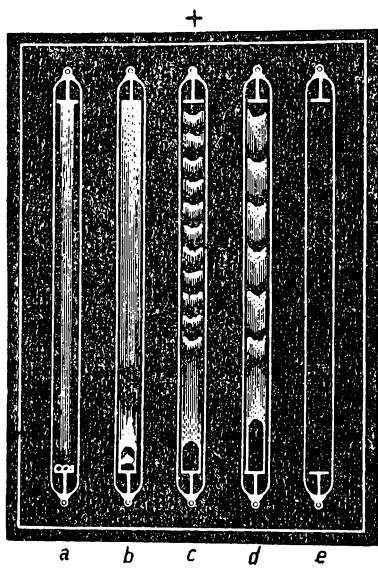


Рис. 129: Различные виды сияния по мере разрежения газа.

При миллионной доле атмосферного давления сияние исчезает совсем, а начинает светиться стекло против катода (рис. 129, e).

**106. Катодные лучи.** Если в сосуде с разрежением до миллионной доли атмосферы — так называемой *кр у к с о в о й* <sup>1)</sup> трубке — сделать какой-нибудь фигурный анод, например в фор-

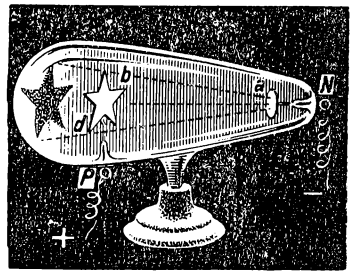


Рис. 130. Прямолинейное распространение катодных лучей.

ме звезды (рис. 130), то стекло против катода светится не всё, а на нём появляется тёмная часть (тень) в форме такой же звезды. Если подносить к трубке магнит, то тень смещается со своего места. Смещение тени указывает на то, что в трубке существует ток, т. е. происходит движение электричества. Поднося разные полюсы магнита и наблюдая смещение, можно по правилу левой руки определить направление тока. Опыт показывает, что в круксовой трубке движется отрицательное электричество от катода (рис. 131, a). К тому же выводу приводит и смещение тени под действием положительно или отрицательно заряженных пластинок: первая притягивает к себе этот поток, вторая

<sup>1)</sup> По имени английского учёного Крукса, производившего исследования над разрядом в разрежённых газах в 1880 г.

отталкивает его (рис. 131, б). В 1895 году Перрен направил поток частиц, исходящих из катода, внутрь цилиндра (рис. 132), помещённого внутри трубки, и через проволоку, впаянную в трубку, соединённого с электроскопом. Электроскоп показал отрицательный заряд.

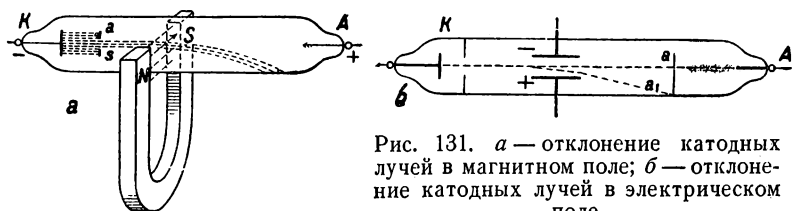


Рис. 131. а — отклонение катодных лучей в магнитном поле; б — отклонение катодных лучей в электрическом поле.

Все эти опыты привели к выводу: в кружковой трубке от катода несётся поток свободных электронов. Этот поток свободных электронов получил название катодных лучей.

Над катодными лучами было проделано чрезвычайно много опытов и наблюдений, которые позволили установить, что катодные лучи распространяются прямолинейно, в направлении,

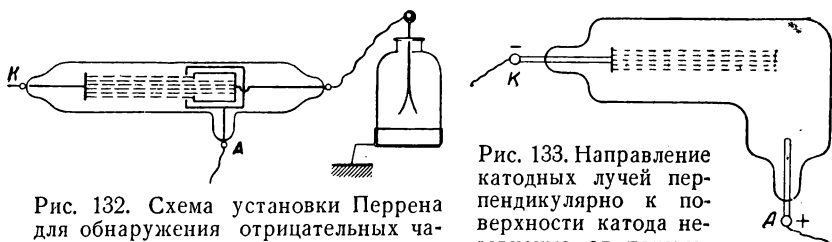


Рис. 132. Схема установки Перрена для обнаружения отрицательных частиц, составляющих катодные лучи.

Рис. 133. Направление катодных лучей перпендикулярно к поверхности катода независимо от положения анода.

перпендикулярном к поверхности катода, и направление их не зависит от положения анода в трубке (рис. 133). Установлено, что катодные лучи отклоняются как в электрическом, так и в магнитном поле. Измерение этих отклонений позволило вычислить отношение заряда к массе и скорость катодных частиц. При дальнейших вычислениях оказалось, что заряд катодных частиц имеет всегда одно и тоже значение  $e = -4,8 \cdot 10^{-10} \text{ CGSE} = -1,6 \cdot 10^{-19} \text{ кулона}$ , т. е. величину элементарного заряда. Масса этих частиц оказалась приблизительно в 1840 раз меньше массы атома водорода и равна  $9 \cdot 10^{-28} \text{ г}$ . Что касается скорости движения катодных частиц, то она увеличивается с ростом приложенного к трубке напряжения.



Катодные лучи обладают кинетической энергией; будучи сфокусированы на поверхности металла, они нагревают его и могут расплавить; удавалось расплавлять даже платину. Катодные лучи, падающие на лопасти лёгкого колёсика, помещённого на их пути и опирающегося своей осью на горизонтальные рельсы, приводят его в движение, что указывает на производимое катодными лучами давление на лопасти колёсика. Катодные лучи, воздействуя на помещённые на их пути различные вещества, как, например, углекислые, сернокислые, сернистые соли некоторых металлов, вызывают свечение их <sup>1)</sup>). Катодные лучи, проходя через газы, ионизируют их и вызывают свечение газа.

Катодные лучи действуют на фотопластинку, следовательно, могут вызывать химические действия. Наконец, было установлено, что катодные лучи могут вызывать появление особого вида излучения, которое известно под именем лучей Рентгена.

Свечение разрежённых газов при прохождении через них электронов происходит в природе в виде величественного явления полярных сияний. Полярное сияние вызывается движением электронов через разрежённые газы атмосферы. Они наблюдаются наиболее часто на высотах, немного превышающих 100 км.

Годичное число полярных сияний имеет такой же ход, как и число солнечных пятен, поэтому можно предполагать, что электроны, вызывающие полярное сияние, имеют солнечное происхождение.

**107. Анодные лучи.** Если поместить катод внутри трубки и сделать в нём отверстия (рис. 134), то в пространстве за катодом (по другую сторону от анода) также можно обнаружить свечение стекла и так же, как и в случае катодных лучей, получить на светящемся стекле тень.

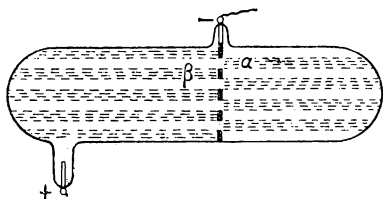


Рис. 134. Анодные лучи.

Магнитное поле вызывает отклонение тени в сторону, противоположную отклонению катодных лучей. Эти опыты приводят к заключению, что *в круцовой трубке в закатодном пространстве несётся поток частиц, заряженных положительно.* Поток положительно заряженных частиц в круцовой трубке

<sup>1)</sup> Такое свечение без повышения температуры называется люминесценцией.

движется так, как будто он исходит от анода; эти частицы называются *анодными лучами*.

Анодные лучи: 1) отклоняются в магнитном поле; 2) отклоняются в электрическом поле (много слабее, чем катодные лучи); 3) вызывают свечение солей; 4) сильно поглощаются газами и другими телами; 5) ионизируют газы; 6) имеют скорость до  $10^7$  см/сек; 7) состоят из ионов того же газа, который помещён в трубке (и из небольшого числа частиц электродов).

**108. Термоэлектронный ток.** Поток электронов в трубке, откуда выкачан воздух, можно получить и без значительного электрического напряжения, как это происходит в кружковой трубке.

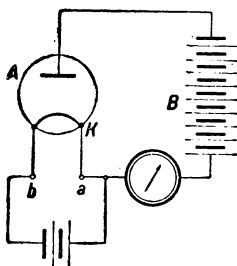


Рис. 135. Схема двух-электродной электронной лампы.

Надо вспомнить, что в металлах существуют свободные электроны (§ 8). Свободные электроны в металлах находятся в постоянном движении, но движения эти хаотичны. Скорости движения свободных электронов так же, как и самих молекул тела, увеличиваются с возрастанием температуры. При температуре каления некоторые из электронов, скорости которых возросли до значительной величины, могут вылетать за пределы тела. *Электроны, которые вылетают из накаливаемого проводника, получили название термоэлектронов.*

Включим пустотную<sup>1)</sup> трубку в цепь батареи *B* (рис. 135) с небольшой ЭДС; пока катод остаётся холодным, в такой цепи никакого тока существовать не будет, так как разрежённый газ между катодом *K* и анодом *A* является непроводником.

По мере накаливания катода *K* током от дополнительной небольшой батареи из него начинает вылетать всё более сильный поток электронов. Эти электроны, выходящие из катода, будут притягиваться положительно заряженным анодом, и таким образом устанавливается постоянный термоэлектронный ток внутри трубки от катода к аноду, что соответствует техническому направлению тока от анода к катоду. Пустотная трубка, в которой устанавливается ток при накале катода, называется электронной или катодной лампой.

Если соединить электрод *A* лампы с отрицательным полюсом батареи *B*, а электрод *K* — с положительным, то термоэлектро-

<sup>1)</sup> Трубка с высокой степенью разрежения.

ны, выбрасываемые накаливаемым электродом  $K$ , уже не понесутся к электроду  $A$ , так как на нём теперь будет находиться отрицательный заряд, который будет отталкивать от себя электроны. В этом случае тока через лампу не будет.

Если же соединить электроды  $A$  и  $K$  с источником переменного тока, то через лампу будет проходить ток только в то время, когда  $A$  будет анодом и  $K$  — катодом. На этом свойстве лампы основано её применение как в прямом, так и в переменном токе (§ 151).

Если трубка не соединена с источником напряжения, то от раскалённого катода и в этом случае будут вылетать электроны, только теперь электроны притягиваются обратно к катоду, падают на него, на их место вылетают другие; над поверхностью накалённого металла образуется так называемое „электронное облако“. Оно представляет собой „пространственный“ заряд.

Образование электронного облака над поверхностью накалённого металла представляет собой явление, сходное с испарением жидкости. Чем выше температура металла, тем большее количество электронов покидает поверхность накалённого металла.

Другие важные применения электронной лампы находят в радиотехнике, в этом случае её устройство более сложно (§ 152).

**Литература.** 1. Радовский М. И., Гальвани и Вольта. К 150-летию открытия электрического тока. 2. Сулима Л., Самодельные элементы. Массовая радиобиблиотека. 3. Постников, Гальванические элементы. 4. Изгарышев, Гальванопластика и гальваностегия. 5. Гюнтер и Кренке, Катодная лампа.

### **ВОПРОСЫ ДЛЯ ПРОВЕРКИ УСВОЕНИЯ.**

1. Что называется электролитической ванной? анодом? катодом?
2. Что называется электролитом? Какие вещества являются электролитами?
3. Что происходит с молекулами вещества в растворе при образовании электролита?
4. Что называется ионом? анионом? катионом?
5. В чём состоит процесс прохождения тока через электролиты?
6. Что такое электролиз?
7. В чём состоят вторичные реакции при электролизе? Приведите примеры их.
8. Является ли дистиллированная вода проводником? Может ли быть электролиз дистиллированной воды?
9. В результате чего может быть получен электролиз воды?
10. Что называется химическим эквивалентом? валентностью? Как выражается химический эквивалент через атомный вес и валентность?
11. Что такое грамм-эквивалент вещества?
12. Что называется электрохимическим эквивалентом?

13. В чём состоят законы Фарадея для электролиза?
14. Написать формулу законов Фарадея для электролиза.
15. Какое количество кулонов требуется при электролизе грамм-эквивалента вещества?
16. Сколько атомов в грамм-эквиваленте вещества?
17. Что такое электрон? На каких явлениях основано понятие о нём?
18. Показать на примерах, сколько электронов несут на себе различные ионы?
19. В чём состоит поляризация элементов?
20. Что такое деполяризация? Объясните её на элементе Даниэля.
21. В чём состоит поляризация электродов?
22. В каком случае не происходит поляризации электродов?
23. Что называется ЭДС поляризации?
24. Выше какого предельного значения должно быть напряжение на электродах, чтобы происходил электролиз?
25. Для какой цели можно пользоваться ЭДС поляризации?
26. Как называются приборы, в которых используется ЭДС поляризации?
27. Как устраиваются, заряжаются и действуют кислотные аккумуляторы?
28. Описать устройство щелочных аккумуляторов.
29. В каких единицах выражается ёмкость аккумулятора?
30. Что называется ампер-часом?
31. Как вычисляется коэффициент полезного действия аккумулятора?
32. Что называется батареей аккумуляторов?
33. Что называется последовательным соединением аккумуляторов в батарее?
34. Чему равны ЭДС и внутреннее сопротивление батареи аккумуляторов?
35. Как рассчитать силу тока в цепи от батареи аккумуляторов?
36. Какое применение аккумуляторов?
37. В чём состоит ионизация газов?
38. Какие существуют способы ионизации газов?
39. Как происходит прохождение электричества через газ?
40. Что такое ток насыщения в газе? Чем он обуславливается?
41. Перечислить виды разрядов в газе и условия их возникновения.
42. Как вид разряда в газе зависит от степени его разряжения?
43. Каковы происхождение и свойства катодных лучей?
44. Указать происхождение и свойства анодных лучей.
45. Что такое термоэлектронный ток? Что называется электронной лампой? Каковы её свойства? Как выпрямляется ток?

## V. ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ИНДУКЦИЯ.

### 109. Условие возникновения и величина ЭДС индукции.

В предыдущем было выяснено, что электрический ток создаёт вокруг себя магнитное поле. Естественно поставить вопрос, нельзя ли при помощи магнитного поля возбудить ток? Эта мысль возникла у Фарадея, и ответ на поставленный вопрос был дан им в 1831 г.

Действительно, оказалось, что в замкнутом проводнике возникает электрический ток всякий раз, как проводник перемещается надлежащим образом в магнитном поле.

Эти токи, возбуждённые в замкнутом проводнике при движении его в магнитном поле, называются индукционными.

Возбуждение в проводнике ЭДС индукции называется электромагнитной индукцией. Рассмотрим, от каких условий зависит возникновение индукции и величина ЭДС индукции.

В качестве источника магнитного поля возьмём сильный подковообразный магнит (рис. 136). В качестве прибора для обнаружения тока возьмём чувствительный гальванометр. Предварительно путём опыта с известным источником тока надо выяснить, какому направлению тока в цепи соответствует отклонение показателя гальванометра в одну сторону и какому — в другую сторону.

1-й опыт. Поставим магнит так, чтобы его силовые линии шли слева направо. Выделив прямолинейный участок цепи и поместив его перпендикулярно к силовым линиям магнита, опустим его между полюсами магнита, пересекая силовые линии под прямым углом.

Гальванометр даёт кратковременное отклонение, длящееся только во время перемещения проводника. Это отклонение определяет силу индукционного тока, и по нему можно судить о величине ЭДС индукции.

По направлению отклонения можно определить направление индукционного тока.

Оставляем проводник без движения между полюсами магнита; гальванометр не даёт никакого отклонения.

Вывод: ЭДС индукции возникает в проводнике при перемещении его в магнитном поле; пока относительно положение проводника и магнитного поля не меняется, индукции нет.

2-й опыт. Выдвинем теперь проводник из пространства между полюсами магнита. Прибор покажет индукционный ток, длящийся только во время движения проводника и имеющий направление, противоположное направлению тока в предыдущем опыте.

3-й опыт. Перевернём магнит так, чтобы силовые линии шли справа налево. Повторив опускание провода, получаем индукционный ток такого же направления, как во 2-м опыте при выдвигании проводника.

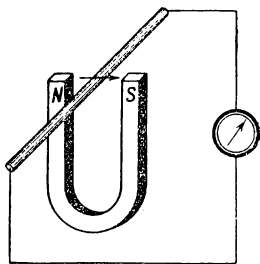


Рис. 136. Схема установки опыта по обнаружению электромагнитной индукции.

4-й опыт. Выдвигая теперь провод, получаем в проводнике ток такого же направления, как в первом опыте.

Вывод из этих опытов: при пересечении проводником силовых линий магнитного поля в проводнике индуцируется ЭДС индукции, направление которой зависит от направления магнитных силовых линий и от направления движения проводника.

5-й опыт. Зависит ли величина ЭДС индукции от угла, под которым направление движения проводника пересекает силовые линии? Взяв установку первого опыта, произведём последовательно перемещение с одной и той же скоростью поперёк силовых линий (от  $AB$  к  $A_1B_1$ ), наклонно к ним (от  $AB$  к  $A_3B_3$ ), вдоль них (от  $AB$  к  $A_2B_2$ ) (рис. 137). В первом случае получается наибольшая величина ЭДС индукции, в последнем случае индукции не наблюдается.

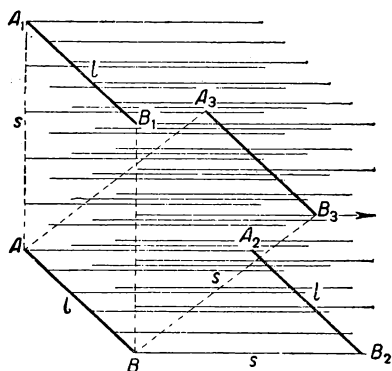


Рис. 137.

Теория и опыт показывают, что ЭДС индукции прямо пропорциональна синусу угла, образованного направлением перемещения проводника с направлением магнитных силовых линий (в первом случае угол равен  $90^\circ$ ,  $\sin 90^\circ = 1$ , в последнем — угол  $0^\circ$  и

$\sin 0^\circ = 0$ ; в промежуточных случаях:  $0 < \sin \alpha < 1$ ).

6-й опыт. Зависит ли величина ЭДС индукции от скорости перемещения проводника?

Взяв установку первого опыта, опускают или поднимают один и тот же проводник с разными скоростями. Опыт показывает, что большим скоростям соответствует большее отклонение показателя прибора, следовательно, большая ЭДС индукции.

Теория и опыт дают, что ЭДС индукции прямо пропорциональна относительной скорости перемещения проводника по отношению к силовым линиям.

7-й опыт. Зависит ли ЭДС индукции от напряжённости магнитного поля? Берём два подковообразных магнита различной силы. Их различие можно обнаружить по различному отклонению каждым из них магнитной стрелки на одном и том же расстоянии или по различию их подъёмной силы. Пересекая одним и тем же проводником с одной и той же скоростью в одном и

том же направлении силовые линии каждого магнита, можно обнаружить, что ЭДС индукции больше в том случае, когда поле сильнее.

Теория и опыт устанавливают, что ЭДС индукции прямо пропорциональна напряжённости магнитного поля  $H$ .

8-й опыт. Зависит ли ЭДС индукции от длины той части проводника, которая пересекает магнитные силовые линии?

Изгибаем подвижной проводник один раз так, чтобы его прямолинейный участок, пересекающий магнитные линии, равнялся всей ширине подковообразного магнита, во второй раз — половине этой ширины. Производя в обоих случаях совершенно одинаковые движения, увидим, что в первом случае ЭДС индукции больше, чем во втором.

Теория и опыт дают, что ЭДС индукции прямо пропорциональна длине  $l$  передвигаемого в магнитном поле стрелка проводника.

9-й опыт. Наконец, если мы будем сгибать проволоки в виде спиралей прямоугольного сечения, содержащих различное число витков, и будем производить с ними одинаковые каждый раз перемещения, то заметим, что ЭДС растёт с увеличением числа витков.

Это происходит потому, что ЭДС индукции, возбуждаемые при движении в каждом витке, складываются последовательно.

Соединяя все частные выводы вместе, получим общий вывод:

**ЭДС индукции, возбуждаемая при движении отрезка проводника в магнитном поле, прямо пропорциональна напряжённости магнитного поля, длине этого отрезка, скорости его перемещения и синусу угла между направлением перемещения и направлением магнитных силовых линий.**

Приведённое правило может быть заменено другими, выражающими зависимость величины ЭДС индукции от числа пересекаемых в единицу времени силовых линий магнитного поля.

В самом деле, представим себе цепь, один участок которой будет подвижен в однородном магнитном поле (рис. 137а). Мы уже знаем, что при движении этого участка цепи из положения  $BC$  в положение  $B_1C_1$  в нём возникает ЭДС индукции, величина которой определяется выше приведённым правилом. В то же время из чертежа видно, что при своём движении проводник пересекает силовые линии магнитного поля. Число пересечённых линий за определённый промежуток времени, как легко сообразить, зависит

от скорости движения проводника, напряжённости поля (различная степень густоты силовых линий), длины отрезка проводника и от направления, по которому происходит перемещение.

Наибольшее число силовых линий проводник будет пересекать, если он будет двигаться в направлении, перпендикулярном к направлению магнитного поля; если же проводник будет двигаться в данном поле с той же скоростью, но в ином направлении, то за то же самое время он пересечёт меньшее количество силовых линий. Если проводник будет двигаться вдоль по силовым линиям, то пересекать их он, очевидно, не будет. В последнем случае никакой ЭДС индукции в проводнике не возникнет. Мы можем

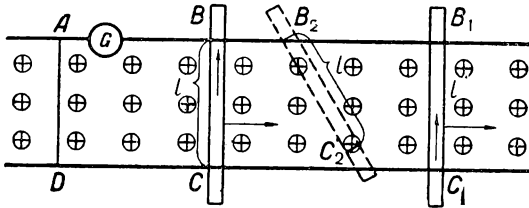


Рис. 137а.

теперь высказать новое правило: *ЭДС индукции прямо пропорциональна числу магнитных силовых линий, пересекаемых проводником в 1 секунду.*

Наконец, из того же чертежа видно, что при перемещении проводника изменяется число силовых линий (силовой поток), проходящих через площадь, ограниченную контуром проводника.

Когда подвижная часть проводника находилась в положении  $BC$ , через площадь, ограниченную контуром  $ABCD$ , проходило число  $\Phi_1$  магнитных силовых линий, через площадь же, ограниченную контуром  $AB_1C_1D$ , проходит другое число  $\Phi_2$  силовых линий.

Следовательно, за единицу времени произошло изменение на  $\frac{\Phi_2 - \Phi_1}{t} = \frac{\Phi}{t}$  силовых линий. Из чертежа видно, что это число будет тем больше, чем больше длина проводника, напряжённость поля, скорость перемещения.

Поэтому возможно дать ещё следующую формулировку для закона электромагнитной индукции:

**ЭДС индукции прямо пропорциональна скорости изменения числа силовых линий, проходящих через площадь, ограниченную проводником.**



Эта формулировка для закона электромагнитной индукции является наиболее общей. Дело в том, что, как показывают опыты, в проводнике появляется ЭДС индукции всякий раз, когда изменяется число силовых линий, проходящих через площадь, ограниченную проводником, какова бы ни была причина, вызывающая это изменение.

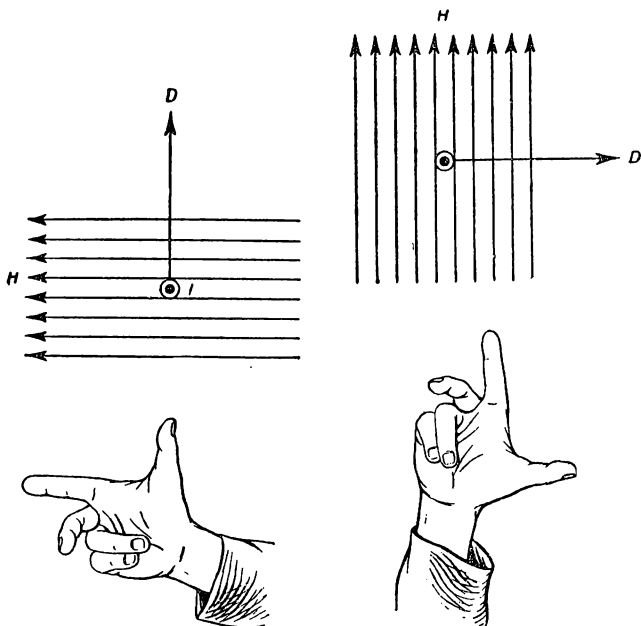


Рис. 138. Правило правой руки Флемминга.

Если, например, создать внутри катушки поле с 100 000 силовых линий, то во всё время возникновения этого поля в катушке будет действовать ЭДС индукции и эта ЭДС индукции будет различна в зависимости от того, будет ли это поле создано в 1 секунду или в  $\frac{1}{2}$  секунды, или в 0,1 секунды.

**109а. Индукция тока током.** Вместо магнита можно было бы приближать к замкнутой катушке другую цепь, обтекаемую током. В этом случае также будет происходить явление электромагнитной индукции, так как ток всегда образует вокруг себя магнитное поле. Индуцирующий проводник с током можно рассматривать как электромагнит.

Правило для определения направления индуктированного тока остаётся таким же, как и при индукции магнитом, как можно заключить из разбора рисунка 139а.

Другой способ индукции тока током состоит в индуктировании тока в неподвижном проводнике при изменении силы тока в другом, тоже неподвижном проводнике, находящемся близ первого. Изменение силы тока в индуктирующем проводнике изменяет вокруг него и, следовательно, вокруг соседних проводников магнитное поле. Всякое же изменение числа магнитных силовых линий, пересекающих площадь, ограниченную замкнутым проводником, вызывает ЭДС индукции. В этом способе индукции происходит перенос электрической энергии из одной цепи в другую посредством магнитного поля.

**110. Правило Флемминга для направления индукционного тока.** Рисунок 138 показывает взаимное расположение трёх направлений: направления силовых линий  $H$  магнитного поля, направления  $D$  движения проводника в магнитном поле и направления ЭДС индукции  $I$ , возникающей при движении проводника в магнитном поле.

Показанные на рисунке направления во всех случаях установлены на основании опытов, описанных в § 109.

Для определения направления ЭДС индукции и, следовательно, направления индукционного тока в проводнике по заданным двум другим направлениям Флемминг дал практическое правило — так называемое правило правой руки.

Правило Флемминга состоит в следующем: *надо раздвинуть под прямым углом указательный и большой пальцы правой руки и средний палец поставить перпендикулярно к двум первым, затем направить указательный палец по направлению силовых линий, большой — по направлению движения проводника; тогда средний палец покажет направление ЭДС индукции.*

**111. Лабораторная работа № 4. Вывед законов индукции токов.**

Приборы: 1) сильный магнит (подковообразный или прямой); 2) гальванометр; 3) катушка без сердечника; 4) намотанная на стержень из мягкого железа катушка, наружный диаметр которой меньше диаметра отверстия первой катушки; 5) 1—2 аккумулятора; 6) ключ (рубильник); 7) провода; 8) реостат.

*Задание 1.* Наблюдать индукцию тока магнитом.

Ход работы. 1. Составьте цепь из большой катушки, проводов и гальванометра.

2. Опустайте магнит  $N$ -полюсом внутрь катушки и наблюдайте показания гальванометра.

3. Вынимайте магнит из катушки и наблюдайте показания гальванометра.

4. Переверните магнит S-полюсом вниз и повторите опыты 2—3.

5. Сделайте схематические чертежи предыдущих установок, отметив на них полюсы магнита, направление движения магнита и направление индукционного тока. Сравните направление индукционного тока и направление амперового тока (§ 84) на наводящем конце магнита (при вычерчивании оборотов катушки передние части витков вычерчивать толстыми линиями, задние — тонкими).

6. Индуцируется ли ток при неподвижном магните, хотя бы магнит и находился внутри катушки?

7. Индуцируется ли ток, если перемещать катушку с магнитом внутри неё, не изменяя их относительного положения?

8. Индуцируется ли ток, если магнит держать неподвижно, а катушку надевать на тот или другой полюс или снимать с него? Сравните направление индукционного тока в этом случае с направлением в опытах 2—4.

9. Каково направление индукционного тока при опускании N-полюса магнита? Какой полюс получается на том конце катушки, через который вводится магнит? Каково взаимодействие между опускаемым полюсом магнита и возникающим полюсом соленоида?

10. То же при вынимании N-полюса?

11. То же при опускании S-полюса?

12. То же при вынимании S-полюса?

13. Каков общий вывод относительно взаимодействия между перемещающимися полюсами магнита и индукционным током в катушке?

14. Какие движения магнита и проводника вызывают индукционный ток?

15. Повторите один из опытов 2, 3, 4, вдвигая и выдвигая магнит несколько раз с различными скоростями.

Как влияет скорость перемещения магнита на величину ЭДС индукции? Как влияет скорость перемещения магнита на изменение числа силовых линий, пересекаемых контуром катушки? Какая связь между ЭДС и изменением числа силовых линий, пересекаемых контуром?

*Задание 2. Наблюдать индукцию тока током.*

Ход работы. 1. Составьте одну цепь: аккумуляторы, рубильник, катушка с железным стержнем; другую цепь: гальванометр и большая катушка.

2. Замкните ток в первой катушке, вставляйте её во вторую, наблюдайте в этот момент показания гальванометра и заметьте направление индукционного тока.

3. Вынимайте катушку, наблюдайте показания гальванометра и заметьте направление индукционного тока.

4. Перемените направление тока в первой катушке на противоположное и повторите наблюдения 2, 3.

5. Сделайте схематические чертежи четырёх предыдущих установок и нанесите на них направления индуктирующего тока в первой катушке и индукционного — во второй.

Как направлен индукционный ток сравнительно с индуктирующим при сближении катушек? как направлен — при удалении их? Какие получаются полюсы на ближайших концах обеих катушек при сближении их? какие — при удалении? Каково взаимодействие индукти-

рующего и индукционного токов при сближении катушек? каково — при удалении?

6. Замкните ток во внутренней катушке и вставьте её во внешнюю. Будет ли индуцироваться ток, в то время как одна катушка будет находиться в покое внутри другой? Перемещайте обе катушки, не изменяя их относительного положения. Индуцируется ли ток?

7. Замкните ток во внутренней катушке, вставляйте её во внешнюю и вынимайте её с различными скоростями. Влияет ли скорость относительного перемещения катушек на величину ЭДС индукции? Каково это влияние?

8. Не замыкая тока в первой катушке, вставьте внутреннюю во внешнюю.

9. Замкните ток в первой катушке в том же направлении, как и в опыте 2. Каково показание гальванометра?

10. Разомкните ток в первой катушке. Каково показание гальванометра?

11. Не вынимая катушки, переключите ток в первой катушке, как в опыте 4, и замкните ток. Каково показание гальванометра?

12. Разомкните ток. Каково показание гальванометра?

13. Каково направление индукционного тока сравнительно с индуцирующим при замыкании индуцирующего (опыты 9,11)? каково — при размыкании (опыты 10, 12)? Каким предыдущим опытам соответствует направление тока в опытах 9, 11? каким — в опытах 10, 12?

14. Включите в цепь меньшей катушки реостат, вставьте её внутрь другой; замкните ток в первой катушке такого же направления, как в опыте 2, и быстрым движением подвижного контакта выключите часть сопротивления, увеличив таким образом силу индуцирующего тока. Каково показание гальванометра?

15. Таким же быстрым движением подвижного контакта увеличьте сопротивление и, следовательно, уменьшите силу индуцирующего тока. Каково показание гальванометра?

16. Каково направление индукционного тока сравнительно с индуцирующим при усилении последнего? каково — при ослаблении? В каком из предыдущих опытов направление индукционного тока было такое же, какое имеет индукционный ток при усилении индуцирующего? в каком — при ослаблении?

17. Перечислите случаи, когда индукционный ток имеет направление, одинаковое с индуцирующим, и случаи, когда их направления противоположны.

18. Какое изменение числа силовых линий внутри индуцируемого проводника происходит в тех случаях, когда индуцируется ток направления, противоположного индуцирующему? одинакового с индуцирующим? Какую связь можно установить между направлением индукционного тока и изменением числа силовых линий внутри контура проводника?

19. Каково взаимодействие между индукционным и индуцирующим токами в случаях замыкания и усиления, размыкания и ослабления?

20. За счёт какой энергии возникает индукционный ток?

## 112. Правило Ленца для электромагнитной индукции.

Когда замкнутый проводник движется в магнитном поле так, что изменяется число силовых линий, охваченных проводником,

в нём возникает индукционный ток. На этот ток так же, как и на всякий другой, должно действовать магнитное поле (см. § 82).

Как же зависит это действие магнитного поля от направления движения проводника, вызывающего индукционный ток? Рассмотрим сперва этот вопрос на частных примерах. Рисунок 139а показывает направление индукционного тока в катушке при вдвигании или выдвигании из неё магнита.

По направлению индукционных токов можно сообразить, какому полюсу соответствует каждый конец катушки, обтекаемой индукционным током.

В первом и третьем случаях мы видим, что при приближении магнита к катушке на ближайшем конце её возникает полюс одноимённый с приближаемым полюсом магнита. Такие полюсы, как известно, отталкиваются.

Во втором и четвёртом случаях — при удалении магнита на ближайшем к магниту конце катушки индукционный ток образует полюс разноимённый с ближайшим полюсом магнита, образующего магнитное поле. Разноимённые полюсы притягиваются.

Следовательно, во всех случаях магнитное поле индуктирующее и магнитное поле индукционного тока взаимодействуют так, что их взаимодействие препятствует тому движению, которым индуктируется ток.

Если вспомнить взаимодействия токов одинакового и противоположного направлений (§ 83), то легко прийти к заключению, что при сближении катушек (случаи 1 и 3) между индуктирующим и индукционным токами возникает отталкивание; при удалении катушек — притяжение. Следовательно, и в этом случае индукции между магнитными полями обоих токов возникает взаимодействие, препятствующее тому движению, которое вызывает индукцию.

От этих частных случаев перейдём к общему.

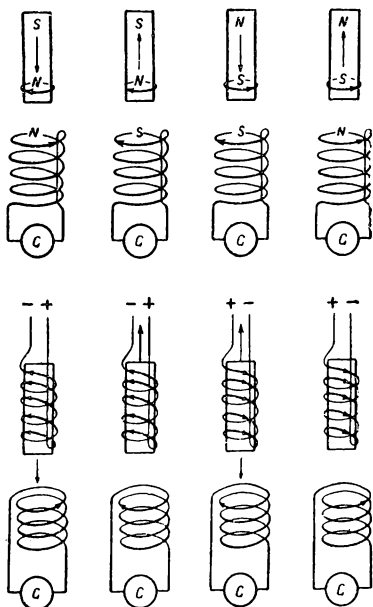


Рис. 139а.

На рисунке 1396 сплошными линиями изображены направление  $H$  силовых линий индуктирующего магнитного поля, направление  $F$  того движения проводника, вследствие которого возникает индукция, и направление  $E$  ЭДС индукции в проводнике.

Если проводник замкнут, то по нему пройдёт индукционный ток по направлению  $E$ .

Магнитное поле действует на этот индукционный ток с силой, направление которой можно найти по правилу Флемминга (§ 82). Направление этой силы изображено на рисунке пунктиром  $F_1$ . Сравнивая направление  $F$  движения, вызывающего индукцию, и направление  $F_1$  действия того же поля на индукционный ток,

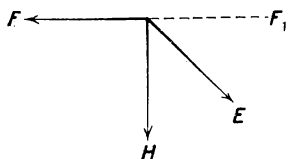


Рис. 1396. Связь правил Ленца и Флемминга.

мы видим, что это действие препятствует тому движению, которым ток индуктируется.

Таким образом, магнитное поле индукционного тока оказывает тормозящее влияние на движение, вызывающее индукцию. Чтобы поддерживать движение, вызывающее индукцию, надо затрачивать работу на преодоление того задерживающего действия, которое оказывает магнитное поле на проводник с индукционным током. Эта работа больше той, которую нужно было бы затратить на перемещение того же проводника на то же расстояние в отсутствии магнитного поля. Избыток работы, затрачиваемой при перемещении проводника в магнитном поле сравнительно с работой в отсутствии поля, и является источником той энергии, которая расходуется в индукционном токе.

Эта зависимость является одним из частных проявлений закона превращения и сохранения энергии. Правило, при помощи которого можно определить направление индукционного тока, дал ещё в 1834 г. русский учёный академик Ленц. Это правило, названное правилом Ленца, может быть выражено следующим образом:

**При перемещении магнита или проводника с током относительно другого замкнутого проводника в последнем индуктируется ток такого направления, что этот ток своим магнитным действием препятствует тому движению, которым он наводится.**

Можно индуктировать ток и при относительно покое магнитов и проводников. При неподвижном положении обеих катушек можно индуктировать ток в одной замкнутой катушке, если замыкать или усиливать ток, размыкать или ослаблять ток в другой, соседней катушке.

Опыты показывают, что при замыкании и усилении тока в одной катушке, в другой — наводится ток противоположного направления; при размыкании или ослаблении — наводится ток одинакового направления с наводящим током.

Как же должно быть изменено правило Ленца для того случая, когда индукция возникает без перемещения проводников?

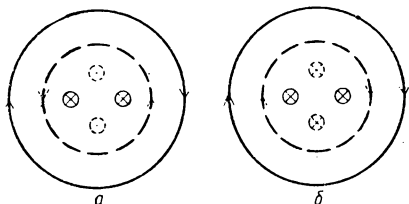


Рис. 139в.

Начертим направление силовых линий наводящего и наведённого токов для двух катушек, из которых внешняя будет наводящей (рис. 139в).

Наводящий ток обозначен на рисунке сплошной окружностью, наведённый — штриховой. Силовые линии наводящего тока направлены от читателя. Ток, наведённый при замыкании или усилении наводящего тока, образует поле, силовые линии которого направлены к читателю, т. е. ослабляют наводящее поле. Ток, наведённый при размыкании или ослаблении наводящего тока, образует поле, силовые линии которого направлены от читателя, т. е. поддерживают наводящее поле.

Поэтому можно дать следующую общую формулировку правила Ленца: *в явлении индукции токов поле индуктируемого тока всегда направлено так, чтобы уменьшить изменения, происходящие с полем индуктирующего тска.*

**113. Индукция в сплошных телах.** Индукционные токи возбуждаются не только в изолированном линейном проводнике, но и во всяком массивном проводнике. Для этого нужно только, чтобы массивный проводник перемещался в магнитном поле. Токи в сплошных проводниках называются *токами Фуко* — по имени открывшего их французского физика. Если вставить внутрь катушки металлический стержень и пропустить через катушку ток от осветительной сети, всё время изменяющийся и по величине и по направлению, то стержень быстро нагревается. Его нагревание объясняется тепловым действием проходящих по нему индукционных токов Фуко, наведённых в нём переменным магнитным полем тока осветительной сети.

Если между очень сближенными полюсами сильного электромагнита заставить качаться маятник, на конце стержня которого прикреплена медная пластинка, то маятник качается длительно, пока не замкнут ток, питающий электромагнит. При замыкании же тока в обмотке электромагнита пластинка начинает пересекать силовые линии поля; в ней индуктируется ток, который, по правилу Ленца, препятствует вызывающему его движению, и маятник останавливается (рис. 140).

Токи Фуко берут на себя часть той механической энергии, которая тратится на возбуждение индукционных токов в машинах, и

бесполезно растрчивают эту энергию на теплоту; поэтому для устранения их в машинах и других приборах принимаются особые меры.

Если в маятнике (рис. 140) сделать продольные разрезы, то токи в таком куске возбуждаются гораздо слабее, так как воздушные промежутки нарушают цельность металлического куска и, следовательно, уменьшают его проводимость. На этом и основана борьба с токами Фуко. Но токи Фуко могут быть и использованы. Значительным выделением джоулева тепла при большой силе токов Фуко пользуются

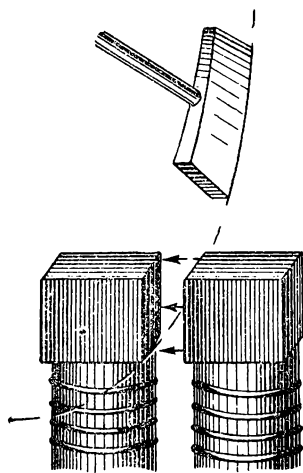


Рис. 140. Маятник для демонстрации токов Фуко.

в металлургии для плавки металла, помещаемого в переменное магнитное поле. Подлежащий плавке металл загружают в полость печи, по обмотке которой пускают мощный переменный ток. В электроизмерительных приборах токи Фуко используются для демпфирования колебаний стрелки. Демпфирование, иначе успокоение, достигается тем, чем колеблющаяся система прибора связывается с металлической массой, расположенной между полюсами магнита. При качании этой массы в магнитном поле в ней возникают токи Фуко, которые и тормозят систему.

**114. Самоиндукция.** При всяком изменении магнитного поля в пространстве, охватываемом проводником, в проводнике возникает индукционный ток. При замыкании тока в любом проводнике вокруг него возникает магнитное поле, при размы-

кании оно исчезает. Следовательно, можно ожидать возникновения ЭДС индукции в самом проводнике при замыкании и размыкании в нём тока.

Возбуждение ЭДС индукции в проводнике при изменении в нём силы тока было открыто Фарадеем в 1834 г. и названо самоиндукцией.

Самоиндукция состоит в том, что:

*при замыкании или усилении тока в проводнике в нём наводится ЭДС самоиндукции, которая по правилу Ленца противодействует вызывающему её изменению, т. е. направлена противоположно замыкаемому току; при размыкании или ослаблении тока в проводнике наводится ЭДС самоиндукции, которая направлена одинаково с размыкаемым током.*

Самоиндукция при замыкании обнаруживается в том, что сила тока не сразу достигает той величины, которая должна быть в цепи по закону Ома при данных напряжении и сопротивлении проводников, и потому проходит больший или меньший



промежуток времени (обыкновенно доли секунды), пока сила тока не достигнет своей полной величины. Постепенное нарастание силы тока объясняется возникновением во время замыкания тока противоположно направленной ЭДС самоиндукции (рис. 141).

Чтобы обнаружить самоиндукцию при замыкании цепи, надо постоянный ток пустить по двум параллельным ветвям; в одну

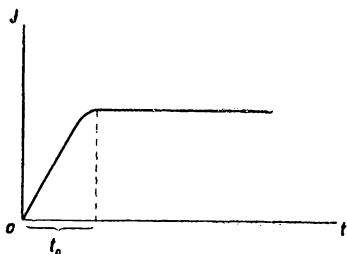


Рис. 141. График изменения силы тока со временем при самоиндукции.

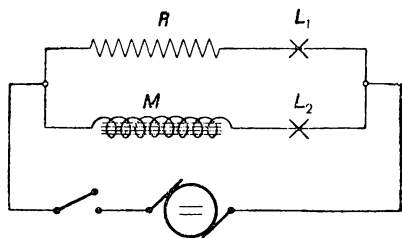


Рис. 142. Схема установки для демонстрации самоиндукции при замыкании.

ветвь включить большой электромагнит  $M$  и последовательно с ним лампочку накаливания  $L_2$ ; другую ветвь составить из линейного провода с таким же сопротивлением  $R$ , как и у электромагнита, и с такой же лампочкой  $L_1$ , как и в первой ветви (рис. 142).

При замыкании постоянного тока лампочка в ветви с электромагнитом накаливается медленнее, чем лампочка в цепи линейного провода. Следовательно, в ветви с катушкой самоиндукции сила тока не сразу достигает своей полной величины.

Чтобы обнаружить самоиндукцию при размыкании, можно упростить предыдущую установку: составить цепь из источника постоянного тока, обмотки большого электромагнита и параллельно электромагниту включить лампочку накаливания (рис. 143). При выключении источника тока лампочка на мгновение вспыхивает; это показывает, что через неё проходит ток самоиндукции, возникший в обмотке электромагнита при размыкании и находящий для себя в одной ветви разветвления замкнутый путь.

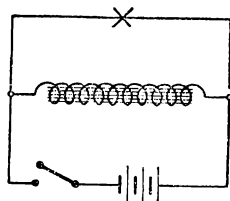


Рис. 143. Схема установки для демонстрации самоиндукции при размыкании.

Самоиндукция при размыкании обнаруживается искрой в месте размыкания. При размыкании может возникнуть такая большая ЭДС индукции, т. е. такое напряжение в месте разрыва, что

воздух становится проводником и через него проходит искровой разряд (§ 103).

Возникшая искра сильно портит приборы, поэтому при размыкании сильных токов в приборах, где явление самоиндукции обнаруживается очень сильно, перед размыканием производится постепенное ослабление тока; сами же выключатели обычно погружены в хорошие изоляторы, например в масло.

Явление самоиндукции напоминает явление инерции.

Известно, что паровоз, когда на поршень в цилиндре начинает действовать сила давления пара, не сразу приобретает ту скорость, с которой он в дальнейшем движется равномерно. Наоборот, по прекращении действия движущей силы пара паровоз не останавливается сразу, а продолжает сохранять скорость.



Рис. 144. Бифилярная обмотка.

Сердечник из мягкого железа в электромагните соответствует маховому колесу теплового двигателя. При замы-

кании тока часть энергии, отдаваемой источником тока, идёт на создание магнитного поля, которое благодаря наличию железного сердечника является большим. Только остальная часть энергии идёт на преодоление сопротивления и джоулево тепло. При размыкании же цепи ток поддерживается за счёт энергии, запасённой в магнитном поле.

Таким образом, *самоиндукция и инерция тока и его магнитного поля* — только два разных выражения для одного и того же свойства.

При одной и той же силе замыкаемого и размыкаемого тока и при одной и той же скорости замыкания и размыкания тока ЭДС самоиндукции различна в разных проводниках; она ничтожно мала в прямолинейных проводниках и катушках, обмотанных бифилярной (двойной) обмоткой (рис. 144); в катушках же с обыкновенной обмоткой она может быть значительной, возрастая пропорционально квадрату числа оборотов и площади сечения катушки. Наличие в катушке железного сердечника значительно увеличивает ЭДС самоиндукции.

### Упражнение 15.

1. Северный конец магнита опускается в отверстие замкнутой катушки. Каково направление индукционного тока? Определить его по правилу Флемминга и проверить по правилу Ленца или наоборот.
2. Тот же вопрос, если северный полюс вынимается из катушки.
3. Тот же вопрос, если опускается в катушку южный полюс.
4. Тот же вопрос, если вынимается из катушки южный полюс.

5. Катушка, замкнутая через гальванометр, приближается или удаляется от другой катушки, по которой течёт ток (рис. 145). Определить направление индукционного тока при сближении и удалении катушек для двух противоположных направлений индуктирующего тока.

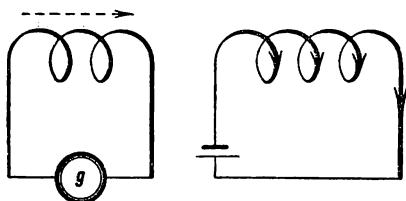


Рис. 145.

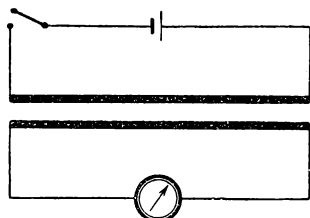


Рис. 145а.

6. Будет ли наводиться ток в катушке, замкнутой через гальванометр, если при неподвижном положении обеих катушек в наводящей катушке замыкать, усиливать, размыкать, уменьшать ток? Если ток будет индуктироваться, то определить его направление для каждого случая при двух возможных направлениях тока в индуктирующей катушке.

7. Изменится ли явление индукции и если изменится, то как и почему, если в индуктирующую катушку вставить железный сердечник?

8. Начертить направления индукционных токов при сближении и удалении цепей, изображённых на рисунке 145а, после замыкания верхней цепи.

9. Какого направления ток наведётся в замкнутой спирали рисунка 106, если вдвигать и выдвигать изображённый на рисунке магнит?

10. Какого направления ток наведётся в катушке рисунка 107, если она будет замкнута и если вдвигать и выдвигать изображённый на рисунке электромагнит?

11. Какого направления индуктируется ток в подвижном участке цепи, если проводник расположен по направлению  $2-2'$ , магнитная силовая линия имеет направления  $0-3$ , а движение проводника —  $0-1$  (рис. 146).

Тот же вопрос для случаев:

Расположение проводника	Направление магнитного поля	Направление движения проводника
$1-1'$	$0-2'$	$0-3'$
$3-3'$	$0-1'$	$0-2'$
$3-3'$	$0-2$	$0-1$
$2-2'$	$0-1'$	$0-3'$

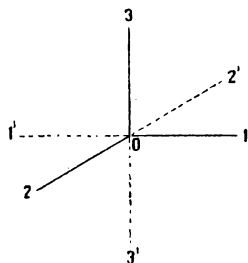


Рис. 146. К задаче 11 упражнения 15.

12. В каком направлении надо двигнуть проводник  $1-1'$ , чтобы получить в нём индукционный ток в направлении  $0-2$ , если магнитная силовая линия направлена по линии  $0-3'$ ?

13. Каково должно быть направление магнитных силовых линий, чтобы при движении по направлению  $\theta - l'$  получить индукционный ток в направлении  $\theta - 2$ ?

14. Почему эталоны сопротивления изготавливаются способом бифилярной намотки?

15. Проследить, как будет меняться направление индукционного тока, если опускать северный (или южный) полюс магнита внутрь катушки с одной стороны и вынимать магнит — с другой северным (или южным) полюсом.

16. С одинаковым ли ускорением будет падать магнит через вертикальное отверстие катушки, обмотанной проводником, в том случае, когда проводник не замкнут и когда замкнут?

17. Между полюсами подковообразного магнита помещён проволочный проводник в форме прямоугольника так, что площадь его перпендикулярна к силовым линиям. Будет ли наводиться ток, если этот проводник сделает полный оборот вокруг оси, совпадающей со средней линией прямоугольника? Какого направления?

18. Один раз внутри площади, охватываемой проводником, создалось 1 000 000 силовых линий в 5 секунд, другой раз в той же площади исчезло 600 000 силовых линий за 4 секунды. В каком случае ЭДС индукции больше?

19. Проволочная рама в форме прямоугольника одной своей стороной совмещается с прямолинейным участком цепи тока и делает вокруг этой стороны полный оборот. Будет ли при этом движении индуцироваться ток?

20. Если поместить проволочный прямоугольник в плоскости магнитного меридиана и двигать его в этой плоскости, будет ли в нём наводиться ток?

21. Если поставить проволочный прямоугольник перпендикулярно к плоскости магнитного меридиана и двигать его вдоль меридиана, будет ли наводиться ток? Если двигать перпендикулярно меридиану, будет ли наводиться ток?

22. Как надо двигать в поле земного магнетизма проволочный прямоугольник, чтобы в нём наводился ток?

23. Проволочный прямоугольник ставится перпендикулярно к силовым линиям однородного поля. В каком случае получится наибольшая ЭДС индукции: когда прямоугольник движется вдоль силовых линий, перпендикулярно или наклонно к ним?

Обратите внимание на то, меняется ли при любом заданном движении число силовых линий, проходящих через площадь, ограниченную замкнутым проводником.

24. Почему провода телефона не следует подвешивать на одних и тех же столбах с проводами переменного тока для освещения?

### **ВОПРОСЫ ДЛЯ ПРОВЕРКИ УСВОЕНИЯ**

1. Какое основное условие возникновения индукции во всех случаях?
2. Возникает ли ЭДС индукции, когда проводник скользит вдоль силовых линий?
3. От чего зависит величина ЭДС индукции?
4. В чём состоит правило Флемминга для направления индукционного тока?
5. В чём состоит правило Ленца для индукции токов?

6. Каковы направления индукционных токов при индукции магнитом?
7. Каковы направления индукционных токов при индукции токами?
8. Что такое ток Фуко и каково их вредное влияние?
9. В чём состоит явление самоиндукции?
10. От чего зависит величина ЭДС самоиндукции?

**115. Индукционный генератор.** На явлении индукции токов основано устройство особого вида источников тока.

Машину, преобразующую при помощи индукции механическую энергию в электрическую, можно назвать индукционным генератором электрического тока (рис. 147).

В индукционном генераторе — две главные части: 1) электромагнит (или магнит), образующий магнитное поле, которое индуцирует токи; эта часть называется индуктором; 2) проводник, в котором индуцируется ток; эта часть называется якорем.

На оси якоря помещаются или контактные кольца, или пластинчатый коллектор (рис. 156, § 120), к которым прижимаются щётки, соединённые с концами рабочей цепи.

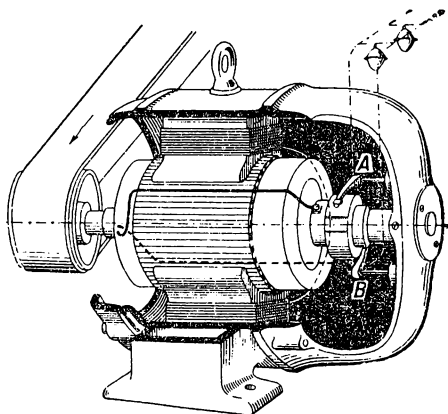


Рис. 147. Генератор.

**116. Лабораторная работа № 5.** Наблюдение индукционных токов в витках проволоки, вращающейся в однородном магнитном поле.

Приборы: 1) сильный подковообразный магнит; 2) гальванометр; 3) маленькая катушка в форме прямоугольника в несколько сот оборотов тонкой проволоки, помещающаяся между полюсами магнита.

Ход работы. 1. Соединить концы витков проволоки с гальванометром и поместить витки между полюсами магнита так, чтобы плоскость их была перпендикулярна к силовым линиям.

2. Повёртывая витки вокруг оси, проходящей через середину прямоугольника параллельно большей стороне его, на первую четверть оборота, наблюдать за гальванометром. В каком направлении возникает ток? Сверить отмеченное по гальванометру направление индукционного тока с направлением его по правилу правой руки.

3. Произвести такие же наблюдения, продолжая вращать на вторую, третью, четвёртую четверти оборота.

4. Какой вывод из опыта сделать о направлении индуктированных токов при одном полном обороте витка? Одного ли направ-

вления индуцируется ток во время оборота? Сколько перемен направления тока происходит за время одного оборота? В каких положениях витка относительно силовых линий происходит перемена направления?

5. Проверить предыдущие выводы, начиная вращение от других положений.

6. Как влияет на явление скорость вращения?

**117. Индукция тока в якоре.** Чтобы понять индукцию тока в обмотке якоря при вращении его в поле индуктора, достаточно выбрать из всей обмотки якоря один виток и разобрать явление,

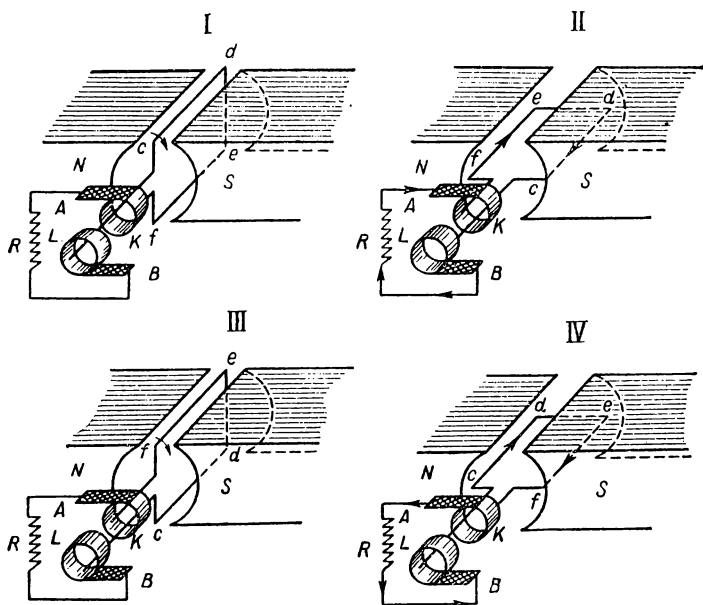


Рис. 148.

происходящее при одном обороте. Пусть на рисунке 148  $N$  и  $S$  изображают полюсы индуктора. Поместим один прямоугольный виток обмотки якоря перпендикулярно к силовым линиям поля, обозначив это положение знаком  $I$ .

При поворачивании прямоугольника около оси на четверть оборота из положения  $I$  в положение  $II$  стороны  $cd$  и  $ef$  пересекают силовые линии, отчего в них индуцируется ЭДС. Сторона  $cd$  при этом вращении перемещается вниз, сторона  $ef$  поднимается вверх. Применяя правило правой руки, можно сообразить, что в стороне  $cd$  ЭДС будет направлена от  $d$  к  $c$ , в стороне

*ef* — от *f* к *e*. На второй четверти оборота от положения *II* к положению *III* движение сторон продолжается в том же направлении, поэтому ЭДС индукции сохраняет в прямоугольнике то же направление *dcfe*. При переходе прямоугольника из положения *III* в положение *IV* и дальше в *I* изменяется направление движения сторон (*cd* поднимается, *ef* опускается), поэтому и ЭДС индукции изменяет своё направление на противоположное — от *c* к *d* и от *e* к *f*. Перемена направления происходит дважды во время оборота в положениях *I* и *III*, когда плоскость витка устанавливается перпендикулярно к силовым линиям поля. В этих положениях ЭДС индукции обращается в нуль. Поэтому плоскость, перпендикулярная к силовым линиям, называется нейтральной плоскостью.

Итак, при вращении каждого витка обмотки якоря в магнитном поле в течение первой половины оборота, считая от нейтральной плоскости, индуцируется ЭДС в одном направлении, в течение второй половины — в противоположном (когда плоскость витка совпадает с нейтральной плоскостью, ЭДС обращается в нуль).

*Наибольшая скорость пересечения силовых линий* получается в положениях *II* и *IV*.

В этих положениях длинные стороны прямоугольника пересекают силовые линии по перпендикулярному к ним направлению, поэтому число пересекаемых линий в 1 секунду получается наибольшее и ЭДС индукции достигает своих наибольших значений. В положениях же *I* и *III* стороны прямоугольника скользят вдоль силовых линий, следовательно, пересечения линий проводником совсем не происходит и ЭДС индукции равна нулю.

Так как ЭДС индукции возникает в каждом витке проволоки и при последовательном соединении витков их ЭДС складываются, то в машинах для получения большей ЭДС помещается не один виток проволоки, а значительное количество их.

**118. Якорь.** В современных машинах применяется якорь в форме цилиндра, называемый барабанным якорем (рис. 149). Барабанный якорь состоит из сердечника, составленного из изолированных друг от друга листов мягкого железа. По этому барабану вдоль его образующих помещена обмотка из изолированной медной проволоки, состоящая из большого числа оборотов. Каждый оборот проволоки имеет примерно форму прямоугольника. Мягкое железо выбирается вследствие того, что оно втягивает в себя силовые линии магнитного поля индуктора, не позволяя им рассеиваться по воздуху. От этого увеличивается число силовых линий, пересекаемых обмоткой якоря, и, следовательно, растёт ЭДС индукции.

Якорь делается не из сплошного куска железа, а из изолированных листов, чтобы устранить токи Фуко вдоль образующих цилиндра.

Чтобы уменьшить воздушный промежуток между полюсами индуктора и сердечником, обмотка накладывается в особых пазах, почему листы сердечника штампуются по особым формам, один из видов которых изображён на рисунке 150.

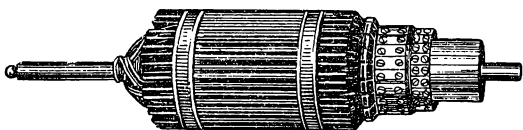


Рис. 149. Барабанный якорь.

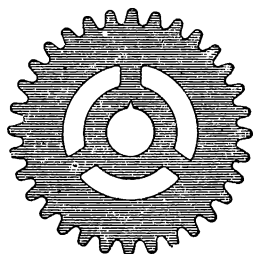


Рис. 150. Штампованный лист сердечника.

Концы обмотки присоединяются к двум так называемым контактным кольцам  $K$  и  $L$ , насаженным на ось изолированно от неё и друг от друга (рис. 148).

К кольцам при помощи пружин прижимаются щётки  $A$  и  $B$ , состоящие из угля, спрессованного с медной сеткой. К зажимам щёток присоединяется внешний участок цепи, куда включаются потребители энергии. При помощи щёток осуществляется так называемый скользящий контакт внешней (рабочей) цепи с якорем. Во внешней цепи во время каждого оборота якоря дважды меняется направление тока, как видно из рисунка 148.

Описанная машина даёт ток, величина и направление которого меняются через определённые промежутки времени и который называется переменным током.

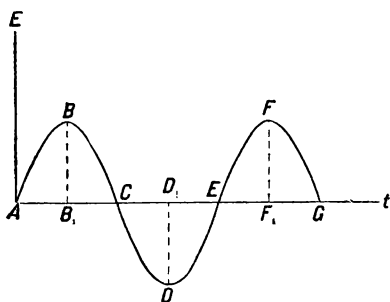


Рис. 151. Синусоида ЭДС переменного тока.

Наименьшее время, по истечении которого каждый раз начинается точное повторение процесса изменений тока по величине и направлению, называется периодом.



В машине, схема которой была рассмотрена выше, период переменного тока совпадает с временем одного оборота якоря.

Изменение ЭДС тока можно изобразить графически, если на оси абсцисс откладывать равные части периода (например, четверти или шестнадцатые доли), а на ординатах откладывать (в условном масштабе и по соответствующему направлению) отрезки, изображающие величины и направления ЭДС. В простейшем случае построенная таким образом линия имеет форму кривой, называемой *синусоидой* (рис. 151).

**119. Генераторы переменного тока.** Переменный ток, имея преимущества перед постоянным током при передаче электроэнергии на большие расстояния, в большом числе случаев (освещение, электродвигатели) может быть так же хорошо используем, как и постоянный ток.

Индуктором генератора переменного тока служит электромагнит, питаемый постоянным током от какого-либо постороннего источника, чаще всего от генератора постоянного тока (§ 120), насаженного на одну ось с якорем машины переменного тока.

Так как такие машины обыкновенно изготовляются для очень больших напряжений, то необходимо устранить контактные кольца и щётки. С этой целью делают неподвижным якорь, присоединяя к зажимам его концы рабочей цепи; индуктор же делают подвижным, тогда якорь называют *статором*<sup>1)</sup>, а индуктор — *ротором*<sup>2)</sup>.

Условное изображение машины переменного тока на схемах дано на рисунке 148.

Машина переменного тока называется *альтернатором*.

**120. Машина постоянного тока.** Для химических действий и в некоторых случаях для питания моторов (например, трамвайных) должен применяться постоянный ток. Выпрямление переменного тока производится при помощи коллектора особого устройства.

В простейшем виде такой коллектор состоит из двух половин кольца (полукольцевой коллектор), изолированных друг от друга и от оси. Один конец обмотки соединяется с одним полукольцом, другой — с другим. Щётки прижимаются к коллектору по линиям, лежащим в нейтральной плоскости. В те моменты, когда изменяется направление ЭДС в обмотке, происходит и смена полуколец, прикасающихся к той или другой щётке, и ток в рабо-

---

<sup>1)</sup> От латинского слова *stare* (старe) — *стоять*.

<sup>2)</sup> От латинского слова *rotare* (ротаре) — *вращать*.

чей цепи сохраняет своё направление, как видно из рисунка 152. Поэтому одна из щёток машины постоянного тока во всё время работы машины является положительным полюсом её, другая — отрицательным.

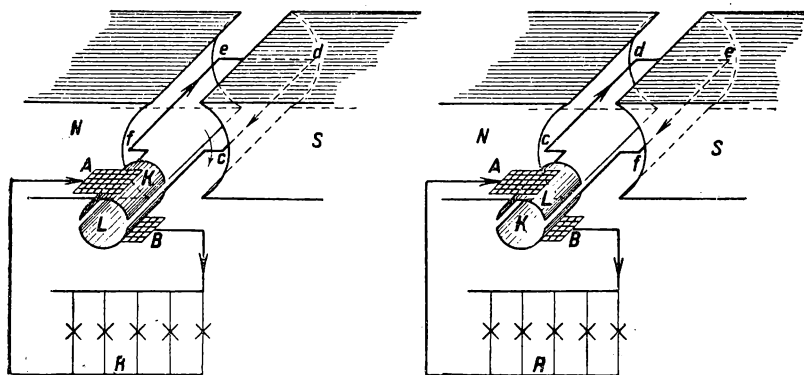


Рис. 152.

Но значение ЭДС тока при полукольцевом коллекторе дважды во время оборота обращается в нуль, достигая посередине промежутков между нулевыми значениями наибольших значений при одном и том же направлении. Ток получается пульсирующий. Его график дан на рисунке 153. Чтобы уменьшить пульсацию,

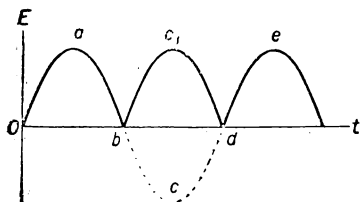


Рис. 153. График пульсирующего тока.

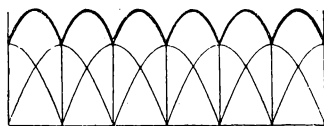


Рис. 154. График ЭДС, выпрямленной коллектором при двух витках проволоки на якоре (жирная линия).

надо увеличить число прямоугольных обмоток на барабане якоря. Тогда в каждой из них ЭДС индукционного тока обращается в нуль при прохождении через нейтральную линию. Но общая ЭДС каждой половины якоря по обе стороны от нейтральной линии уже не будет доходить до нуля. Если взять два последовательно соединённых прямоугольника, стороны которых равно-

мерно распределены по якору, то изменение силы тока в цепи будет изображаться жирной линией графика на рисунке 154.

Изменения ЭДС в каждом прямоугольнике изображаются одной и той же кривой (тонкая линия рисунка); только самые кривые смещаются на четверть периода (изменения запаздывают). Общая величина ЭДС графически в каждый момент получается через сложение ординат всех кривых.

Отдельные обмотки якоря называются с е к ц и я м и. Чем больше число секций, тем меньше изменение силы тока в цепи. Обычно делают около 100 секций, этим достигается почти полное постоянство тока. Секции изготавливаются по готовому шаблону (рис. 155) и вкладываются в пазы якоря.

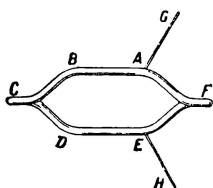


Рис. 155. Шаблон секции.

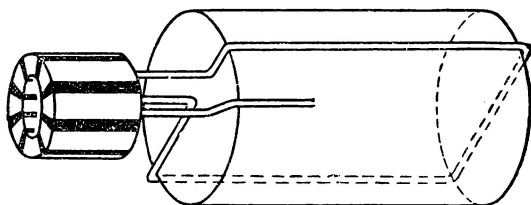


Рис. 156. Модель пластинчатого коллектора.

При секционной обмотке коллектор делается пластинчатым (рис. 149). Число пластин коллектора равно числу секций. К каждой пластинке коллектора присоединяется конец одной секции и начало следующей (рис. 156). Через пластинки секции каждой половины якоря соединены последовательно; через щётки обе половины соединены между собой параллельно.

**121. Динамомашинны.** Д и н а м о м а ш и н о й называется машина постоянного тока, индуктором которой служит электромагнит, питаемый тем же током, который вырабатывается самой машиной.

Питание электромагнита током от самой машины называется с а м о в о з б у ж д е н и е м.

Самовозбуждение состоит в следующем. Перед выпуском машины с завода через обмотки электромагнита пропускается ток. Железный сердечник электромагнита сохраняет следы остаточного магнетизма. Этих следов магнитного поля достаточно для того, чтобы при первом вращении якоря навести в обмотке его и в цепи ничтожный индукционный ток. Если пропустить этот ток также через электромагнит машины (индуктор), то он усилит магнитное

поле; усиленное же поле наведёт большую силу тока, и так будет идти далее взаимное усиление до некоторого предела, зависящего от общего устройства машины и способа соединения с якорем обмотки электромагнита.

По способу присоединения к цепи обмотки индуктора динамомашин разделяются на три вида:

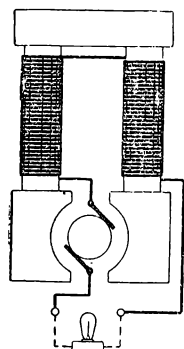


Рис. 157. Схема обмотки индуктора сериес-машины.

1. *Сериесная машина.* Если обмотка индуктора соединяется *последовательно* с рабочей цепью, то машина называется *сериес*<sup>1)</sup> (рис. 157). Сериесная машина не даёт напряжения, пока разомкнута внешняя цепь.

2. *Шунтовая машина.* Если обмотка индуктора присоединяется к зажимам щёток параллельно рабочей цепи, то машина называется *шунтовой* (рис. 158).

Шунтовая машина может работать при разомкнутой рабочей цепи; тогда весь ток проходит через обмотки индуктора. При включении рабочей цепи ток якоря делится на две части: одну — проходящую по индуктору, другую — идущую в рабочую цепь. Эти части обратно пропорциональны сопротивлениям параллельных ветвей.

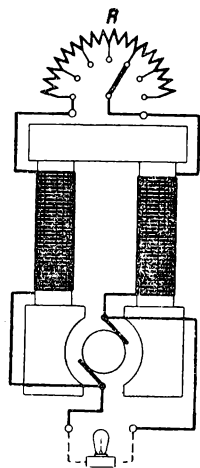


Рис. 158. Схема обмотки индуктора шунтовой машины.

3. *Компаунд-машина.* Если сделать две обмотки на индукторе и включить одну последовательно с рабочей цепью, как в сериесной машине, другую — параллельно ей, как в шунтовой, то такая машина называется *компаунд*<sup>2)</sup> (рис. 159).

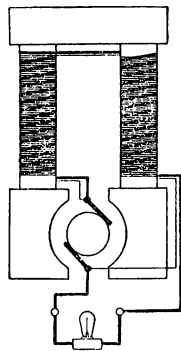


Рис. 159. Схема обмотки индуктора компаунд-машины.

## 122. Коэффициент полезного действия динамомашин. Полезной

мощностью машины называется произведение

1) *Сериес* — по-английски значит ряд.

2) *Компаунд* — по-английски значит смешанный.

напряжения во внешней части цепи  $U$  на силу тока в ней  $I$ . Полной мощностью называется произведение ЭДС якоря  $E$  на силу тока в якоре  $I_a$ .

Электрическим коэффициентом полезного действия, или электрической отдачей,  $\eta_a$  называется отношение полезной мощности к полной.

$$\text{Для серийной машины: } \eta_a = \frac{UI}{EI} = \frac{U}{E}. \quad (\text{XXa})$$

$$\text{Для шунтовой машины: } \eta_a = \frac{UI}{EI_a}. \quad (\text{XXб})$$

Якорь всей машины приводится в движение двигателем, мощность которого  $N$  на валу больше, чем мощность, развиваемая генератором, так как часть её тратится на преодоление трения в подшипниках.

*Промышленным коэффициентом полезного действия, или промышленной отдачей,  $\eta$  называется отношение полезной мощности к мощности двигателя*

$$\eta = \frac{UI}{N}. \quad (\text{XXв})$$

**Пример.** В шунтовой машине напряжение на зажимах равно 120 вольтам и сила тока во внешней цепи — 48 амперам. Сила тока в индукторе  $I_u$  равна 2 амперам. Сопротивление якоря 0,15 ома. Найдём электрическую отдачу и мощность двигателя, если промышленная отдача  $\eta = 0,85$ .

Полезная мощность  $N_1 = UI = 120 \cdot 48$  ватт = 5760 ваттам.

$$I_a = I + I_u = 48 + 2 = 50 \text{ амперам.}$$

Вместо вычисления ЭДС машины в этой задаче проще рассчитать полную мощность как сумму мощностей в якоре, индукторе и внешней цепи.

Мощность в якоре:

$$N_2 = I_a^2 \cdot r_a = 50^2 \cdot 0,15 \text{ ватт} = 375 \text{ ваттам.}$$

Мощность в индукторе:

$$N_3 = I_u \cdot U = 2 \cdot 120 \text{ ватт} = 240 \text{ ваттам.}$$

Полная мощность:

$$N = N_1 + N_2 + N_3 = 5760 + 375 + 240 = 6375 \text{ ваттам.}$$

Электрическая отдача:

$$\eta_e = \frac{5760}{6375} = 0,903.$$

Промышленная отдача:

$$\eta = \frac{UI}{N}; \quad N = \frac{UI}{\eta}; \quad N = \frac{5760}{0,85 \cdot 736} = 9,2 \text{ л. с.}$$

В новейших машинах постоянного тока больших размеров промышленная отдача достигает 90% и электрическая отдача—95% при полной нагрузке, т. е. когда ток во внешней цепи достигает наибольшей допустимой силы.

**123. Многополюсные машины.** Для каждой машины существует определённая скорость вращения, необходимая для достижения ею наибольшей мощности.

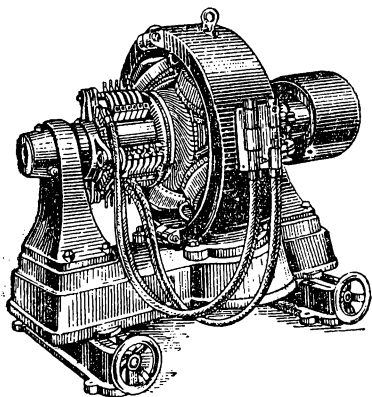


Рис. 160а. Четырёхполюсная машина.

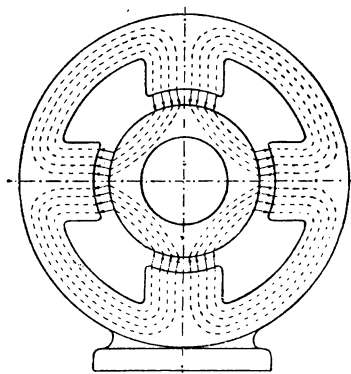


Рис. 160б. Схема четырёхполюсной машины.

Чтобы и при меньшей скорости иметь ту же величину ЭДС, можно увеличить число полюсов, заставив каждую проволоку якоря проходить в течение оборота не перед двумя полюсами, а перед большим числом их.

Так, при четырёх полюсах индуктора в каждом витке обмотки ЭДС пройдёт во время одного оборота четыре раза через значение, равное нулю. Поэтому её изменение во время одного оборота будет соответствовать изменению ЭДС за два оборота при двух полюсах. Следовательно, для достижения того же результата при

четырёх полюсах достаточна скорость вращения влвое меньшая, чем при двух полюсах; при шести полюсах — втрое меньшая и т. д. (при равенстве прочих условий). Рисунки 160а и 160б изображают четырёхполюсную динамомашину.

**124. Магнето.** Первыми по времени изобретения были машины, в которых индуктором был постоянный магнит. Они носили название магнито-электрических машин. Но так как электромагниты могут давать более сильные магнитные поля, чем постоянные магниты, то с открытием принципа самовозбуждения такие машины на электростанциях были вытеснены динамомашинами. Магнито-электрические машины применяются в настоящее время в тех случаях, когда нужна небольшая сила тока, например в цепи вызывных звонков для телефонных аппаратов некоторых систем или для получения запальной искры для зажигания горючей смеси в двигателях внутреннего сгорания. Такие небольшие магнито-электрические машины получили название магнето. Рисунок 161 даёт изображение магнето от телефонного аппарата <sup>1)</sup>.

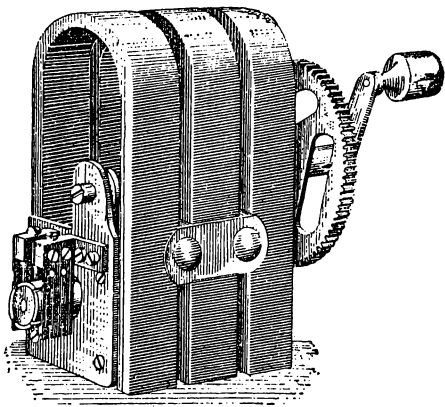


Рис. 161. Магнето.

### Упражнение 16.

1. Чему равно напряжение у зажимов динамомашины с последовательным возбуждением, если она должна работать на внешнюю цепь, потребляющую ток в 10 ампер? Сопротивления обмоток якоря и индуктора составляют вместе 4 ома; ЭДС якоря равна 440 вольтам.

*Отв. 400 вольт.*

2. Найти электрическую отдачу в предыдущей задаче. *Отв. 0,91.*

3. Какая мощность в лошадиных силах должна быть затрачена на вращение динамомашины, доставляющей ток в 20 ампер при напряжении на зажимах в 65 вольт, если промышленная отдача её равна 0,84?

*Отв. 2,1 л. с.*

4. Сопротивление  $r_u$  обмотки индуктора шунтовой динамо равняется 23 омам. Определить силу тока  $I_n$  в якорь, если напряжение у зажимов

<sup>1)</sup> Телефонные магнето называются также индукторами.

динамо равно 115 вольтам, а сила тока во внешней цепи равна 121 амперу.

*Отв.* 126 ампер.

5. Определить напряжение между зажимами шунтовой машины и сопротивление обмоток индуктора, если якорь развивает ЭДС в 116 вольт, сила тока во внешней цепи равна 32 амперам, в обмотке индуктора равна 1,35 ампера, сопротивление якоря равно 0,18 ома.

*Отв.* 110 вольт; 81,5 ома.

6. Найти электрическую отдачу в предыдущей задаче.

*Отв.* 0,91.

7. Напряжение между зажимами шунтовой динамо равно 110 вольтам, сила тока в якоре 47,5 ампера, во внешней цепи 45 ампер, сопротивление якоря 0,1 ома. Найти электрическую отдачу машины и мощность двигателя, приводящего в движение якорь, если промышленная отдача равна 0,85.

*Отв.* 0,91.

8. Какой ток пройдет по обмоткам машины в задаче 1, если её замкнуть накоротко (например, сопротивлением в 0,001 ома)? Что с ней может произойти?

*Отв.*  $\approx$  110 амперам.

9. Какой ток пройдет по обмотке индуктора машины в задаче 4, если её замкнуть накоротко (например, сопротивлением в 0,001 ома)? Что произойдет с ней?

10. Почему в машинах переменного тока не применяется самовозбуждение?

11. Шунтовая машина, у которой сопротивление якоря  $r_{я} \approx 0,04$  ома и сопротивление индуктора  $r_{и} = 20$  омам, даёт в рабочей цепи силу тока  $I = 30$  амперам при напряжении в 65 вольт. Найти: 1) силу тока в индукторе; 2) силу тока в якоре; 3) ЭДС якоря; 4) тепловую потерю в индукторе; 5) электрический коэффициент полезного действия.

*Отв.* 3,25 ампера; 33,25 ампера; 66,33 вольт; 0,88.

### **ВОПРОСЫ ДЛЯ ПРОВЕРКИ УСВОЕНИЯ.**

1. Из каких главных частей состоит генератор?
2. Какую форму имеет якорь машины?
3. Из какого материала устраивается сердечник якоря? Чем обуславливается выбор материала?
4. Как устраняются токи Фуко в якоре?
5. В каких направлениях наводится ток в витке, вращающемся в магнитном поле?
6. При каких положениях витка ЭДС индукции обращается в нуль?
7. Что называется переменным током?
8. Что называется периодом переменного тока?
9. Сколько раз меняет ток своё направление в течение периода?
10. В каких положениях вращающегося витка ЭДС достигает своего наибольшего значения? почему?
11. Какой вид имеет график ЭДС переменного тока?
12. Как называются машины переменного тока?
13. Что такое статор? ротор?
14. Как происходит в машине преобразование переменного тока в постоянный?
15. Отчего происходит пульсация тока в машине постоянного тока?
16. Как устраняется пульсация?
17. Что такое секция якоря?
18. Как отдельные секции соединяются друг с другом?



19. Что такое пластинчатый коллектор и для чего он устраивается?
20. В чём состоит самовозбуждение машины?
21. Что называется динамомашинной?
22. Когда динамомашинна называется серийной? шунтовой? компаунд?
23. Нарисуйте схемы соединения обмоток индуктора и якоря в каждом типе динамомашин.
24. Что называется полезной мощностью динамо?
25. Что называется полной мощностью динамо?
26. Что называется электрической отдачей машины?
27. Что называется промышленной отдачей машины?

**125. Электромоторы.** Машины, превращающие электрическую энергию в механическую, называются электромоторами.

Электромоторы имеют большие преимущества перед другими видами двигателей. Они исключают надобность в применении громоздких трансмиссий (рис. 162), вводятся в общую цепь удобно и незаметно прокладываемыми проводами, занимают мало места, безопасны, в любой момент могут быть пущены в ход, потребляют энергию пропорционально совершаемой работе, могут обслуживать каждую отдельную машину при бездействии остальных, допускают мелкое дробление мощности (например, до 0,1 л. с. в электрических вентиляторах), могут быть размещены в любых помещениях, чего нельзя сделать при теплоустановках, и незаменимы при работах, опасных в пожарном отношении, например, в шахтах.

С тех пор как динамомашинны стали поставлять электрическую энергию громадной мощности, электромоторы начали находить широкое применение в промышленности. Трамваи и троллейбусы составляют большую часть общественного городского транспорта; электровозы применяются на железных дорогах; краны на заводах для перемещения грузов, подъёмники в жилых домах и складах, подъёмники на военных судах для подачи снарядов приводятся в движение электромоторами. Моторы, соединённые ремённой передачей с отдельными фабричными станками или даже прямо насаженные на вал машины, могут приводить в движение все машины любой громадной фабрики и завода (рис. 163). В сельских местностях электромотор может быть присоединён к плугу, молотилке, веялке, мельнице, молочным сепараторам и к другим многочисленным сельскохозяйственным орудиям колхозов и совхозов. Электромоторы работают на постоянном и переменном токах.

**126. Электромотор постоянного тока.** Если пустить ток из постороннего источника через щётки в якорь динамомашинны, магнитное поле которой возбуждено, то якорь придёт во вращение. В самом деле, пусть через прямоугольную обмотку проходит из внешнего источника ток такого направления, какое указано на

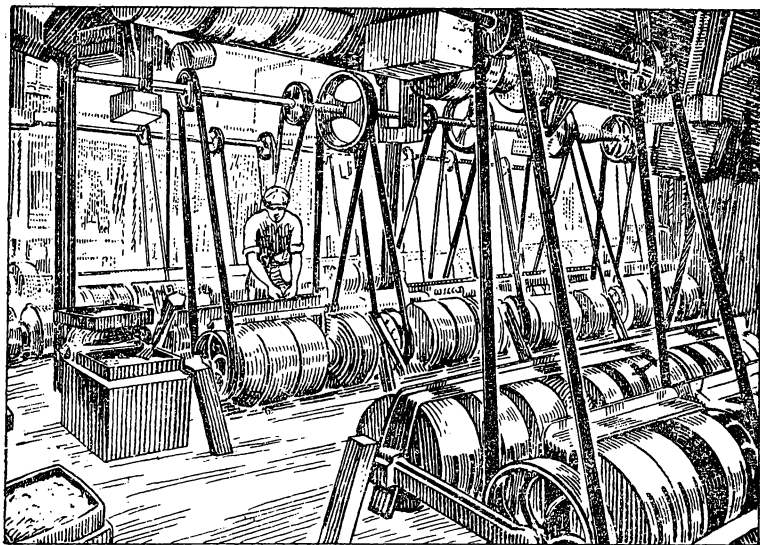


Рис. 162. Ремённые трансмиссии.

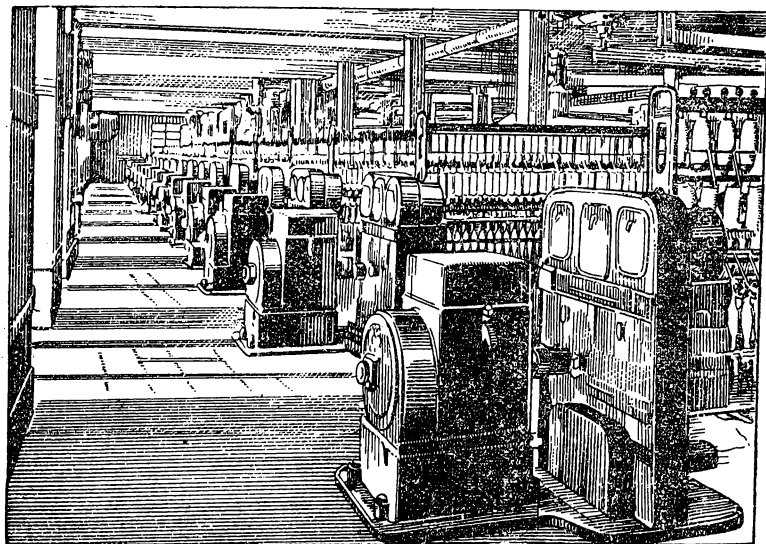


Рис. 163. Электрическое оборудование цеха.

рис. 164. Тогда подвижная рама под действием магнитного поля придёт в движение, направление которого определится по правилу левой руки.

При многих секциях обмотки механическое действие усиливается; якорь будет вращаться, пока поступает в него ток. При заданном направлении силовых линий и тока направление вращения якоря противоположно тому направлению, в котором следует его вращать, чтобы такой же ток давала динамо.

Итак, динамомашинa, получающая механическую энергию, даёт электрическую, получая электрическую, — даёт механическую.

Так как якорь мотора вращается в магнитном поле, то в нём так же, как в якоре динамомашины, возбуждается ЭДС индукции, которая по правилу Ленца противоположна ЭДС того тока, который приводит якорь в движение. Эта ЭДС называется противоэлектродвижущей силой. Её величина зависит от скорости вращения якоря, т. е. от нагрузки мотора, и всегда уменьшает силу тока в якоре.

**127. Изменение направления вращения якоря мотора.** Имея в виду правило левой руки, легко себе представить, что направление движения проводника с током может измениться, если изменится или направление тока в обмотке якоря, или направление силовых линий магнитного поля индуктора. При одновременном же изменении того и другого направление движения проводника остаётся неизменным. Поэтому, если надо изменить направление вращения якоря мотора, то достаточно переменить направление тока или в обмотке якоря, или в обмотке индуктора.

**128. Коэффициент полезного действия электромоторов.** Если обозначить напряжение на зажимах мотора через  $U$ , а полный ток, проходящий через мотор, через  $I$ , то полная электрическая мощность, потребляемая электромотором, выразится через

$$N = IU.$$

Из этой мощности часть тратится на нагревание обмоток — якорной и индуктора; поэтому мощность, развиваемая якорем, будет меньше потребляемой на величину мощности, вычисляемой по формуле Джоуля-Ленца.

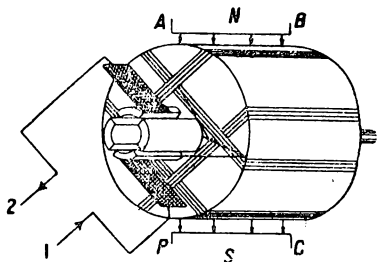


Рис. 164. Схема пуска тока в электромотор.

Обозначим развиваемую якорем мощность через  $N_1$ .

*Отношение развиваемой якорем мощности к полной мощности, потребляемой мотором, называется электрическим коэффициентом полезного действия, или электрической отдачей мотора:*

$$\eta_0 = \frac{N_1}{N}.$$

Но часть мощности, развиваемой якорем, тратится на преодоление механических сопротивлений и потерь, на намагничение и размагничение железа сердечников. Эта часть мощности примерно одинакова при работе мотора с нагрузкой и без нагрузки, холостую, почему её и называют потерей холостого хода. За вычетом этой потери из мощности якоря получим ту действительную, эффективную мощность, которую даёт электромотор на валу. Обозначим последнюю через  $N_{эф}$ .

*Отношение полезной эффективной мощности на валу электромотора к потребляемой им мощности называется промышленной отдачей:*

$$\eta = \frac{N_{эф}}{N}.$$

Электродвигатели постоянного тока обладают электрической отдачей в пределах от 70 до 92%, причём в общем отдача выше для более мощных двигателей. Отдача падает при уменьшении нагрузки и при перегрузке.

## VI. ПЕРЕМЕННЫЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК.

**129. Синусоидальное изменение ЭДС при вращении витка в однородном магнитном поле.** Обратимся теперь к более подробному изучению свойств переменного электрического тока.

Мы видели выше (§ 117, 118), что при вращении витка проволоки в поле электромагнита получается переменный ток.

В § 119 мы познакомились в основных чертах с устройством генератора переменного тока.

Проследим теперь, по какому закону изменяется ЭДС индукции во время равномерного вращения витка проволоки в однородном магнитном поле. Пусть рисунок (165а) изображает сечение электромагнита  $NS$  и  $AB$  — сечение витка проволоки, плоскость которого перпендикулярна к чертежу и к силовым линиям поля. В главе об электромагнитной индукции (§ 109) было сообщено, что ЭДС индукции прямо пропорциональна синусу угла между направлением движения проводника и направлением силовых линий. В каждый момент сторона витка, которая проектируется на

плоскость рисунка в виде точек  $A, A_1, A_2, \dots$ , движется со скоростью, направленной по касательной к окружности, например, в точке  $A_1$  (рис. 165б), по направлению  $A_1F$ .

Угол  $\alpha$  между направлением движения  $A_1F$  и магнитной силовой линией  $A_1L$  равен углу  $A_1OA$  (углы с взаимно перпендикулярными сторонами). Следовательно, можно сказать, что ЭДС

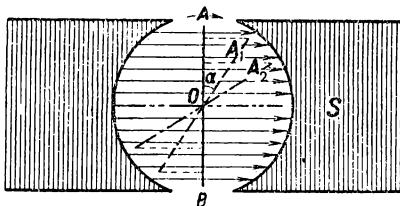


Рис. 165а.

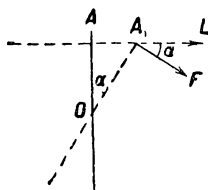


Рис. 165б.

индукции при вращении витка в магнитном поле прямо пропорциональна синусу угла отклонения плоскости витка от нейтральной плоскости, так как все остальные величины, от которых зависит ЭДС индукции, остаются во время вращения витка постоянными.

Выраженный в радианах угол поворота витка от положения, перпендикулярного к силовым линиям, называется фазой переменной ЭДС.

Если обозначить наибольшее значение ЭДС индукции через  $E_0$ , то её значение в любой момент будет равно:

$$E = E_0 \sin \alpha.$$

Если  $\alpha = 0$  или  $\alpha = \pi$ , то  $E = 0$ ; сторона витка скользит вдоль силовых линий, и индукции не происходит. Поэтому положение  $AB$  и может быть названо нейтральным. Если  $\alpha = \frac{\pi}{2}$ , то  $E = E_0$ ; сторона витка режет по перпендикулярному направлению силовые линии, и ЭДС получается наибольшей, если  $\alpha = \frac{3\pi}{2}$ , то  $E = -E_0$ ; ЭДС индукции опять достигает своего наибольшего значения, но в противоположном направлении.

Если вращение витка происходит равномерно, то угол  $\alpha$  может быть выражен через угловую скорость вращения  $\omega$  и время  $t$ ; именно  $\alpha = \omega t$ .

Угловая же скорость  $\omega$  выражается через период вращения  $T$  или число оборотов в секунду  $\nu$  (частота вращения):

$$\omega = 2\pi\nu; \quad \omega = \frac{2\pi}{T}; \quad \alpha = 2\pi\nu t; \quad \alpha = \frac{2\pi t}{T} \quad \text{и} \quad E = E_0 \sin \omega t.$$

Генераторы переменного тока обыкновенно устраиваются так, чтобы период переменного тока  $T$  был равен  $\frac{1}{50}$  секунды. Тогда число перемен направлений тока в секунду будет равно 100.

Понятно, что зависимость между ЭДС индукции и временем выражается тем же графиком, что и зависимость синуса от угла, т. е. синусоидой.

Такая синусоида изображена на рис. 151.

На оси абсцисс отложены отрезки, соответствующие равным частям периода вращения; на оси ординат — значения ЭДС, соответствующие концам частей периода.

**130. Передача электрической энергии на расстояние.** Экономнее питать электромоторы разных фабрик током, вырабатываемым на одной центральной станции, чем устраивать электростанции на каждой фабрике. Но по мере удаления моторов и вообще потребителей энергии от места получения электрической энергии становятся более значительными потери на нагревание подводящих проводов. Уменьшить эту потерю можно было бы путём уменьшения сопротивления проводника, т. е. за счёт увеличения сечения проводника. Но в этом случае растёт стоимость материала для проводов и для всей установки, поэтому техника идёт по пути изменения силы тока.

Приборы, преобразующие токи с изменением их силы и напряжения, называются трансформаторами.

Первый трансформатор построен в 1882 г. русским изобретателем-самоучкой И. Ф. Усагиным<sup>1)</sup>.

Трансформатор называется повышающим, если из него выходит ток с повышенным напряжением, и понижающим, — если выходит ток с пониженным напряжением.

Задача трансформирования переменного тока при передаче на расстояние состоит в следующем. Генератор тока при напряжении  $e$  вольт и силе тока в  $I$  ампер даёт мощность  $Ie$  ватт. Желательно эту мощность доставить потребителю с наименьшими потерями на пути; эти потери пропорциональны  $I^2$ , следовательно, задача трансформации тока должна состоять в превращении его в ток силой  $i$ , которая была бы во много раз

---

<sup>1)</sup> Усагин Иван Филиппович (1855—1919) — замечательный русский изобретатель-самоучка, ассистент выдающегося русского физика А. Г. Столетова в Московском университете. И. Ф. Усагин изобрёл трансформатор электрического тока, без которого не могла бы существовать вся современная электротехника. Он создал новую конструкцию ртутного насоса; работал в области цветной фотографии; изучал катодные лучи.

меньше, чем  $I$ . Но чтобы не изменилась передаваемая мощность, напряжение нового тока  $E$  должно быть во столько же раз увеличено. Генератор даёт мощность  $Ie$ ; эта мощность поступает в трансформатор, где преобразовывается в мощность  $Ei$ . В идеальном случае (отсутствие потерь энергии в трансформаторе)

$$eI = Ei.$$

Малая сила тока  $i$  даёт малую потерю в проводах на джоулево тепло. На месте потребления мощность  $Ei$  [здесь она взята без потерь<sup>1)</sup>] поступает во второй трансформатор, который производит обратное преобразование (в идеальном случае):  $Ei = eI$ , и в таком виде мощность потребляется двигателями и другими потребителями электрической энергии.

Такова задача трансформации тока с целью уменьшения потерь при передаче (в действительности в идеальные уравнения надо внести поправки на потери).

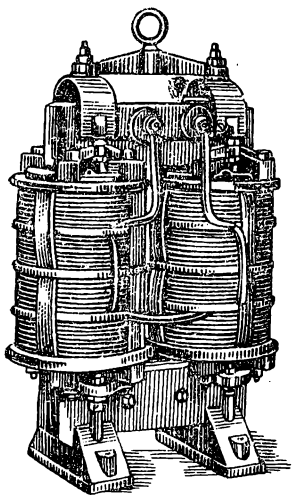


Рис. 166. Внешний вид трансформатора.

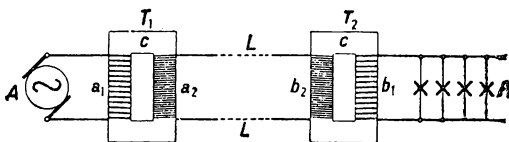


Рис. 167. Схема передачи электрической энергии.

**131. Трансформатор переменного тока.** Рис. 166 изображает трансформатор переменного тока, а рис. 167 даёт схему его устройства и схему трансформации тока.

Технический трансформатор представляет собою раму прямоугольного сечения, составленную из отдельных железных листов.

На одну сторону прямоугольника надевается катушка  $a_1$  с небольшим числом витков ( $w_1$ ) толстой проволоки, а на другую — катушка  $a_2$  с большим числом витков ( $w_2$ ) тонкой проволоки.

На электростанции зажимы альтернатора  $A$  соединяются с катушкой  $a_1$  повышающего трансформатора  $T_1$ . Вторая его

<sup>1)</sup> Потеря напряжения в соединительных проводах допускается до  $15\%$ .

катушка  $a_2$  соединяется проводами с катушкой  $b_2$  второго, понижающего трансформатора  $T_2$ , находящегося на месте потребления электрической энергии, хотя бы за сотни километров от станции. Катушка  $b_1$  второго трансформатора соединена проводами с распределительной доской, распределяющей энергию по потребителям, например, по заводским моторам или осветительной сети.

При каждой перемене тока, поступающего в катушку  $a_1$  из генератора, железная рама  $T_1$  намагничивается то в одном, то в противоположном направлении. Изменяющееся магнитное поле наводит ток соответствующего направления во вторичной катушке  $a_2$ . В этой катушке возникает также переменный ток, число перемен которого равно числу перемен первичного тока. Если первичный переменный ток имеет, как обыкновенно, 100 перемен в секунду, т. е. 50 периодов в секунду, то столько же периодов получается и во вторичном. ЭДС индукции прямо пропорциональна числу витков проволоки в индуктируемой катушке  $a_2$ .  $E$  (ЭДС в катушке  $a_2$ ) так относится к  $e$  (ЭДС в катушке  $a_1$ ), как число витков  $w_2$  катушки  $a_2$  к числу витков  $w_1$  катушки  $a_1$ .

Поэтому отношение:

$$\frac{E}{e} = \frac{w_2}{w_1} = \frac{\text{число витков во вторичной катушке}}{\text{число витков в первичной катушке}}$$

называется коэффициентом трансформации<sup>1)</sup>.

На электростанции устанавливается трансформатор, повышающий напряжение.

По катушкам  $a_2$  и  $b_2$  обоих трансформаторов и по соединительным проводам проходит также переменный ток такого же периода, как и в альтернаторе. Эти переменные токи, проходящие по катушке  $b_2$ , возбуждают в железе второго трансформатора переменное магнитное поле, которое в свою очередь наводит переменные индукционные токи в катушке  $b_1$  второго трансформатора. Напряжение в  $b_1$  будет во столько раз меньше, чем в  $b_2$ , во сколько раз число витков катушки  $b_1$  меньше числа витков катушки  $b_2$ .

При почти одинаковой мощности в обеих катушках сила тока в  $b_1$  будет во столько раз больше, чем в  $b_2$ , во сколько раз ЭДС в  $b_1$  меньше ЭДС в  $b_2$ . Трансформатор на месте потребления является таким образом прибором, понижающим напряже-

---

<sup>1)</sup> В некоторых учебниках коэффициентом трансформации называют отношение  $\frac{w_1}{w_2}$ .



ние. Такое понижение необходимо потому, что электрическое освещение устраивается большею частью с напряжением 120—220 вольт.

Если, например, в трансформаторе  $T_1$  коэффициент трансформации будет равен 200, то ЭДС в  $a_2$  будет в 200 раз больше, чем в  $a_1$ , сила же тока в  $a_2$  получится в 200 раз меньше силы тока в  $a_1$  (из равенства мощностей  $eI = Ei$ ). С уменьшением же силы тока в 200 раз потеря на джоулево тепло в том же проводнике уменьшится в  $200^2 = 40\,000$  раз.

В действительности (в отличие от приведённых выше расчётов) и в трансформаторе происходит некоторая потеря энергии вследствие нагревания. Но благодаря отсутствию в трансформаторе вращающихся частей, следовательно, благодаря отсутствию трения, общие потери ничтожны, и коэффициент полезного действия трансформатора достигает 98%. Так как в трансформаторе получаются громадные напряжения, то для лучшей изоляции его помещают в металлический кожух, заполненный маслом, которое также отводит теплоту, выделяющуюся в обмотках трансформатора, т. е. служит средством охлаждения.

**132. Электрификация страны.** Электрификацией с физической точки зрения называется превращение различных форм энергии на месте их получения в электрическую энергию, передача её на место потребления и превращение там электрической энергии снова в ту форму, в которой нуждается потребитель.

Возможность передачи электрической энергии на расстояние, т. е. передачи механической работы посредством электричества, впервые установил русский учёный Лачинов Д. А., разработавший в 1880 г. основы современной теории передачи энергии постоянным электрическим током.

Практически проблему передачи электроэнергии на большие расстояния удалось решить на основе создания машин так называемых трёхфазных переменных токов. Этим современная техника обязана русскому учёному и инженеру М. О. Доливо-Добровольскому<sup>1)</sup>.

---

<sup>1)</sup> Доливо-Добровольский Михаил Осипович (1862—1919)— знаменитый русский электротехник, создавший основы всей современной техники так называемых трёхфазных переменных токов.

М. О. Доливо-Добровольский доказал технические преимущества трёхфазного переменного тока, представляющего собой определённое сочетание трёх обычных переменных токов. Он создал первый в мире трёхфазный генератор переменного тока, первый трёхфазный двигатель и первый трёхфазный трансформатор. Доливо-Добровольский осуществил в 1891 г. первую в мире передачу больших количеств электро-

До введения в промышленность электромотора источник механической энергии — паровой или тепловой двигатель, естественно, помещался как можно ближе к фабрике, так как прежняя трансмиссия при помощи валов, шкивов и бесконечных ремней не допускала сколько-нибудь дальней передачи. Поэтому в промышленные местности нужно было подвозить топливо, необходимое для питания двигателей.

Развитие промышленности при отсутствии централизованного электроснабжения требует увеличенного подвоза топлива. Доставка топлива на заводы сильно загружает транспорт и является для них мало экономным предприятием. Электрическая же энергия допускает весьма простой и при применении трансформации выгодный способ передачи энергии. Естественно возникает мысль: не энергию подвозить в форме топлива к месту силовой установки, к машинному отделению фабрики, а силовую установку перенести на место запасов энергии, там превратить эти запасы в электрическую энергию и последнюю направить по проводам на место потребления.

В качестве дешёвых запасов энергии используются местные виды топлива, которые благодаря своей малой калорийности были бы невыгодны при дальней перевозке. Таковы: торф, бурые угли, горючие сланцы, угольная пыль, местные отбросы фабрично-заводского производства.

Так в нашем Союзе созданы крупные станции — Шатурская под Москвой, Горьковская, потребляющие для двигателей генераторов торф; Каширская, Бобриковская и др., работающие на местных бурых углях; Зуевская — на угольной пыли; Грозненская — на продуктах переработки нефти и на газах и т. п.

Самой дешёвой энергией является энергия падающей воды. Поэтому самые грандиозные электростанции мы видим на берегах водопадов: по обоим берегам Ниагары в Америке, по реке Замбези в Африке, в горных странах — Швейцарии, Швеции, Норвегии. В нашем Союзе создана установка на Волхове — Вол-

---

энергии с помощью переменного трёхфазного электрического тока на расстоянии 175 км.

Введение в практику трёхфазных переменных токов, осуществлённое М. О. Доливо-Добровольским, совершило настоящий переворот в промышленной энергетике, практически разрешив проблему передачи энергии на большие расстояния с помощью электрического тока.

С тех пор переменный трёхфазный ток занял господствующее положение в электротехнике и стал играть решающую роль во всей проблеме электрификации.

Современная электротехника обязана М. О. Доливо-Добровольскому рядом других важных изобретений.

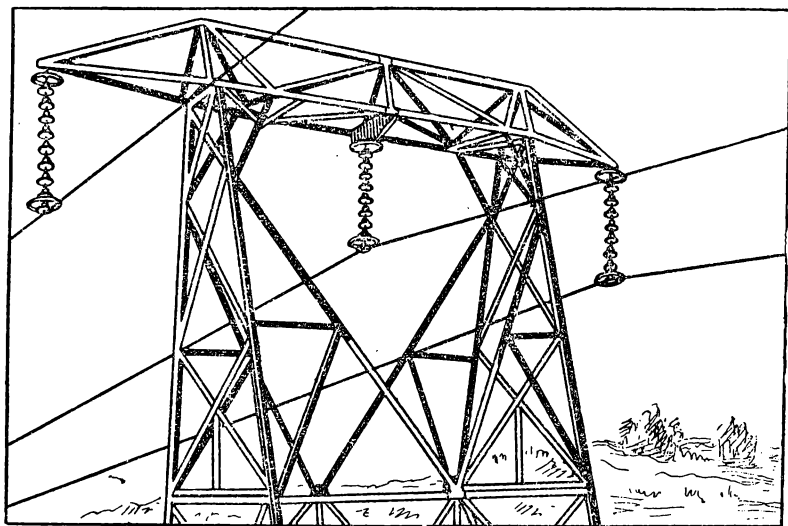


Рис. 168. Мачты для передачи тока высокого напряжения.

ховская гидростанция; на Днепре — Днепровская станция; построены станции и на других реках; существуют установки на Кавказе.

Мощность падающей воды используется при помощи гидро-станции. На гидростанцию по трубе поступает падающая с некоторой высоты вода. Эта вода поступает в водяную турбину и отдаёт ей большую часть своей энергии, приводя турбину в быстрое вращение. На вал турбины насажена вращающаяся часть генератора, который превращает механическую энергию турбины в электрическую энергию с тем большим коэффициентом полезного действия, чем на большую мощность он рассчитан.

Электрическая энергия поступает в трансформатор и выходит из него с малой потерей в виде тока высокого напряжения. В таком виде энергия передаётся на дальние расстояния (рис. 168) в сотни километров, а затем поступает в понижающий трансформатор и там распределяется по местам потребления.

Трансформатор на Волхове даёт повышенное напряжение — до 120 000 V. В Ленинграде на внешнем кольце происходит сперва понижение со 120 000 до 35 000 V, а затем на семи внутренних подстанциях города происходит понижение с 35 000 до 6 600 или 3 300 V.

Первый план электрификации, план ГОЭЛРО, составленный в 1920 году по инициативе Владимира Ильича Ленина, горячо поддержанный товарищем Сталиным, был назван планом социалистического переустройства отсталой в техническом отношении царской России в передовую индустриальную страну. Владимир Ильич Ленин и Иосиф Виссарионович Сталин считали, что электрификация является непременным условием для победы социализма в нашей стране.

По первому плану электрификации, плану ГОЭЛРО, намечалось за 10—15 лет построить 30 районных электростанций общей мощностью в 1,5 млн. киловатт. Ленин не дожид до полного воплощения своих идей электрификации нашей страны. Но то, что не успел сделать Ленин, должны, сказал товарищ Сталин, сделать его ученики. Под руководством великого продолжателя дела Ленина, вождя нашей партии товарища Сталина, план электрификации СССР не только осуществлён, но и перевыполнен. Уже в 1932 году мощность районных электростанций составляла 2866 тысяч киловатт. Только за одну вторую пятилетку введено новых мощностей на районных электростанциях свыше двух миллионов киловатт. За годы второй пятилетки мощность электростанций выросла с 4677 тысяч киловатт до 8116 тысяч киловатт.

В результате выполнения сталинских пятилеток Советский Союз в предвоенные годы вышел на одно из первых мест в мире по выработке электроэнергии. Накануне Великой Отечественной войны, т. е. через 20 лет после создания плана ГОЭЛРО, размер промышленной продукции, особенно тяжёлой промышленности, а также мощностей электростанций в несколько раз превзошёл задания, установленные планом ГОЭЛРО.

В единой системе все станции местного значения — заводские, коммунальные, районные — являются в то же время станциями общего пользования. Они вырабатывают энергию на одну сеть и планоно и централизованно распределяют её между потребителями.

В перспективе намечается охват единым кольцом электрических систем отдельных, удалённых друг от друга районов (Урало-Кузнецкий, Восточносибирский, Среднеазиатский, Украина, Центрально-Промышленная область и т. д.).

Идея единой сети от Ленинграда до Владивостока и от Архангельска до Закавказья осуществима исключительно лишь в условиях социалистического хозяйства.

В социалистическом использовании энергии централизованное электроснабжение составляет только одну часть дела.

Ещё во второй пятилетке вплотную был поставлен вопрос о теплофикации. Этот вопрос распадается на два.

Во-первых, использование тепла, отработанного на крупных силовых станциях, в комбинированных теплоёмких производствах, например, химических, или для удовлетворения тепловых нужд окружающего населения — для отопления, пищевой промышленности, на фабриках-кухнях, централизованных прачечных и т. п.

Во-вторых, все местные горючие отбросы промышленного и сельскохозяйственного производств, в последнем, например, солома, лузга и др., должны централизованно обращаться в тепло, а за счёт этого тепла должна снабжаться и местная электростанция, а отработанное тепло должно идти на бытовые потребности.

Вследствие соединения в единое кольцо различных станций, работающих то на воде, то на угле, то на отбросах производства, вследствие связи теплофикации и электрификации в единую теплоэлектроцентраль по генеральному плану, промышленность должна распределяться по Союзу гнёздами, или комбинациями. Должны соединяться между собою производства, связанные процессом обработки; таков Урало-Кузнецкий комбинат руды и угля. Комбинируются производства электроёмкие, с мощными гидроэлектростанциями, теплоёмкие — с теплоэлектростанциями. Так, возле Днепровской гидроэлектростанции были созданы алюминиевые заводы, так как выплавка алюминия требует значительного количества электрической энергии и становится тем выгоднее, чем дешевле электрическая энергия.

Вспашка, уборка, молотба, электродоение, электрострижка овец, электроинкубаторы, электрические запарные котлы и аппараты для подготовки кормов, водоснабжение и вентиляция скотных дворов, чистка коров, стерилизация и подогрев молока, электросветокультура, аппараты облучения животных и растений ультрафиолетовыми лучами (§ 208) и тому подобные мероприятия могут быть осуществлены при помощи электрификации сельского хозяйства.

Сами буржуазные сторонники электрификации вынуждены признать, что в буржуазных странах часто соображения личного характера или политические, лишённые экономического обоснования, делают невозможным объединение, которое становится экономически целесообразным.

И здесь, как и в других случаях, производительные силы приходят в столкновение с производственными отношениями.

Только социализм может проектировать такую единую систему энергетического хозяйства.

„Электрификация — это техника социализма“.

После победоносного завершения войны советский народ снова принялся за мирный труд с тем, чтобы в кратчайший срок залечить все раны, нанесённые войной, и пойти ещё дальше в деле развития всего народного хозяйства СССР. Большое место в плане первой послевоенной сталинской пятилетки принадлежит развитию электрификации. Вот как говорит о грандиозных задачах, стоящих перед нами, Закон о пятилетнем плане восстановления и развития народного хозяйства СССР на 1946—1950 гг.:

„В области электрификации — форсировать восстановление и строительство электростанций с тем, чтобы рост мощностей электростанций опережал восстановление и развитие других отраслей. Создать в энергосистемах постоянный резерв мощностей, обеспечивающий высокое качество электрической энергии, не допуская работы электростанций на пониженной частоте. Установить выработку электроэнергии на 1950 год на 70 процентов больше, чем в 1940 году.

Полностью восстановить электростанции в районах, подвергавшихся оккупации, и ввести в действие на всех электростанциях СССР за пятилетие 11,7 млн. киловатт, доведя установленную мощность электростанций до 22,4 млн. киловатт в 1950 году.

Развернуть строительство гидроэлектростанций, обеспечить всемерное повышение удельного веса гидроэлектроэнергии в выработке электроэнергии по народному хозяйству. Ввести в действие за пятилетие гидроэлектростанции на общую мощность в 2300 тыс. киловатт.

Восстановить 6 гидроэлектростанций, в том числе Днепровскую имени Ленина. Закончить строительство 30 гидроэлектростанций. Приступить к сооружению и ввести в действие первую очередь 8 гидроэлектростанций и начать строительство 5 новых крупных гидроэлектростанций. Продолжить проектно-изыскательские работы для подготовки к строительству новых гидроэлектростанций на реках Днепр и Сыр-Дарья.

Широко развернуть работы по восстановлению и строительству гидроэлектростанций местного значения, используя для этих целей в первую очередь существующие плотины. Обеспечить ввод в действие по малым гидроэлектростанциями мощности на 1000 тыс. киловатт.

Восстановить тепловые электростанции и электросети Москвы, Донбасса, Приднепровья, Киева, Харькова, Львова, Одессы, Николаева, Севастополя, Новороссийска, Краснодара, Грозного, Сталинграда, Воронежа, Брянска, Калинин, Минска, Вильнюса, Риги, Таллина и Петрозаводска.

Закончить строительство и ввести в действие 37 районных тепловых электростанций, в том числе 21 теплоэлектростанция. Ликвидировать разрыв между мощностями электростанций и потребностью в электроэнергии в Московской, Горьковской, Ярославской и Ивановской энергосистемах.

Обеспечить широкое внедрение в промышленности индивидуального автоматизированного электрического привода и осуществить постепенный переход к электроприводу, органически связанному с исполнительными механизмами рабочих машин. Расширять применение электротехнологии в производстве лёгких и цветных металлов, легированных сталей, химических продуктов и в металлообработке.

Наряду с дальнейшей электрификацией промышленности перейти к более широкой электрификации железнодорожного транспорта и сельского хозяйства. Обеспечить массовое строительство в сельских местностях небольших гидроэлектростанций, ветростанций и тепловых электростанций с локомобильными и газогенераторными двигателями. Продолжить работы по теплофикации городов: Москвы, Ленинграда, Киева, Харькова, Свердловска, Ростова-на-Дону.

Широко внедрить на электростанциях новейшую энергетическую технику — применение пара высокого давления и высокой температуры, новейших теплофикационных турбин и новейших типов котлов, генераторов и высоковольтной аппаратуры. Широко развернуть работы по автоматизации производственных процессов электростанций и электросетей; в первую очередь проводить полную автоматизацию работы гидроэлектростанций.

Провести научно-экспериментальные работы и практически осуществить передачу электроэнергии постоянным током высокого напряжения на большие расстояния“.

17 апреля 1951 года опубликовано сообщение об итогах выполнения первого послевоенного пятилетнего плана СССР на 1946—1950 годы. В этом сообщении говорится о том, что задание пятилетнего плана по выработке электроэнергии перевыполнено. Установленный пятилетним планом на 1950 г. уровень производства электрической энергии достигнут досрочно—в IV квартале 1949 г. Выработка электроэнергии в 1950 году составила 110 процентов к заданию пятилетнего плана и превысила уровень 1940 г. на 87 процентов. Произведено восстановление разрушенных во время войны тепло- и гидроэлектростанций, в том числе и знаменитой Днепровской электростанции имени Ленина. Построены и введены в действие намеченные планом первой послевоенной пятилетки электростанции в различ-

ных местах Союза. В 1946—1950 годах продолжало осуществляться внедрение на электростанциях новейшей энергетической техники.

В августе и сентябре 1950 г. опубликованы постановления Совета Министров СССР о постройке следующих гидроэлектростанций: Куйбышевской на Волге мощностью в 2 000 000 *квт* и со средним годовым производством энергии около 10 000 000 000 *квт-ч*; Сталинградской на Волге мощностью в 1 700 000 *квт* и со средним годовым производством энергии около 10 000 000 000 *квт-ч*; Каховской на Днепре мощностью в 250 000 *квт* и со средним производством энергии около 1 200 000 000 *квт-ч*; наконец, трёх гидроэлектростанций на Главном Туркменском канале мощностью в 100 000 *квт*. Первые две станции вместе должны подать 10 000 000 000 *квт-ч* в год для промышленности города Москвы, 1 600 000 000 *квт-ч* в год для промышленности областей, 3 500 000 000 *квт-ч* для орошения и обводнения земель Заволжья и Прикаспия. Также и другие строящиеся гидроэлектростанции должны давать энергию для поднятия сельского хозяйства в засушливых областях Украины, Крыма, Туркменистана.

Осуществление такого широкого плана электрификации ставит на разрешение перед физикой и основанной на ней техникой ряд сложнейших задач.

Таковыми задачами являются:

1) Повышение передаваемого напряжения до 400 — 600 киловольт для уменьшения потерь при передаче.

В нашем Союзе намечаются передачи мощностью до 1 млн. *квт* на расстояние 1 тыс. *км* или даже 2 тыс. *км*. Такая передача требует повышения напряжения передаваемого тока до 400 или даже 600 киловольт, а может быть и выше.

Для исследования в этой области научные учреждения должны располагать трансформаторами, дающими так называемые сверхвысоковольтные напряжения. Действительно, в лаборатории высоких напряжений Энергетического института в Москве установлен трансформатор, дающий 1 000 000 вольт. Имеются подобные трансформаторы в лаборатории Всесоюзного экспериментального электротехнического института в Москве и в лабораториях ленинградских Физико-технического и Электротехнического институтов.

2) Увеличение изолирующих качеств материалов, которые должны будут выдерживать такие напряжения.

По данным академика А. А. Чернышёва, стоимость линии передачи переменного тока в общей сложности приблизи-



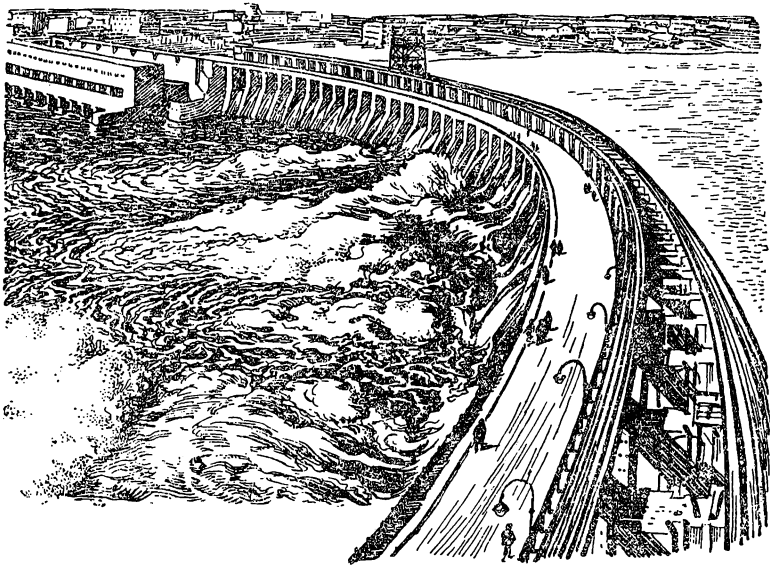


Рис. 169. Вид Днепровской плотины.

тельно в два раза выше, чем оборудование при передаче постоянного тока. Отсюда возникает проблема передачи постоянного тока.

**133. Днепровская гидростанция.** Днепровская станция представляет собой капитальные сооружения на реке Днепре, имеющие целью, с одной стороны, использовать энергию порожиистой части Днепра между городами Днепропетровском и Запорожьем, а с другой — сделать Днепр в этой части судоходным. Этот проект начал осуществляться с 1927 г., и станция начала работать в 1933 г.

Водосливная часть плотины занимает всю ширину русла реки протяжением в 760,5 м и разбита быками на 47 пролётов; высота падения воды 37 м.

Расход воды 20 400 м<sup>3</sup>/сек.

На правом берегу к плотине примыкает силовая станция (рис. 169).

Мощность станции определена  $\approx 600\,000$  квт.

Зимой в маловодные годы может быть обеспечено только до 184 000 квт, недостающая мощность должна возмещаться паровой установкой.

На станции установлено 9 турбогенераторов по 66 000 *квт* каждый. Каждый турбогенератор состоит из вертикальной турбины Френсиса, непосредственно соединённой с трёхфазным генератором. Каждый генератор даёт напряжение в 13 800 V. Для передачи к местам потребления этот ток трансформируется в ток с напряжением в 165 000 V. Кроме 9 больших турбин, поставлены две малые с мощностью по  $\approx 2\,500$  *квт* для обслуживания местных нужд. Общая длина станции 242 м.

Фашисты при временной оккупации Приднепровья варварски разрушили это грандиозное сооружение — гордость советской техники. Но в короткий срок после освобождения страны благодаря энтузиазму и энергии советских людей оно уже восстановлено.

### ЛИТЕРАТУРА

- Кузнецов Б. Г., Очерки по истории электротехники.  
Лебедев В. И., Электричество, магнетизм и электротехника в их историческом развитии.  
Рудометов, Русские электротехники.  
Радовский М., Фарадей (жизнь замечательных людей).  
Шаховская Н. и Шик М., Загадка магнита. Повесть о жизни и трудах Майкла Фарадея.  
Лебединский В. К., проф., Беседы об электричестве.  
Миткевич В. Ф., Электрическая энергия.  
Оношко Л. М., Электрическая энергия, её источники, свойства и применения.  
Гумилевский Л., Русские инженеры.  
Горячкин Е. Н., Переменный ток.  
Зибер В. А., Приключения юных электриков. Электричество в быту.

### Упражнение 17.

1. Если передавать электрическую мощность в 6000 *вт* при напряжении в 110 V и при напряжении в 220 V, то какое должно быть отношение между площадями сечений проводов при одинаковом удельном сопротивлении?
2. В осветительную сеть переменного тока с напряжением в 120 V включается трансформатор, понижающий напряжение до 8 V. Найти отношение между числами витков обеих обмоток его.
3. Почему сердечник трансформатора устраивается из мягкого железа?
4. Почему сердечник трансформатора не делается из сплошного куска железа?
5. Какую выгоду представляет замкнутая форма трансформатора?
6. Трансформатор, включённый в линию переменного тока с напряжением в 35 000 V, даёт между зажимами вторичной обмотки напряжение в 6600 V. Найти коэффициент трансформации.
7. Определить число витков во вторичной обмотке повышающего трансформатора, если в первичной обмотке 120 витков, а коэффициент трансформации равен 16.

8. В первичной обмотке повышающего трансформатора 80 витков, во вторичной — 1280 витков. Какое напряжение на зажимах вторичной обмотки можно получить, если включить первичную обмотку под напряжением в 115 V?

134. Индукционная катушка Румкорфа. Другим видом трансформаторов, повышающих напряжения, является катушка, устроенная Румкорфом, названная по его имени и представленная на рисунке 170а.

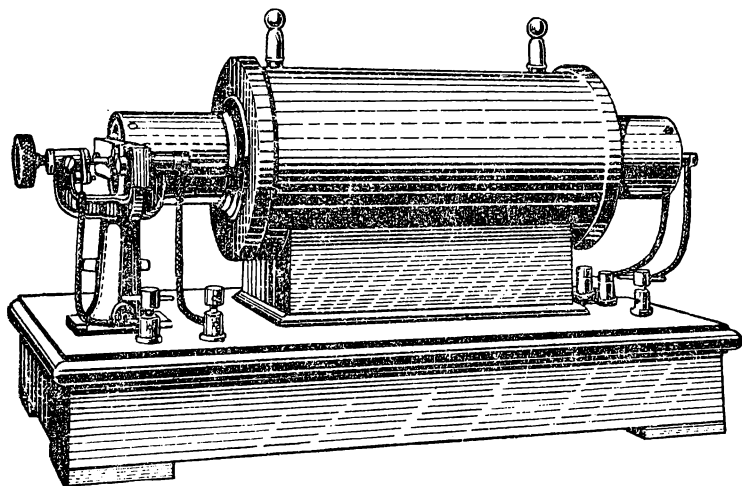


Рис. 170а. Катушка Румкорфа.

Помимо своего первого назначения — трансформировать переменный ток с повышением напряжения, индукционная катушка служит также для преобразования постоянного тока в токи высокого напряжения, проходящие в противоположных направлениях. Но постоянный ток наводит индукционные токи только в момент его замыкания или размыкания, поэтому для трансформации постоянного тока его надо превратить в прерывистый. Преобразование постоянного тока в прерывистый совершается при помощи прерывателей разного рода, простейшим из которых является молоточковый прерыватель.

Катушка Румкорфа (рис. 170б) состоит из сердечника  $NS$  — пучка прутьев мягкого железа; на сердечник надевается катушка гервичной обмотки  $A_1B_1$  из небольшого числа витков толстой проволоки, имеющая малое сопротивление; на первичную катушку надевается изолированная от неё вторичная обмотка  $A_2B_2$  из

очень большого числа витков очень тонкой проволоки. Концы вторичной обмотки выведены наружу.

На упругой пластинке перед сердечником катушки укрепляется молоточек  $M$ , головка которого сделана из мягкого железа. Упругая пластинка прижимает головку к винту  $D$ , укрепленному на подставке. Основание молоточка соединено с одним концом первичной обмотки. Источник тока  $E$  присоединяется к другому концу первичной обмотки и к основанию винта.

При замыкании тока в первичной обмотке сердечник намагничивается, притягивает молоточек и разъединяет его с винтом.

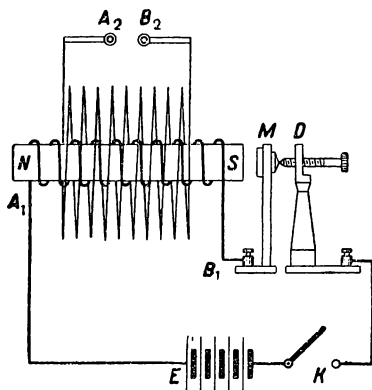


Рис. 1706. Схема устройства катушки Румкорфа.

Притяжение молоточка вызывает разрыв цепи в месте первоначального прикосновения молоточка к винту; ток прекращается, намагничение сердечника исчезает, упругость ножки молоточка оттягивает его от сердечника и снова прижимает к винту. Соприкосновение молоточка с винтом снова замыкает ток, и затем повторяется весь ряд описанных явлений. Таким образом, в течение секунды первичный ток столько раз будет замыкаться и размыкаться, сколько колебаний в секунду может совершать молоточек.

При каждом замыкании тока в первичной катушке во вторичной индуцируется ток, противоположный первичному, при размыкании — одинаково направленный с первичным. Величина ЭДС индукции во вторичной катушке тем значительнее, чем больше число витков вторичной катушки, сила первичного тока и чем больше число перерывов первичного тока. Напряжение в промежутке между концами вторичной обмотки при больших размерах индуктора, при длине проволоки во вторичной обмотке в несколько десятков километров и при усовершенствованных прерывателях (свыше 1000 перерывов в секунду) может быть доведено до нескольких сотен тысяч вольт. Катушки Румкорфа применяются в научных исследованиях и в технике. При помощи их были сделаны крупнейшие научные открытия, касающиеся прохождения электричества через газы, открытия нового вида лучей, возбуждения электромагнитных колебаний и т. п.

Индукционные катушки применяются в телефонной технике. Ток, питающий микрофон на передающей станции, направляют не непосредственно на приёмную станцию, а в первичную обмотку индукционной катушки; вторичную же обмотку катушки соединяют с телефоном-приёмником второй станции. При изменении силы тока в микрофоне-передатчике в индукционной катушке возбуждаются переменные токи, которые, попадая в телефон-приёмник второй станции, вызывают в нём колебания мембраны.

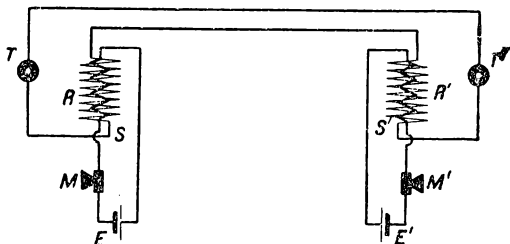


Рис. 171. Схема соединений телефонных станций.

Схема соединения двух станций (без вызывного звонка) дана на рисунке 171, где  $M$  и  $M'$  представляют собой микрофоны двух станций,  $T$  и  $T'$  — телефоны их,  $E$  и  $E'$  — батареи,  $S$  и  $S'$  — первичные катушки индукторов,  $R$  и  $R'$  — вторичные катушки индукторов. Способ соединения ясен из рисунка.

### ВОПРОСЫ ДЛЯ ПРОВЕРКИ УСВОЕНИЯ.

1. В чём состоит трансформация тока?
2. Как устраивается трансформатор переменного тока?
3. Из какого материала устраивается сердечник трансформатора? почему?
4. Как устраняются токи Фуко в сердечнике трансформатора?
5. Что называется трансформатором, повышающим напряжение? понижающим?
6. Что называется коэффициентом трансформации? Как он вычисляется?
7. Каковы устройство, назначение и применение катушки Румкорфа?
8. В какой ток надо преобразовать ток в первичной обмотке катушки Румкорфа, чтобы получить во вторичной её обмотке индукционные токи?
9. В чём состоит электрификация страны?

## VII. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ КОЛЕБАНИЯ<sup>1)</sup>.

**135. Токи высокой частоты.** Всем известно радио, при помощи которого осуществляется культурная связь крупных центров с отдалёнными местами нашего Союза.

<sup>1)</sup> Глава VII написана В. М. Шульгиным.

В предыдущей главе (§ 129) мы познакомились с переменным током, питающим осветительные установки и электромоторы; мы, например, знаем, что в проводах, идущих от динамомашины переменного тока или трансформатора, электрический ток совершает 50 полных колебаний в секунду.

Если мы каким-либо способом заставим ток совершать более частые колебания, например, сотни тысяч или миллионы раз в секунду, то получим ток, которым пользуются радиостанции, ток высокой частоты.

Рассмотрим способы получения токов высокой частоты.

**136. Искровой разряд как источник токов высокой частоты.** Возьмём лейденскую банку, зарядим её обкладки разноимёнными зарядами, а потом разрядим её при помощи дугowego разрядника; получится яркая искра. Ещё в половине прошлого столетия физик Федерсен, рассматривая изображение искры во вращающемся зеркале, заметил, что искровой разряд — не простой. Если сфотографировать изображение искры от лейденской банки во вращающемся зеркале (ось вращения параллельна длине искры), то получим картину, изображённую на рис. 172 (дана картина от четырёх искр). Если бы искра представляла собой кратковременный ток одного направления, то во вращающемся зеркале получилась бы сплошная однородная полоса (увеличенная ширина искры); между тем рис. 172 показывает, что свечение газа во время прохождения искры — прерывистое, оно чередуется с темнотой. Поэтому мы можем сделать заключение, что искровой разряд не есть мгновенный электрический ток одного направления, как это казалось с первого взгляда, а процесс колебательный. Как ни краток промежуток времени, в течение которого происходит искровой разряд, всё же его можно разбить на ещё более мелкие промежутки — прохождение тока то в одну, то в другую сторону. Измерив скорость вращения зеркала и сосчитав количество светлых язычков за время существования одной искры, мы легко получим частоту колебаний тока при искровом разряде. Вычисления показывают, что искровой разряд лейденской банки есть переменный ток, который совершает миллионы колебаний в секунду.

Следовательно, он является **током высокой частоты**.

**137. Получение колебаний от батареи высокого напряжения.** Дальнейшие исследования искрового разряда показали, что существенную роль в колебательном процессе играет *ёмкость* лейденской банки и *самоиндукция* соединительного провода (у лейденской банки таким соединительным проводом является разрядник, согнутый в дугу). Оказалось, что токи высокой частоты

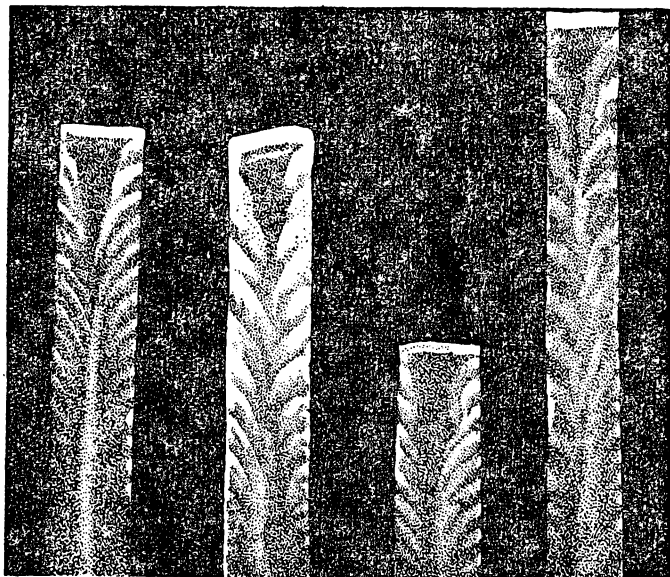


Рис. 172. Фотографии искр во вращающемся зеркале.

можно получить и без применения искры, лишь бы в цепь были включены ёмкость и самоиндукция. Один из способов получения переменного тока высокой частоты представлен на рис. 173.  $B$ —батарея из большого числа элементов ( $\text{ЭДС} \approx 100$  вольт),  $C$ —конденсатор (ёмкостью в несколько сотен сантиметров),  $L$ —катушка, состоящая из нескольких витков проволоки,  $K$ —переключатель, замыкающий поочерёдно цепь батареи и цепь конденсатора с катушкой. Замкнём ключ на батарее: обкладки конденсатора получат от батареи разноимённые заряды. Перекинем ключ на правую сторону: конденсатор станет разряжаться, и возникнут колебания. После того как они прекратятся, мы перекинем ключ опять налево, чем замкнём батарею на конденсатор, он опять зарядится, перекинем направо — опять получим колебания и т. д. Конечно, этот способ менее удобен, чем искровой, так как всё время нужно действовать переключателем. Искра же заменяет автоматический переключатель. Она проскакивает как раз тогда, когда конденсатор зарядится до высокого напряжения, и угасает тогда, когда заряд истощится.

**138. Катодный осциллограф.** Колебания тока в цепи  $CKL$  (рис. 173) обнаруживаются при помощи особого прибора, называемого *катодным осциллографом* (рис. 174).

Он представляет собой трубку Крукса (§ 106), в которую вставлены следующие дополнительные детали: металлическая диафрагма  $D$  с круглым отверстием малого диаметра для получения узкого пучка катодных лучей, конденсатор  $C$ , состоящий из двух металлических пластинок, и экран  $E$ , покрытый сернистым цинком. Действие трубки основано на притяжении разноимённых зарядов и отталкивании одноимённых. Трубкой осциллографа пользуются так: соединяют катод  $K$  и анод  $A$  с источником высокого напряжения и получают благодаря диафрагме  $D$  узкий пучок катодных лучей, который падает на

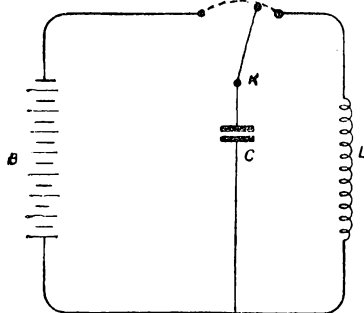


Рис. 173. Получение колебаний от батареи.

экран и даёт на нём светящуюся точку  $a$ . Если конденсатор  $C$  не заряжен, то светящаяся точка  $a$  получается как раз посредине экрана  $E$  (пучок катодных лучей ничем не отклонён). Теперь сообщим пластинкам конденсатора  $C$  разноимённые заря-

ды (например, верхнюю зарядим отрицательно, нижнюю — положительно), тотчас же заметим отклонение пучка в низ. Переменим знаки зарядов пластин — получим отклонение пучка в верх. Такое поведение пучка объясняется тем, что он представляет собой поток *электронов*, т. е. *отрицательных* зарядов.

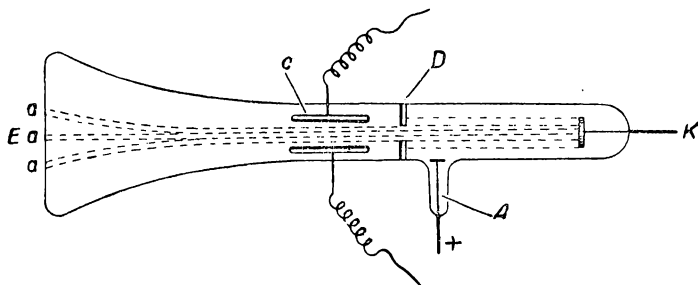


Рис. 174. Катодный осциллограф.

ды (например, верхнюю зарядим отрицательно, нижнюю — положительно), тотчас же заметим отклонение пучка в низ. Переменим знаки зарядов пластин — получим отклонение пучка в верх. Такое поведение пучка объясняется тем, что он представляет собой поток *электронов*, т. е. *отрицательных* зарядов.



Сделав конденсатор  $C$  частью цепи, показанной на рис. 173, например, включив его параллельно имеющемуся в цепи конденсатору, мы можем наблюдать колебания, возникающие в цепи  $LC$  при замыкании ключа  $K$  направо; вместо неподвижной светящейся точки  $a$  мы увидим светлую вертикальную полосу на экране  $E$ . Однако для обнаружения характера колебаний необходимо развернуть их во времени. Если, например, поставим вблизи экрана  $E$  зеркало и приведём его в быстрое вращение около вертикальной оси, то увидим картину колебаний, происходящих при разряде конденсатора (рис. 175).

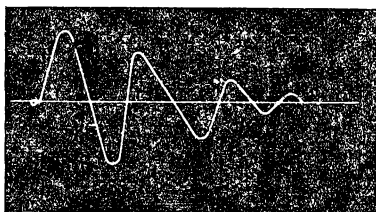


Рис. 175. Колебания тока при разряде конденсатора (затухающие колебания).

Пучок электронов в катодном осциллографе практически *лишён инерции*: он в точности повторяет колебания зарядов в цепи и притом без малейшего запаздания.

**139. Колебательный контур.** Из опыта, описанного в § 137, а также из многочисленных опытов с разрядом конденсаторов обнаруживается, что для получения токов высокой частоты необходимо составить цепь из последовательно соединённых конденсаторов ёмкости и катушки самоиндукции.

**Цепь, состоящая из ёмкости и самоиндукции, называется колебательным контуром.**

Схематически колебательный контур изображён на рис. 176.

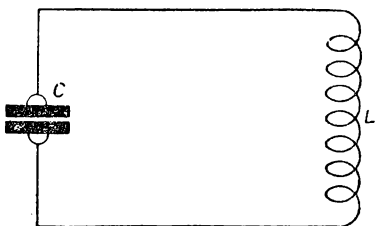


Рис. 176. Колебательный контур.  $C$  — конденсатор;  $L$  — катушка самоиндукции.

Объясним причину возникновения колебаний в таком контуре.

Допустим, что при замыкании ключом  $K$  конденсатора  $C$  на батарею  $B$  (рис. 173) мы сообщили верхней пластинке положительный заряд, нижней — отрицательный. Благодаря этому между пластинками конденсатора возникнет электриче-

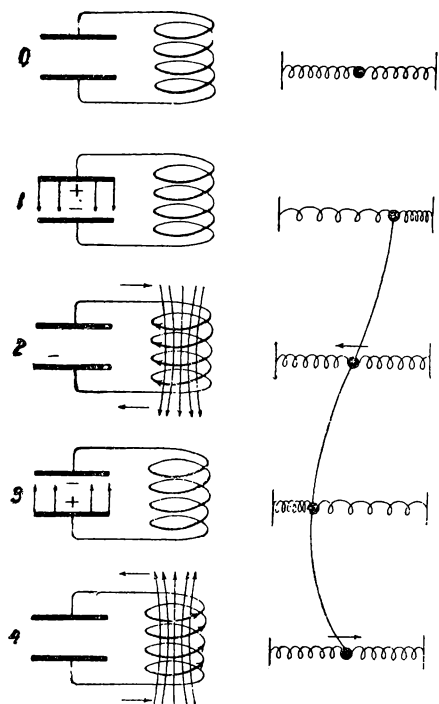


Рис. 177.

ское поле и конденсатор получит определённый запас потенциальной энергии от батареи. Теперь перекинем ключ  $K$  направо, благодаря чему замкнём конденсатор на катушку самоиндукции (рис. 177, 1); начинается разряд конденсатора, возникает разрядный ток.

Вследствие самоиндукции катушки, разрядный ток не сразу достигает своей наибольшей величины (§ 114).

Разрядный ток сопровождается возникновением магнитного поля в катушке (рис. 177, 2). По мере уменьшения разности потенциалов на пластинках конденсатора электрическая энергия его уменьшается, а энергия магнитного поля тока в катушке увеличивается.

**Энергия электрического поля переходит в энергию магнитного поля.**

Рисунок (177, 2) показывает момент, когда конденсатор разрядился, а магнитное поле тока достигло наибольшей напряжённости.

В дальнейшем начинается исчезновение магнитного поля. Но изменение магнитного поля вызывает по закону Фарадея ЭДС индукции. По правилу Ленца, направление её таково, что ЭДС индукции будет препятствовать исчезновению поля, а потому в контуре удержится ток прежнего направления (указанного стрелкой на рис. 177, 2), несмотря на то, что конденсатор разряжен. Электроны будут продолжать свой переход с нижней пластинки на верхнюю, пока не исчезнет магнитное поле катушки; в этот

момент конденсатор окажется заряженным вновь, но знаки зарядов будут обратные: верхняя пластинка зарядится отрицательно, нижняя — положительно (рис. 177, 3).

**Энергия магнитного поля переходит в энергию электрического поля.**

Затем конденсатор вновь разряжается, вновь возникают ток и магнитное поле, но уже обратного направления (рис. 177, 4), конденсатор вновь перезаряжается и т. д. — процесс повторяется многократно. Нужно иметь в виду, что весь процесс колебания занимает во времени лишь ничтожную долю секунды.

Колебанию подвержен как вектор электрической напряжённости (в поле конденсатора), так и *магнитный* вектор (в поле катушки). Одновременное колебание электрического и магнитного полей называется *электромагнитным колебанием*.

Некоторую аналогию с колебательным разрядом конденсатора представляют собой колебания шарика, укрепленного посередине упругой пружины (см. правую часть рис. 177).

Положение шарика посередине соответствует незаряженному конденсатору (самый верхний рисунок).

Шарик оттянут рукой к правому концу, отчего он приобрёл потенциальную энергию — это положение соответствует зарядке конденсатора (рис. 1 правой части).

Шарик отпущен, его потенциальная энергия начинает переходить в кинетическую — шарик пришёл в движение и достиг средней точки — это положение соответствует моменту полного разряда конденсатора (рис. 2).

Шарик, продолжая двигаться, достигает левой крайней точки, причём его кинетическая энергия вновь переходит в потенциальную энергию сжатой пружины — это положение соответствует перезаряженному конденсатору (рис. 3).

Шарик движется вправо и достигает вновь средней точки — это положение соответствует разряду конденсатора током обратного направления и т. д.

Такую же аналогию дают и колебания обычного маятника: и в нём повторно и многократно происходит превращение потенциальной энергии в кинетическую и обратно, что является характерным для гармонических колебаний.

Однако все механические аналогии далеко не полны: в электрической цепи мы имеем колебания не только электрического поля, но также и магнитного.

**140. Период колебаний.** Только что описанные электромагнитные колебания в контуре являются образчиком *гармонических* колебаний (см. часть II „Курса физики“ для IX класса).

*Время, в течение которого происходит одно колебание, называется периодом полного колебания.*

Период обозначается буквой  $T$ .

Большое значение представляет также другая величина — частота колебаний (обозначается буквой  $\nu$ ).

*Частотой колебаний называется число, показывающее, сколько полных колебаний совершается в 1 секунду.*

Величины  $\nu$  и  $T$ , очевидно, обратны друг другу, т. е.

$$T = \frac{1}{\nu} \text{ и } \nu = \frac{1}{T}.$$

В радиотехнических установках  $T$  обычно представляет собой ничтожную долю секунды (например,  $T = 0,000\ 001$ ), а  $\nu$  — очень большое число ( $\nu = 1\ 000\ 000$ ).

От чего зависит период колебаний  $T$ ?

Прежде всего от быстроты, с которой разряжается и заряжается конденсатор. Следовательно, первая причина, влияющая на период, будет ёмкость конденсатора.

Вторая причина лежит в соединительном проводе, по которому течёт колебательный ток.

Вспомним одно из свойств проводника, состоящее в том, что электрический ток при замыкании рубильника возникает не моментально, а нарастает постепенно и, спустя лишь некоторый (правда, небольшой) промежуток времени, достигает, наконец, своей максимальной величины. Причиной постепенности нарастания и убывания тока служит возникновение и исчезновение магнитного поля вокруг проводника.

Следовательно, вторая величина, влияющая на период электромагнитных колебаний, будет с а м о и н д у к ц и я включённого проводника (катушки).

Итак, *большой ёмкости конденсатора и самоиндукции катушки, составляющих цепь колебательного контура, соответствуют больший период  $T$  и меньшая частота  $\nu$ , возникающих в контуре колебаний.*

Точная зависимость периода от ёмкости и самоиндукции выражается следующей формулой Томсона:

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

где  $T$  — период в секундах,  $L$  — самоиндукция, выраженная в особых единицах — **генри**<sup>1)</sup>, а  $C$  — ёмкость в **фарадах**. По внешнему виду фор-

1) Г е н р и — самоиндукция такого проводника (катушки), в котором при изменении тока со скоростью  $1 \frac{a}{сек}$  индуктируется ЭДС самоиндукции, равная 1 вольту.

мула Томсона несколько напоминает формулу маятника (тс же  $2\pi$  и квадратный корень).

Изменяя ёмкость и самоиндукцию, можно получить колебания любой частоты.

Если взять конденсатор очень большой ёмкости (в несколько десятков микрофард) и катушку, обладающую большой самоиндукцией (с железным сердечником и множеством витков), и возбуждать в таком контуре колебания (искрой или батареей высокого напряжения), то период их окажется относительно большим, например, 0,5 секунды, а частота весьма малой ( $\nu = 2$ ). Колебания такой низкой частоты возможно наблюдать и без осциллографа: если включить в цепь контура миллиамперметр, то стрелка его будет качаться в такт колебания тока, подобно маятнику.

Наблюдаемые при искровом разряде лейденской банки колебания имеют высокую частоту потому, что ёмкость банки очень мала, а соединительный провод (разрядник, согнутый в дугу), обладает ничтожной самоиндукцией.

**141. Затухающие и незатухающие колебания.** Исследуя график колебаний, полученный при помощи осциллографа при разряде конденсатора (рис. 175), мы замечаем, что амплитуды колебаний неодинаковы: они убывают со временем, колебания „затухают“. Они так и называются *затухающими колебаниями*, в отличие от колебаний переменного тока, даваемого альтернатором (§ 119), амплитуда которых не убывает и которые называются *незатухающими колебаниями*.

Затухание происходит оттого, что при колебаниях часть энергии переходит в другие виды, например в джоулево тепло. Чем больше омическое сопротивление цепи, тем больше потери и тем скорее прекратятся колебания; при ничтожном сопротивлении

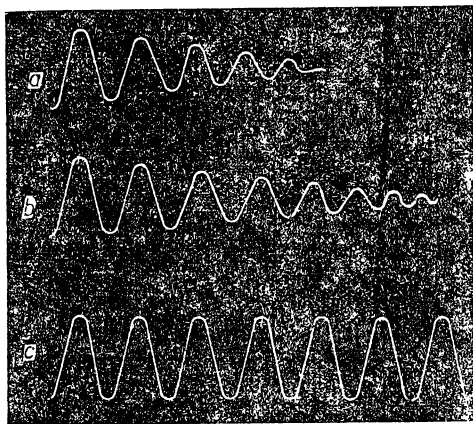


Рис. 178. Графики колебаний:

*a* — сильно затухающие колебания; *b* — слабо затухающие; *c* — незатухающие колебания.

колебания тока затухнут нескоро. На рисунке 178 представлены графики колебательных токов с разным затуханием. В технике применяются главным образом незатухающие колебания.

**142. Излучение.** В случае закрытого, т. е. замкнутого, колебательного контура (рис. 173 и 176) изменение электрического и магнитного полей происходит внутри самого контура. Практически вся энергия электромагнитных колебаний в замкнутом контуре превращается в тепло. Но оказалось, что колебательную энергию контура можно передать в окружающее пространство, т. е. получить излучение. Для этого нужно было замкнутый контур превратить в открытый. И сделать это очень просто: например, рядом с катушкой  $L$  колебательного контура (рис. 179) поместить другую катушку  $L_1$ , а к концам

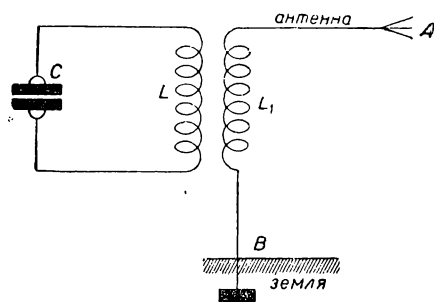


Рис. 179. Превращение „закрытого“ контура в „открытый“.

её присоединить два провода: один из них направить вверх или, ещё лучше, расположить горизонтально и окончить на некотором расстоянии в воздухе, а другой — направить вниз и припаять к металлическому листу, зарытому достаточно глубоко в землю.

Воздушный провод  $A$  называется *антенной*, а провод  $B$ , идущий в землю, — *заземлением*. Катушка  $L_1$  с антенной  $A$  и заземлением  $B$  называется *открытым колебательным контуром*. Провод  $A$  и поверхность земли играют роль „пластин“ своеобразного конденсатора. Электромагнитные колебания, возбуждённые в закрытом контуре  $LC$  (рис. 179), частью переходят в открытый (благодаря индукции), а затем энергия их *излучается в окружающее пространство* в виде переменных электрического и магнитного полей.

*Распространение в окружающем пространстве электрического и магнитного полей называется электромагнитным излучением.*

Свойством излучения открытый колебательный контур отличается от закрытого. Возбуждая колебательный контур (например, искровым разрядом мощного трансформатора), можем получить мощное излучение электромагнитной энергии в окружающее пространство в виде электромагнитных волн.

**143. Электромагнитные волны.** Познакомимся вкратце с механизмом того электромагнитного излучения, о котором было упомянуто в предыдущем параграфе. На электромагнитном излучении основана радиосвязь, изобретённая русским учёным А. С. Поповым<sup>1)</sup>.

Для большей наглядности представим себе, что открытый колебательный контур, дающий излучение, состоит из катушки самоиндукции  $L$  и очень длинных проволок  $A$  и  $B$  (рис. 180), обрывающихся в воздухе. Из них  $A$  соответствует антенне, а  $B$  — заземлению.

Измерения показывают, что при возбуждении колебаний тока в катушке  $L_1$  между проводами  $A$  и  $B$  возникает переменное электрическое поле, т. е. на всём протяжении оно имеет не одинаковую густоту и направление силовых линий, что и представлено на рисунке: например, в точках  $N$ ,  $Q$ ,  $S$ ,  $U$  напряжённость поля наибольшая (силовые линии расположены густо); при этом в точках  $N$  и  $S$  поле направлено вверх, а в точках  $Q$  и  $U$  — вниз. В точках  $M$ ,  $P$ ,  $R$ ,  $T$  поле отсутствует (здесь оно меняет направление). Для большей ясности этой картины в нижней части рисунка показан график изменения электрической напряжённости, т. е. густоты силовых линий. График представляет собой синусоиду, известную нам из теории гармо-



А. С. Попов.

<sup>1)</sup> Попов Александр Степанович (1859—1906) — знаменитый русский физик, изобретатель радиотелеграфа. Был преподавателем электротехники в минном классе в Кронштадте, а затем профессором и директором Электротехнического института в Петербурге. А. С. Попов первый установил возможность применения электромагнитных волн для передачи сигналов на расстоянии. Он построил первый в мире радиоприёмник с антенной и демонстрировал его на заседании Русского физико-химического общества 7 мая 1895 г. А. С. Попов применил свой приёмник для регистрации электромагнитных волн, возбуждаемых при грозовых разрядах, в силу чего дал приёмнику название грозоотметчика. Грозоотметчик реагировал на грозовые разряды, происходящие на расстоянии свыше 30 километров. В марте 1896 г. на заседании того же общества А. С. Попов демонстрировал телеграфирование словесного текста без проводов на расстоянии 250 метров. После этого А. С. Попов, внося различные усовершенствования в приёмник и передатчик, в част-

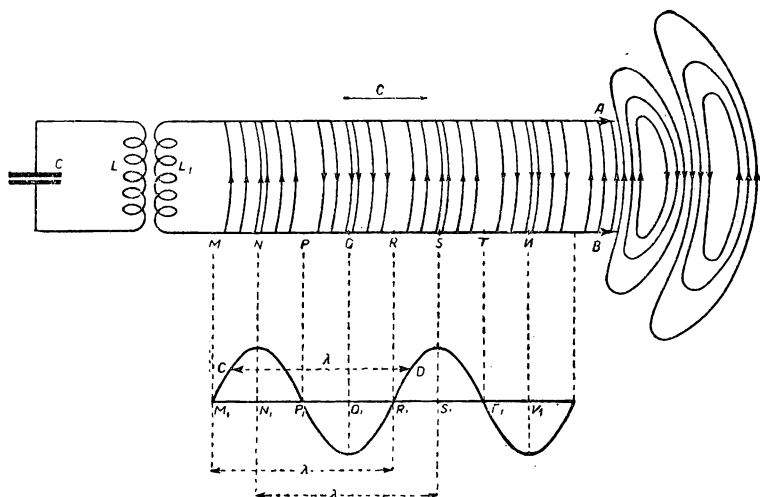


Рис. 180. Образование электромагнитных волн.

На рисунке показаны электрические силовые линии. Перпендикулярно им располагаются магнитные силовые линии (последние не показаны).

нических колебаний. В нашем примере вектор электрической напряжённости изменяется по синусоидальному закону. Важно отметить, что представленная на рисунке картина относится лишь к некоторому, произвольно выбранному моменту времени. Замечательно то, что эта картина, при наличии колебаний в цепи, передвигается вправо со скоростью света, т. е.  $300\,000 \frac{\text{км}}{\text{сек}}$ . Наш рисунок даёт, так сказать, моментальный снимок этой картины.

Дойдя до конца проводов, силовые линии, будучи в пределах проводов с виду незамкнутыми, по выходе из проводов замыкаются, как то и показано на рисунке в схематическом виде.

ности, впервые применив приём радиосигналов с помощью телефонной трубки на слух, систематически увеличивал дальность радиотелеграфирования. В 1899 году радиостанция А. С. Попова была применена для спасения броненосца, потерпевшего аварию; дальность радиопередачи достигла при этом свыше 40 километров. Приоритет А. С. Попова в изобретении радио пытался оспаривать итальянец Маркони, приступивший к опытам по радиотелеграфированию после Попова. Все свои устройства Маркони, в противоположность Попову, старательно засекречивал и никому не показывал. Но когда, наконец, он был вынужден их раскрыть, выяснилось, что они являются не чем иным, как повторением конструкции А. С. Попова, опубликованной ещё в 1895 году.



Энергия электрического поля частью излучается в окружающее пространство.

Но, кроме электрического поля, между проводниками  $A$  и  $B$  имеется ещё поле магнитное. Его силовые линии расположены в тех же местах, что и линии электрического поля, густота их также изменяется по синусоидальному закону, но направлено оно всегда перпендикулярно электрическому полю (на нашем рисунке магнитные линии не показаны). Двигается магнитное поле совместно с электрическим с той же скоростью света.

Совместное возникновение электрического и магнитного полей является законом природы. Ещё в прошлом столетии знаменитый физик Максвелл теоретически доказал, что при всяком изменении электрического поля всегда возникает и магнитное поле, причём электрический вектор и магнитный взаимно перпендикулярны.

Поэтому гармонические колебания полей, происходящие в открытом контуре, принято изображать в виде двух взаимноперпендикулярных синусоид. На рисунке 180а показаны эти синусоиды: вертикальная — даёт закон изменения электрического вектора; горизонтальная — магнитного. Вся картина движется, как и на рисунке 180, вправо.

Гармонические колебания полей — электрического и магнитного — передаются в окружающее пространство со скоростью света подобно тому, как гармоническое колебание воздушного давления передаётся в окружающий воздух со скоростью звука.

Подобно тому как чередующиеся сгущения и разрежения воздуха, проносящиеся в воздухе, образуют звуковые волны, так и чередующиеся сгущения и разрежения электромагнитного поля, проносящиеся в пространстве, образуют электромагнитные волны (радиоволны).

*Расстояние между ближайшими максимумами электрического или магнитного полей одинакового направления называется длиной электромагнитной волны.*

Таким образом, в нашем примере длина волны  $\lambda = NS$  (см. рис. 180).

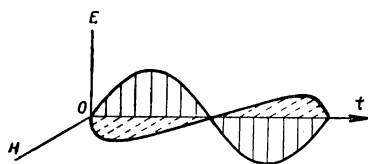
Вообще говоря, для измерения длины волны можно воспользоваться не только максимумами; можно, например, измерить расстояние  $M_1R_1$  или  $Q_1U_1$  (рис. 180) или  $CD$ . Нетрудно убедиться в том, что каждое из этих расстояний также равно  $\lambda$ .

Поэтому, вспоминая терминологию гармонических колебаний (курс IX класса), можем дать общее определение длины волны, как *расстояния между ближайшими точками, находящимися в одной и той же фазе колебания.*

Обозначим скорость распространения электромагнитных волн через  $c$  (скорость света), частоту колебаний попожнему через  $\nu$ . Так как в течение секунды мы выпустим число волн, равное  $\nu$ , и эти волны займут одна подле другой расстояние  $c$ , то имеем

$$c = \lambda \nu.$$

По этой формуле мы можем определить длину волны  $\lambda$ , когда нам дана частота колебаний  $\nu$ , так как скорость распространения волн  $c$  нам известна. Для



пустоты  $c = 300\,000 \frac{\text{км}}{\text{сек}}$ ; для воздуха она немного меньше, но для расчётов с достаточной степенью точности можно принять эту цифру и для воздуха.

Рис. 180а. Изображение электромагнитной волны (движется вправо).

**Пример 1.** Длина волны радиостанции равна 1000 м. Определить частоту переменного тока, которую даёт генератор этой станции.

Ответ:  $\nu = \frac{300\,000\,000}{1\,000} = 300\,000$  колебаний в секунду.

**Пример 2.** Переменный ток, который получается в динамомашинах городской станции, имеет 50 периодов в секунду. Если бы мы присоединили к динамомашине соответствующий колебательный контур и радиосеть, то получили бы своеобразную радиостанцию. Определить длину волны радиостанции.

Ответ:  $\lambda = \frac{300\,000}{50} = 6000$  км.

**144. Радиостанция.** Так как всякий переменный ток даёт колебания электрического и магнитного полей, то всякий переменный ток способен дать излучение. Но количество излучаемой энергии, как показал опыт, сильно зависит от частоты.

Так, обыкновенный переменный ток осветительной сети ( $\nu = 50$ ) является током низкой частоты, а потому мало способен к излучению. Это очень выгодно, так как техническая задача городского переменного тока состоит в передаче энергии по проводам.

Токи высокой частоты, наоборот, обладают сильным излучением, а потому и применяются на радиостанциях.

В общих чертах радиотелеграфная станция состоит из следующих частей:

1) прибора для получения токов высокой частоты (генератора);

- 2) колебательного контура;
  - 3) радиосети (антенны с заземлением).
- Схема станции дана на рисунке 181.

Опыт показал, что вместо двух можно употреблять одну катушку, т. е. антенну и землю присоединить прямо к колебательному контуру, — излучение происходит и в этом случае.

Генератор токов высокой частоты включается между точками *a* и *b*. Таким генератором, по примеру А. С. Попова, долгое время служил искровой прибор, затем вольтова дуга, динамомашина высокой частоты (изобретённая русским инженером Вологдиным); в настоящее время применяются почти исключительно катодные лампы, о которых речь впереди (§ 155).

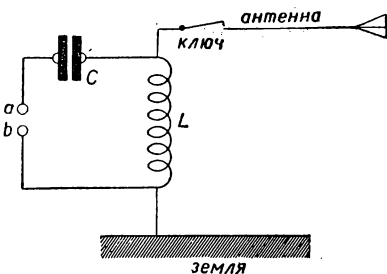


Рис. 181. Простейшая схема передающей радиотелеграфной станции.

В цепь антенны помещают телеграфный ключ, роль которого состоит в замыкании цепи на короткий и длинный промежуток времени. Замыкание на короткий срок ( $1/10$  секунды) даёт „точку“, на длинный ( $3/10$  секунды) — „тире“ телеграфной азбуки. За эти промежутки времени в пространство излучаются волны (рис. 181а).

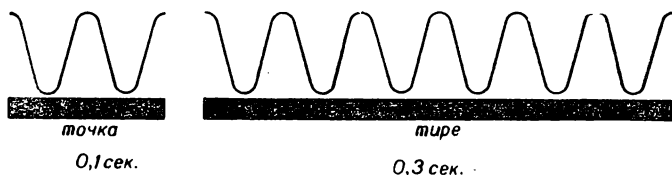


Рис. 181а. „Точка“ и „тире“ телеграфной азбуки.

**145. Резонанс.** Поместим рядом два приблизительно одинаковых колебательных контура, с одинаковыми катушками самоиндукции и с одинаковыми конденсаторами (рис. 182). В одном из них (левом) станем возбуждать электромагнитные колебания каким-нибудь из указанных ранее способов (искрой, дугой, машиной высокой частоты и пр.), в другой (правый) включим амперметр <sup>1)</sup>; конденсатор же возьмём с переменной

<sup>1)</sup> Для быстропеременных токов годится лишь тепловой амперметр.

ёмкостью, т. е. такой, в котором две серии пластин: одна серия пластин может вдвигаться в промежутки между пластинами другой серии (рис. 182а и рис. 32). Вдвинем пластины — ёмкость увеличится; выдвинем — уменьшится. Это свойство конденсатора отмечено на рисунке 182 косой стрелкой.

Плавно меняя при помощи переменного конденсатора ёмкость правого контура, заметим, наблюдая за амперметром, что сила

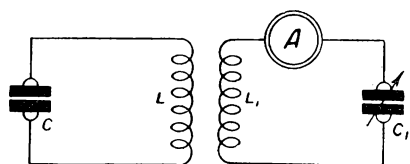


Рис. 182. При наступлении резонанса амперметр  $A$  даёт наибольшее показание.

тока в правом контуре не будет оставаться постоянной. При некотором определённом положении пластин правого конденсатора сила тока будет максимальной.

Когда правый контур при данной связи получает максимальное количество колебательной энергии, то говорят, что он настроен в резонанс с левым контуром. Чем дальше мы будем уходить от положения резонанса, тем меньше будем отвлекать энергии из левого контура; при далёком положении от резонанса колебания правого контура будут слабые. Резонанс получится в том случае, если в правом контуре мы возьмём такой же конденсатор, как и в левом, и катушку самоиндукции та-

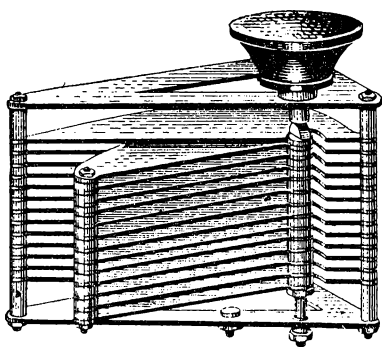


Рис. 182а. Конденсатор переменной ёмкости.

кую же, как и в левом контуре. Но мы можем в правом контуре взять катушку и иную, например с меньшим числом витков, и также получим явление резонанса, если соответственно увеличим ёмкость конденсатора в правом контуре. *Настройка в резонанс может быть произведена подгонкой ёмкости или самоиндукции.*

*Резонанс наступает тогда, когда период колебаний правого контура делается равным периоду колебаний левого.*

**146. Радиоприёмник.** Мощность радиостанций больших городов достигает десятков и сотен киловатт: значительное количество энергии рассеивается в виде электромагнитных волн

в окружающее пространство, поочерёдные сгущения электрического и магнитного полей разносятся по всему земному шару. Но если стоять даже вблизи радиостанции во время её работы, то и тогда без приборов нельзя обнаружить существования волн. Радиоволны не действуют ни на слух, ни на другие органы чувств. Для обнаружения радиоволн служит прибор — *радиоприёмник*.

В общих чертах — это колебательный контур, настроенный на длину входящей волны.

В предыдущем параграфе мы узнали, что при наличии связи часть колебательной энергии переходит из одного контура в другой. Опыт показал, что такой переход успешно совершается не только тогда, когда эти контуры находятся вблизи, т. е. когда имеют сильную связь, но и тогда, когда эти контуры находятся далеко (за несколько десятков, даже сотен километров), нужно лишь к передающему контуру и к принимающему присоединить радиосети, т. е. антенны и заземления.

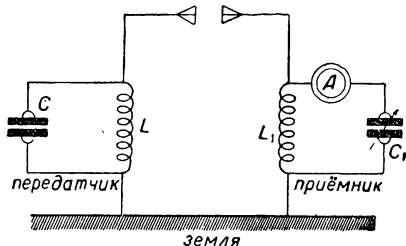


Рис. 183. Схема передатчика и приёмника.

Схема передачи энергии без проводов изображена на рисунке 183. Левый контур представляет собой передающую радиостанцию, правый — принимающую. Этот рисунок вполне напоминает опыт, изображённый на рисунке 182, только связь на рисунке 183 очень слабая, так как колебательные контуры удалены на значительное расстояние. Кроме того, грубый амперметр правого контура теперь должен быть заменён прибором высшей чувствительности (например, гальванометром с делениями на  $10^{-9}$  ампера), в левом же контуре нужно возбуждать мощные колебания. Тогда, изменяя ёмкость конденсатора  $C_1$ , мы достигнем того, что гальванометр покажет максимальный ток при определённом положении конденсатора  $C_1$ . Это будет положение резонанса. Если в антенну левого контура вставить телеграфный ключ, то можно, замыкая и размыкая ток, заставлять качаться стрелку приёмного прибора, т. е. давать условные знаки, соответствующие точкам и тире азбуки Морзе.

Левый контур тогда можно назвать *радиопередатчиком*, а правый контур — *радиоприёмником*.

Только что описанный радиоприёмник страдал бы, однако,

значительными неудобствами; кроме того, в нём нет перехода электромагнитных колебаний в звуковые, что имеет особое значение при радиотелефоне.

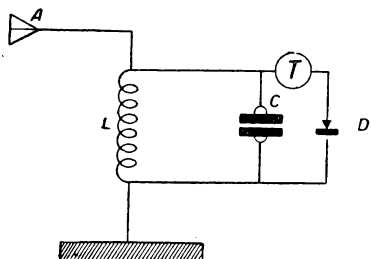


Рис. 184. Схема приёмника, применяемая на практике.

Поэтому на практике употребляют радиоприёмник, схема которого изображена на рисунке 184, а отдельные части — на рисунках 184а, б, в.

$L$  — катушка самоиндукции в 25—150 витков; в зависимости от длины волн принимаемой станции они бывают разных фазонов. Можно применять и катушки простого вида в несколько десятков витков (без железного сердечника).

$C$  — конденсатор переменной ёмкости (рис. 182а);

$T$  — телефон (рис. 184б);

$D$  — детектор (рис. 184в).

Телефон и детектор заменяют тепловой амперметр. Телефон является весьма чувствительным прибором для обнаружения переменных токов низкой частоты. Можно произвести такой опыт: включить телефон

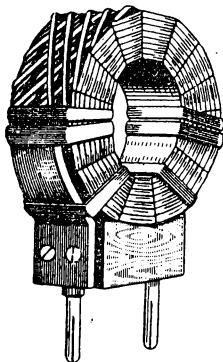


Рис. 184а. Одна из форм катушек самоиндукции („сотовая“).



Рис. 184б. Двухухий телефон.

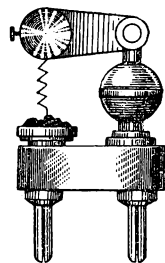


Рис. 184в. Детектор.

в осветительную сеть переменного тока последовательно с огромным сопротивлением, например в миллион омов<sup>1)</sup>; тогда

<sup>1)</sup> Такое сопротивление можно изготовить, зачернив карандашом узкую полоску бумаги. Непосредственно к полному напряжению 120 в телефон присоединить нельзя — сгорит обмотка или размагнитится сердечник.

через него пойдёт ничтожный ток, и всё же в телефоне довольно отчётливо будет слышен звук, соответствующий 50 колебаниям в секунду.

Звук произойдёт оттого, что магнетизм телефонного сердечника от переменного тока будет то усиливаться, то ослабевать. Следуя изменению магнетизма, железная мембрана придёт в колебание. Приложив телефон к уху, мы услышим низкий звук, соответствующий 50 колебаниям в секунду.

Не то получится, если в колебательном контуре (рис. 184) будет возбуждён переменный ток высокой (радио) частоты, например 1 000 000 раз в секунду.

Присоединив телефон по рисунку 184, но без детектора, мы никакого звука не услышим. Дело в том, что катушки те-

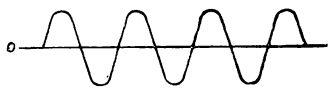


Рис. 185. Кривая переменного тока высокой частоты (синусоида).

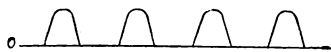


Рис. 185а. Кривая того же тока, „выпрямленного“ детектором.

лефона обладают специфическим „индукционным“ сопротивлением, которое особенно велико для токов высокой частоты (оно пропорционально частоте), а потому телефон может пропускать ток низкой частоты и не пропускает токи высокой частоты.

Кроме того, железная мембрана слишком инертна: она не поспевает за колебаниями тока 1 000 000 раз в секунду, да если бы она даже и колебалась с такой частотой, звука мы не услышали бы, так как наше ухо воспринимает такие звуковые колебания, которые происходят не чаще 30 000 раз в секунду.

**147. Детектор.** Прибор, назначение которого состоит в том, чтобы выпрямлять переменный ток, точнее говоря, превращать переменный ток в пульсирующий ток одного направления, называется детектором.

Детектор состоит из кристалла железной руды (пирита  $\text{FeS}_2$ ), или свинцового блеска —  $\text{PbS}$ , на которой слегка надавливает кончик металлической спиральной проволоки (обычно никелиновой)<sup>1)</sup>.

Опыт показал, что такой контакт обладает способностью пропускать слабый переменный ток любой частоты лишь в одном

<sup>1)</sup> В последнее время изготавливаются детекторы с постоянным контактом, например карборундовый детектор (железо и карборунд —  $\text{CSi}$ , купроксный ( $\text{Cu}$  и  $\text{CuO}$ ). Эти детекторы действуют надёжнее, чем с проволочкой.

направлении. От синусоиды детектор как бы отрезает одну половину (например, нижнюю, рис. 185 и 185а). Подобная же картина получится при приёме затухающих колебаний, что видно из рисунков 186—188.

Детектор превращает затухающие колебания в колебания низкой частоты, слышимые в телефоне. Ход этого превращения

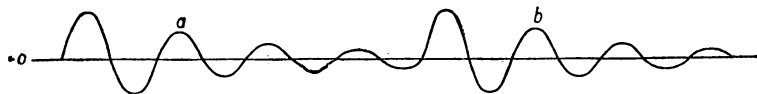


Рис. 186. Затухающие колебания, полученные приёмником.

и виден на упомянутых рисунках. Благодаря детектору, в телефоне мы слышим колебания низкой частоты, которые получаются оттого, что серии колебаний *a* и *b* сливаются каждая в одно колебание, ибо при помощи детектора мы получаем ток одного направления, который притягивает мембрану лишь в одну сторону.

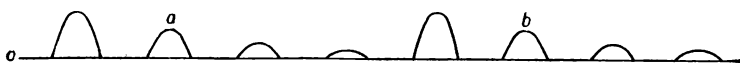


Рис. 187. Те же колебания, „выпрямленные“ детектором.

Из сказанного следует, что при помощи телефона с детектором мы превращаем электрическую энергию тока высокой частоты, полученную приёмником, в энергию звуковую. При помощи телефона мы „слышим“ радиопередачи. Ещё сохранился штат радиотелеграфистов „слухачей“, которые напрактиковались



Рис. 188. Колебания, слышимые в телефоне.

в чрезвычайно быстром чтении на слух радиотелеграмм. Есть теперь уже аппараты, автоматически записывающие принятые знаки азбуки Морзе. Существуют и автоматические передатчики. Быстрота передачи и записи азбуки Морзе подобными аппаратами огромна. Есть автоматы, которые печатают не знаки Морзе, а прямо буквы.



**148. Радиотелефон.** Преимущество незатухающих колебаний состоит в том, что в них можно „вплести“ любые звуки, в том числе и человеческую речь, т. е. устроить радиотелефон.

Для передачи звуков нужно вместо телеграфного ключа поместить в антенну микрофон: получится простейший радиотелефонный передатчик. Схема такого радиотелефонного передатчика изображена на рисунке 189 ( $M$  обозначает микрофон)<sup>1)</sup>.

Каково же действие микрофона? Угольный микрофон, как известно, представляет собой угольную колодку, наполненную угольным порошком, на который нажимает угольная мембрана. Если микрофон

включён в антенну и перед ним не производят звуков, то в антенне получается ряд незатухающих колебаний с одинаковой амплитудой (рис. 190, I).

Рис. 190, I. Колебательный ток в антенне без модуляции.

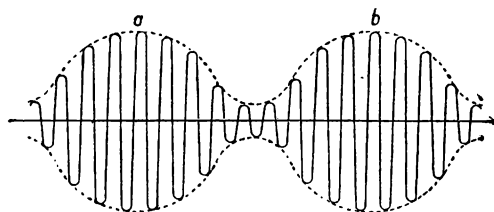


Рис. 190, II. Колебания в антенне при модуляции.

освобождать; сопротивление микрофона будет то уменьшаться, то увеличиваться от звуковых колебаний,

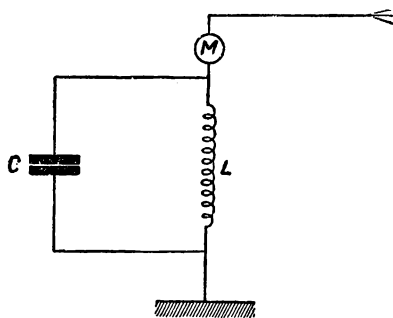


Рис. 189. Схема радиотелефонной станции.

Амплитуда их невелика, так как микрофон обладает значительным сопротивлением. Станем произносить слова перед микрофоном. В такт звуковым колебаниям начнёт колебаться мембрана, при этом она будет то нажимать на порошок, то снова его

<sup>1)</sup> В радиопередатчиках большей мощности микрофон включается значительно более сложным способом.

и — по закону Ома — сила тока также будет изменяться. Группы волн *a*, *b* рисунка 190, II будут соответствовать отдельным звуковым колебаниям. На рисунке 190, II изображены два звуковых колебания. Если они соответствуют ноте „ля“, то на протяжении 1 секунды расположится 435 звуковых колебаний.

Таким образом, микрофон, включённый в антенну, играет роль своеобразного реостата, который меняет силу переменного

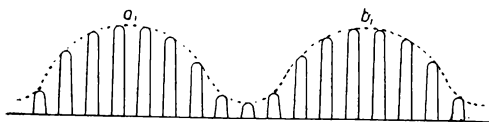


Рис. 190, III. Действие детектора.

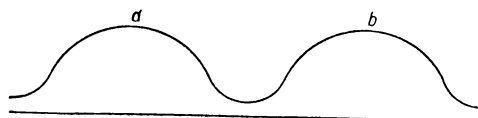


Рис. 190, IV. Колебания мембраны телефона.

тока высокой частоты в такт звуковым колебаниям. Наложение на высокую частоту низкой частоты называется *модуляцией*. Благодаря модуляции в пространство будут излучаться волны неодинаковой амплитуды. Дойдя до радиоприёмника, эти волны возбуждают в нём переменный ток такого же вида, как изображённый на рисунке 190, II. Детектор погасит одну из половин, и в телефоне получится лишь пульсирующий ток (рис. 190, III); так как он будет иметь одно направление, то пульсации, складываясь вместе, дадут редкие (звуковые) колебания мембраны (рис. 190, IV). Частота и характер этих колебаний будут соответствовать звуку, произнесённому перед микрофоном радиопередатчика. Получится приём, аналогичный приёму затухающих колебаний.

Чрезвычайно слабые токи, возникающие в радиоприёмниках, могут быть усилены в миллионы раз при помощи катодных ламп. Действие катодных ламп будет объяснено в следующих параграфах. При наличии усиления, вместо телефона включается репродуктор. Это — тот же телефон, но более совершенного устройства.

**149. Простейший радиопередатчик.** Искра как генератор токов высокой частоты отжила свой век; искровых передатчиков теперь уже не строят, но в физических кабинетах они могут ещё иметь применение для демонстрации электромагнитного излучения.

Опишем этот простой прибор (рис. 191).

Он состоит из колебательного контура *LC* (катушка в несколько десятков витков звонковой проволоки и конденсатор из нескольких листов оловянной фольги с прослойкой из слюды или парафинированной бумаги), *L*<sub>1</sub> — катушка связи с антенной *A* и заземлением *Z*. Антенна — комнатная — кусок проволоки в несколько метров, протянутой под

потолком; заземление  $Z$  — проволока, соединённая с водопроводной трубой или металлическим стержнем, вбитым в землю; искровой промежуток соединён с полюсами катушки Румкорфа любого типа, лишь бы она давала искру<sup>1)</sup>.

В соседней комнате можно установить детекторный приёмник (рис. 184) и при помощи телефона легко обнаружить на слух возникновение затухающих колебаний в нашем радиопередатчике.

Значительно большим излучением обладает предложенный автором этой главы тоже весьма простой прибор — электролитический генератор. Он изображён на рисунке 191а и состоит из банки с 25-процентным раствором серной кислоты, в которую опущены два электрода: положительный — в виде свинцовой пластины и отрицательный — в виде тонкой платиновой проволоочки, которая погружена в жидкость лишь самым кончиком<sup>2)</sup>. Установка присоединяется к источнику постоянного или выпрямленного тока напряжением в 100—200 В.

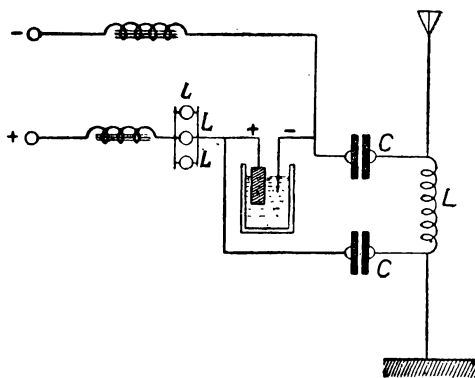


Рис. 191а. Схема электролитического генератора.

деление пузырьков водорода. Лампы горят почти полным накалом, так как сопротивление сосуда невелико. Но и в сосуде никаких явлений не происходит, кроме обычного электролиза. Вкручиваем теперь мощ-

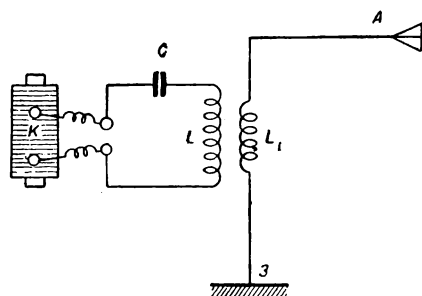


Рис. 191. Схема искрового передатчика.

В качестве реостата берём три лампы, соединённых параллельно: две из них по 25 W, а одна на 100 W. В начале цепи помещены дроссели, т. е. катушки с железными сердечниками, служащие для того, чтобы не пропускать токов высокой частоты обратно в сеть. Платиновая проволока отрицательного электрода употребляется диаметром в 0,25 мм, в кислоту погружена часть её (в 3—5 мм). Замыкаем цепь ввинчиванием в патроны двух ламп. После этого замечаем на платиновой проволоке спокойное вы-

1) Если искра получается от мощного прибора, например большой катушки Румкорфа, то вместо слюдяного следует применить воздушный конденсатор (рис. 182а).

2) Проволочка из другого металла быстро срабатывается.

ную лампу на 100 W; возникает яркое сияние катода; он сильно нагревается и может быть испорчен. Быстро вывинчиваем теперь мощную лампу, чем уменьшаем ток до малых размеров; сияние не прекращается, хотя не носит теперь бурного характера, так как сила тока делается незначительной — около 0,1 А, что видно и по лампам в реостате: они едва накалены. Тогда и наступает генерация<sup>1)</sup>. Колебательный контур составляем по схеме рисунка, причём катушку  $L$  лучше взять небольшо-

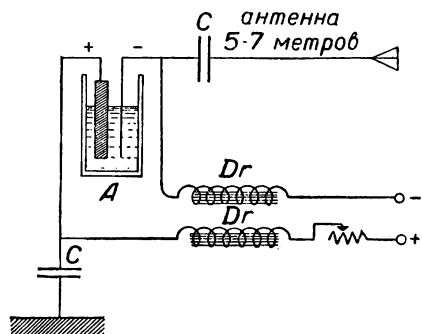


Рис. 1916. Упрощенный генератор.

место телефона включаем гальванометр или миллиамперметр. При силе тока в генераторе около 0,2 А мы получаем в приёмнике более 1 мА (миллиампера); такой ток можно продемонстрировать и грубым прибором. Можно сделать упрощение в колебательной цепи — удалить катушку самоиндукции и удовольствоваться лишь конденсатором, антенной и заземлением. Таким образом, схема электролитического генератора будет иметь вид, изображённый на рисунке 1916.

**150. Лабораторная работа № 5а. Сборка и настройка радиоприёмника.** Устанавливаем комнатный передатчик в лаборатории или в соседней комнате. Для этой цели может послужить прибор, собранный по рисункам 191 или 191а. В качестве катушки самоиндукции употребляем 7 витков звонковой проволоки. Диаметр такой „катушки“  $d = 5$  см. Антенна — комнатная под потолком, длиной 5—7 м, заземление — газовая или водопроводная труба, или медная проволока, протянутая вдоль стен на уровне столов.

Приборы: 1) конденсатор переменной ёмкости; 2) катушка самоиндукции в 7 витков звонковой проволоки; 3) телефон; 4) детектор; 5) кусок звонковой проволоки для заземления. Все части удобно иметь смонтированными на отдельных дощечках с гнездами и клеммами.

Ход работ: 1. Собрать детекторный радиоприёмник по схеме рисунка 184. Заземление присоединить к водопроводной трубе или к проволоке, протянутой вдоль стены на уровне столов. Антенны можно не присоединять.

2. Надеть на уши телефон и, двигая кончиком детекторной спиральки по кристаллу, найти „чувствительную“ точку (будет слышен шорох генератора).

1) Явление, аналогичное вольтовой дуге.

2) Ёмкость их равна 300—500 см.

3. Поворачивая рукоятку конденсатора, наблюдать усиление звука.

4. Ответить на вопросы:

Почему максимум звука слышен лишь при определённом положении конденсатора?

Для чего служит детектор?

Почему в телефоне слышен шорох?

**151. Электронная лампа.** Со второго десятилетия XX в. радиотехника стала быстро развиваться благодаря изобретению электронной, иначе катодной лампы.

Возьмём пустотную трубку<sup>1)</sup> со впаянными в неё двумя электродами: катодом  $K$  (рис. 192) — в виде тонкой вольфрамовой нити и анодом  $A$  — в виде металлической пластинки. Включим катод и анод в цепь батареи на несколько десятков вольт последовательно с миллиамперметром: мы не обнаружим никакого тока, если нить катода — холодная (сопротивление пустотной трубки очень велико).

Накалим катод, присоединив к нему специальную батарею накала в несколько вольт: сразу же обнаружим возникновение тока по миллиамперметру  $MA$ . Ток будет расти по мере выключения реостата  $R$  и повышения температуры нити до некоторого предела. Это открытие, сделанное Эдисоном, исследованное Флеммингом и другими физиками, привело к следующему заключению: накалившаяся металлическая нить испускает электроны, которые притягиваются заряженным анодом и несутся в пустотной трубке от катода к аноду с огромными скоростями, достигающими до нескольких тысяч километров в секунду, в зависимости от степени разрежения и потенциала анода.

Возникающий при этом эмиссионный ток (поток электронов) используется в радиотехнике. Только что описанная катодная лампа с двумя электродами (иначе: диод, кенотрон) получила применение для выпрямления переменного тока.

Опишем, как происходит выпрямление.

Соберём схему по рисунку 192а. Схема состоит из двух-электродной катодной лампы;  $B_n$  — батареи из двух аккумуляторов для накала нити;  $R$  — реостата накала;  $MA$  — миллиам-

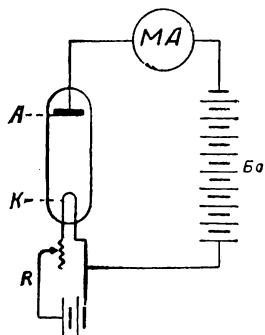


Рис. 192. Получение эмиссионного тока.

<sup>1)</sup> Так называется трубка, из которой удалён почти весь воздух.

перметра для постоянного тока;  $Ш_m$  — штепсельной розетки осветительной сети переменного тока, находящейся под напряжением 120 V. Зажигаем электронную лампу поворачиванием

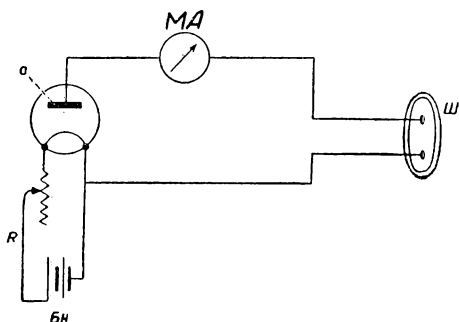


Рис. 192а. Электронная лампа как выпрямитель.

рукоятки реостата  $R$ , вставляем концы анодной цепи в гнездо штепсельной розетки  $Ш_m$  переменного тока и замечаем, что стрелка миллиамперметра  $МА$  отклонится на некоторый угол и покажет ток в несколько миллиампер. Этот ток будет иметь одно направление: иначе миллиамперметр не отклонился бы, так как он не способен показывать тока переменного (мы взяли не

тепловой прибор, а прибор с вращающейся катушкой). Таким образом, электронная лампа „выпрямляет“ ток подобно детектору: вместо переменного получится пульсирующий ток.

**152. Трёхэлектродная электронная лампа (триод).** Дальнейшее усовершенствование электронной лампы заключалось в том, что в неё был вставлен ещё третий электрод — так называемая „сетка“.

(Обычно „сетка“ имеет вид проволочной спирали.) Такая трёхэлектродная лампа, иначе — *триод*, получила широкое применение и как усилитель и как генератор электромагнитных колебаний высокой частоты. Схематическое изображение трёхэлектродной лампы дано на рисунке 192б:  $a$  — анод;  $n$  — нить накала;  $c$  — сетка.

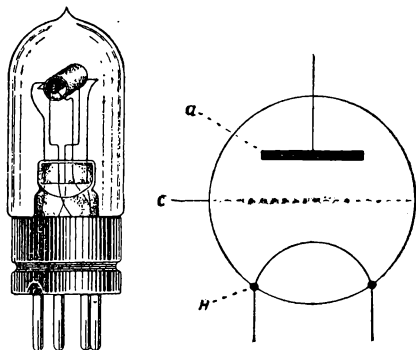


Рис. 192б. Общепринятая схема изображения трёхэлектродной электронной лампы и общий вид катодной лампы.

**153. Электронная лампа как усилитель колебаний.** Соберём схему по рисунку 192в. В цепь анода мы включаем батарею элементов или аккумуляторов на несколько десятков вольт ( $B_a$ ),

а в цепь сетки — батарею  $B_c$  из двух элементов и ключ  $K$ ,  $B_n$  — батарея накала.

Повернув рукоятку реостата  $R$ , включим батарею  $B_n$ ; нить накалится, станет испускать электроны, в цепи анода возникнет эмиссионный ток, что будет заметно по показанию миллиамперметра  $MA$ . Начнём теперь замыкать и размыкать цепь сетки при помощи ключа  $K$ : стрелка миллиамперметра  $MA$  придёт в колебание. Это произойдёт оттого, что при замыкании и размыкании цепи мы изменяем потенциал сетки, а вместе с тем — силу анодного тока. Допустим, например, что мы наложили на сетку положительный потенциал; тогда анодный ток усилится, так как сетка будет помогать аноду, притягивая из нити большее число электронов.

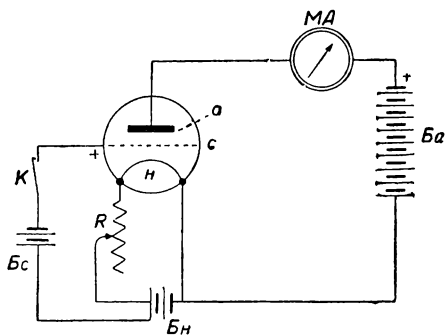


Рис. 192в.

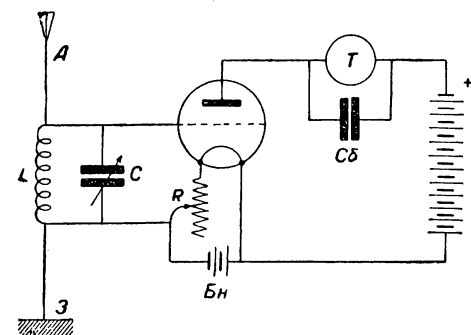


Рис. 193. Электронная лампа как усилитель колебаний.

Таким образом, колебания потенциала сетки создают колебания анодного тока. При этом последние получают в сильно увеличенном виде по сравнению с колебаниями сеточного тока. Поэтому трёхэлектродная лампа и применяется для усиления слабых колебаний тока в радиоприёмнике. Это делается по схеме рисунка 193: роль батареи  $B_c$  здесь играет колебательный контур, настроенный на проходящие волны.  $C_b$  — блокировочный конденсатор, служит для пропускания токов высокой частоты;  $T$  — телефон для обнаружения колебаний низкой (звуковой)

частоты. Применяя несколько ламп, можно устроить из них „каскад“, т. е. несколько ступеней, и достигнуть усиления в огромное число раз.

**154. Простейший одноламповый приёмник.** На рисунке 194 дана схема однолампового приёмника. Колебательный контур состоит из катушки самоиндукции  $L$  и конденсатора  $C$  переменной ёмкости. Контур включён в цепь сетки, телефон  $T$  — в анодную цепь. Колебания, принятые контуром  $LC$ , накладываются на сетку и передаются в цепь анода в выпрямленном и усиленном виде. Следовательно, электронная лампа в приёмнике является одновременно и детектором и услителем. Конденсатор  $C_1$  постоянной ёмкости в 200—300 см

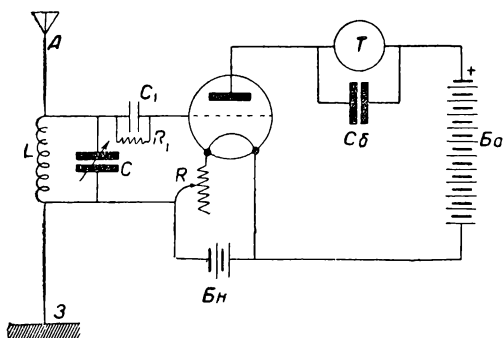


Рис. 194. Схема однолампового приёмника.

и большое сопротивление  $R_1$  (в несколько миллионов омов) составляет необходимую деталь лампового приёмника. Эта деталь называется *гридликом*. Остановимся на действии гридлика.

Допустим, что в некоторый момент левая пластинка конденсатора  $C_1$  в процессе колебаний контура зарядится положительно, тогда правая пластинка зарядится отрицательно (вспомним, что ближайший конец проводника вследствие индукции (§ 20) заряжается разноимённо), сетка же — положительно (отдалённый конец). Положительный заряд сетки увеличит анодный ток; часть электронов, испускаемых нитью, попадает на сетку и нейтрализует её положительный заряд. Оставшиеся в правой пластине отрицательные заряды через малый промежуток времени распространяются по всему стержню, попадут на сетку и положат начало накоплению отрицательных зарядов на ней. Они не будут нейтрализованы, так как электроны, летящие от нити, способны нейтрализовать лишь положительные заряды. С каждым колебанием тока в цепи сетки откладывается на сетку некоторое количество отрицательных зарядов.

Накопившись в значительном количестве, они могут ослабить, даже совсем прекратить эмиссионный ток, так как отрицательно заряженная сетка не пропустит к аноду летящих с нити электронов, а оттолкнёт их обратно в нить. Сопротивление  $R_1$ , назы-



ваемое „утечкой сетки“, и служит для постепенного отвода в землю накопившихся на сетке отрицательных зарядов. Благодаря этому эмиссионный ток не ослабляется, и лампа работает нормально.

**155. Электронная лампа как генератор.** Простейшая схема лампового генератора радиоволн представлена на рисунке 195. Колебательный контур  $LC$  включён в цепь анода. В цепь сетки включена катушка  $L_1$ , которая помещается вблизи катушки  $L$ . Таким образом, между обеими цепями устанавливается связь.  $B_a$  — батарея элементов или другой источник постоянного тока высокого напряжения;  $B_n$  — батарея накала.

Возникновение колебаний объясняется в общих чертах следующим образом. Допустим, что от какого-нибудь толчка (например замыкание цепи) возникло первое колебание в контуре  $LC$  анодной цепи. Естественно, что это колебание благодаря связи катушек  $L$  и  $L_1$  передаётся цепи сетки вследствие индукции.

Слабое колебание сетки обратно воздействует через лампу на цепь анода и усилит колебания контура  $LC$  на основании известного свойства электронной лампы как усилителя. Это усиление вызовет в свою очередь ещё большее возбуждение катушки  $L_1$ , а следовательно, ещё большую амплитуду колебаний анодного контура  $LC$  (явление несколько напоминает самовозбуждение динамомашин). Регулируя связь между катушками  $L$  и  $L_1$ , мы можем сильно „раскачать“ контур  $LC$ . Получатся незатухающие колебания, которые всё время будут поддерживаться автоматическими толчками сеточного контура  $L_1$ .

Присоединив к контуру  $LC$  антенну и землю, т. е. сделав его открытым, мы получим электромагнитные волны в окружающем пространстве. С одинаковым успехом получаются колебания любой частоты, начиная от весьма высокой (например  $\nu = 10^9$ ) до весьма низкой (например  $\nu = 10$ ), в зависимости от того, какой колебательный контур  $LC$  мы присоединим к лампе.

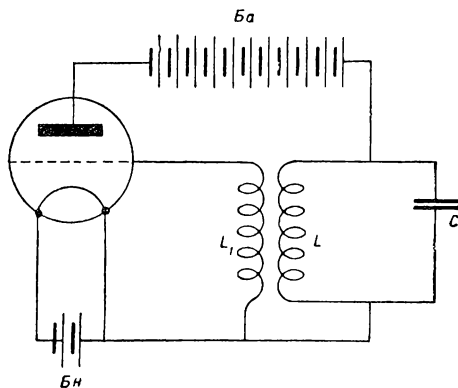


Рис. 195. Простейшая схема однолампового генератора.

Генерацию можно получить от любой электронной лампы, в том числе и от маленькой лампочки радиоприёмника. Мощность последней невелика. Значительная мощность широкоэмиттерных станций достигается применением ламп больших размеров — на несколько десятков, даже сотен киловатт. Поток электронов, выбрасываемых катодом в сторону анода, настолько силен в этих лампах, что анод при работе лампы ударами электронов разогревается докрасна, несмотря на то, что его охлаждают током воды.

На радиостанциях в цепи анода применяется высокое напряжение постоянного тока. Последний получается из переменного путём выпрямления электронными лампами с двумя электродами (сетка не нужна). Такие выпрямительные лампы строятся также на значительную мощность. Они называются *кентронами*.

**156. Короткие волны.** За последнее время в технике связи приобрели особое значение короткие электромагнитные волны,

длина которых заключена приблизительно между 10 и 150 м, что соответствует частотам от  $3 \cdot 10^7$  до  $2 \cdot 10^6$  колебаний в секунду. Один из наиболее замечательных фактов, установленных при наблюдениях над короткими волнами, — их весьма большая дальность действия при затрате малой мощности. Связь между континентами Европы и Америки устанавливается на коротких волнах при затрате мощности в несколько десятков ватт, но нередки случаи, когда удавалось установить связь через Атлантический океан при мощности излучения всего лишь в 2W.

Второе замечательное свойство коротких волн состоит в том, что их можно пустить по одному заданному направлению, подобно

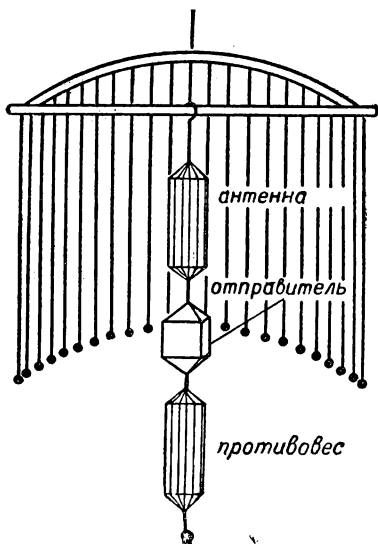


Рис. 196. Радиопрожектор.

пучку лучей прожектора. На рисунке 196 представлена схема радиопрожектора; во впадине параболического „зеркала“, в качестве которого служат параллельные проволоки, отстоящие друг от друга на несколько десятков сантиметров, помещается передатчик с длиной волны всего лишь в 10 м. Вместо антенны и

заземления употреблены два пучка параллельных проводов, образующих открытый колебательный контур.

Приём волн возможен только в направлении отверстия зеркала.

Опыты с короткими волнами производятся многими физиками и радиолюбителями всех стран. Впервые короткие электромагнитные волны были получены Герцем ещё в 1887 г. Для этой цели он употреблял колебательный контур, состоящий из двух стержней одинаковой длины; стержни оканчивались шариками, между которыми проскакивала искра (рис. 197). Такое устройство, называемое „диполем Герца“, обладает некоторой ёмкостью и самоиндукцией, хотя и не имеет специального конденсатора малой ёмкости и катушки: сами шарики и стержни образуют обкладки конденсатора малой ёмкости и, кроме того, обладают малой самоиндукцией, а так как контур получается открытый (стержни имеют незамкнутые концы), то при пропускании между шариками искр Герцу и удалось получить электромагнитное излучение.



Герц (1857—1894).

Длина волны при опытах Герца оказалась равной удвоенной длине обоих стержней. Таким образом, если возьмём стержни по 1 м, то получим длину волны в 4 м.

Продолжая опыты Герца, проф. П. Н. Лебедев получил электромагнитные волны длиной лишь в несколько миллиметров <sup>1)</sup>.

Для устройства такого „генератора“ ему пришлось взять колебательный контур, состоящий лишь из двух кусочков платиновой проволоки в несколько миллиметров длиной.



Рис. 197. Диполь Герца.

В настоящее время получены электромагнитные волны и ещё более короткие.

Волны длиной в несколько сантиметров можно получить при помощи электронных ламп.

<sup>1)</sup> Позднее физики Аркадьев и Глаголева-Аркадьева в Москве получили и ещё более короткие волны (0,15 мм).

**157. Применение радиоволн.** Изобретение электронной лампы произвело настоящий переворот в технике связи. Земной шар быстро покрылся радиостанциями. Нет такого уголка на нём, куда бы не доходило электромагнитное излучение, что легко обнаружить при помощи простого радиоприёмника. Было произведено немало опытов, при которых электромагнитное излучение от мощного передатчика возвращалось к нему же, обогнув земной шар (конечно, в ослабленном виде).

Практически полное отсутствие инерции эмиссионного тока, состоящего из легчайших частиц материи — электронов, представляет собой особенно ценное свойство электронной лампы: она в точности повторяет приходящие к ней электромагнитные колебания любой частоты, даже весьма высокой.

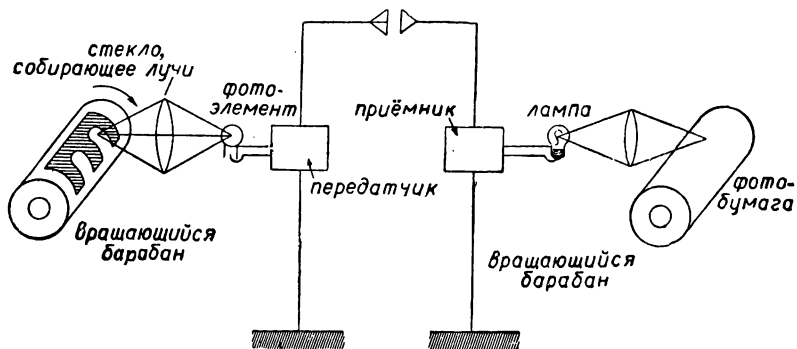


Рис. 198. Схема передачи изображений по радио.

В настоящее время трудно перечислить все виды применения радиоволн: так они многообразны.

Укажем вкратце на некоторые из них.

1) Передача изображений. Главную часть таких световых передатчиков является прибор, благодаря которому ток высокой частоты подвергается то усилению, то ослаблению — в зависимости от степени освещения. Этот прибор, называемый *фотоэлементом* (§ 231,6), выполняет роль, аналогичную микрофону; в незатухающие электромагнитные колебания он «вплетает» колебания света, вызываемые тем, что мимо прибора передвигается картина, наклеенная на барабан<sup>1)</sup> и состоящая обычно из более

<sup>1)</sup> Барабан вращается по винтовой линии с весьма малым шагом винта.

тёмных и более светлых частей (рис. 198). Модулированные таким образом колебания света излучаются через радиопередатчик, затем попадают в приёмник, усиливаются при помощи электронных ламп и заставляют соответственно изменяться силу света особой лампы. Эти колебания света проектируются на вращающийся барабан и оставляют след на фотобумаге. Полученный след проявляется и закрепляется обычным способом. При полном согласии (синхронизме) барабанов, вращающихся на станции отправления и станции приёма, получается достаточное сходство принятого изображения с оригиналом (рис. 199). В настоящее время техника передачи достигла такого совершенства, что принятое изображение с трудом можно отличить от настоящей фотографии. Фоторадиотелеграфия—наиболее быстрый способ передачи снимков.

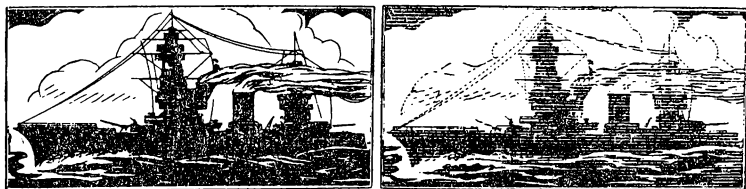


Рис. 199. Рисунок, переданный при помощи фотоэлемента.

Например, фотографии, относящиеся к Ялтинской конференции, были переданы из Москвы в Лондон и Нью-Йорк в те же часы, в какие они поступили в редакции московских газет.

2) Телевидение. Не только фотографии, рукописи, метеорологические карты передаются по радио, но и изображения движущихся предметов, ораторов, певцов, актёров, кинофильмы.

В передаче и приёме изображений движущихся предметов во время движения этих предметов и заключается телевидение.

Здесь применяется более сложная аппаратура, чем при передаче фотоснимков, но в основе телевидения лежит тот же принцип, что и в передаче неподвижных изображений: наложение колебаний света на электромагнитные колебания передатчика (модуляция).

Движущаяся картина передаётся не вся целиком, а отдельными небольшими площадками; последовательно, одна за другой площадки проектируются на фотоэлемент, для чего они последовательно освещаются „бегущим лучом“.

Некоторое представление о способе такого освещения картины мы получим из следующего примера.

Положим, мы хотим по порядку обследовать при помощи прожектора склон горы, на которой расположился враг. Двигая горизонтально пучком свет от прожектора, мы проводим сначала по вершине горы, затем опускаем пучок несколько ниже, проводим по следующей горизонтали и т. д., пока не дойдём до подножия. В результате у нас составится полная картина вражеского расположения. Аналогично этому в телепередатчике бегающий луч, полученный при помощи особой аппаратуры (мы её не описываем), проходит последовательно по всем местам передаваемой картины (всё равно — подвижной и неподвижной). Так же ведёт себя и луч зрения, когда мы читаем страницу книги: он движется по строчкам.

Перед картиной расположен фотоэлемент. Он получает свет, отражённый от этих площадок, по которым скользит бегающий луч. В процессе скольжения попадутся и тёмные, и светлые места. Фотоэлемент воспринимает эти колебания света; в последовательном порядке они накладываются на электромагнитные колебания радиопередатчика и излучаются в пространство в виде радиоволн.

Важно отметить, что луч бегаёт весьма быстро: всю картину он должен обехать по строчкам в весьма короткий срок, менее 1/10 секунды. Такова, например, продолжительность пребывания на экране каждого снимка (кадра) киноленты. Только при такой скорости передачи получается в глазу слитное, а не раздробленное впечатление. Число элементов, на которые разлагается картина, играет существенную роль в качестве передачи. Их должно быть несколько десятков тысяч (например 20 000). Итак, передача изображений движущихся предметов сводится к передаче примерно 200 000 световых импульсов в течение одной секунды.

В приёмнике движущихся изображений происходит обратный процесс — возникновение бегающего луча, который в точности повторяет все колебания света и все движения по строчкам, в полном синхронизме (согласии) с бегающим лучом на передающей станции.

В качестве бегающего луча удалось применить катодный пучок осциллографа (§ 138).

С применением катодного пучка (это изобретение усовершенствовано В. К. Зворыкиным) телевидение стало на твёрдый путь. Катодный телевизор обычно снабжается и приёмником звука, благодаря чему, например, речь и движения оратора передаются одновременно.

3) Радиолокация. Встретив на своём пути какую-либо преграду, радиоволны отражаются от неё, подобно звуковым

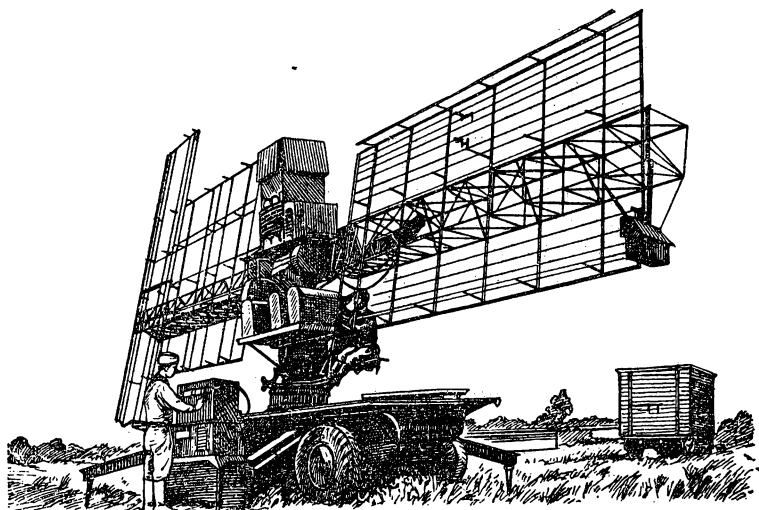


Рис. 200. Общий вид одного из радиолокаторов.

и световым волнам. Таким препятствием может быть танк, самолёт.

*Радиолокация — обнаружение отдалённых предметов при помощи отражённых радиоволн.*

Прибор, служащий для этого обнаружения — радиолокатор, радар, представляет собой сочетание радиопередатчика ультракоротких (например сантиметровых волн) с приёмником таких же волн (рис. 200).

Если пустить в ход передатчик и на пути волн не окажется какого-либо препятствия, то волны рассеются в окружающем пространстве и исчезнут бесследно. Встретив же танк, самолёт, корабль, волны отражаются от его поверхности, частью возвращаются к месту подачи, где и могут быть приняты. Так как энергия отражённых волн ничтожна, то её концентрируют при помощи приспособлений, напоминающих вогнутые зеркала, в фокусе которых собираются падающие световые лучи. Излучение также происходит по заданному направлению при помощи радиопрожектора.

Вообще действие установки (рис. 200) сильно напоминает действие обыкновенного прожектора, но вместо вольтовой дуги применён радиопередатчик. Роль глаза играет чувствительный радиоприёмник. Впрочем, у радара есть существенное отличие от обыкновенного прожектора. Последний непрерывно освещает

щает местность, и отражённые лучи всё время поступают в глаз. Радар же действует краткими импульсами, занимающими ничтожный промежуток времени (микросекунды); эти удары („всплески“) волн и отражаются от препятствия, а затем поступают в приёмник. Здесь они регистрируются включённым в приёмник катодным осциллографом: на экране его появляются „вспышки“, соответствующие отражённым импульсам (рис. 201).

Есть и ещё одно преимущество пучка электромагнитных лучей по сравнению с обыкновенными световыми лучами: они легко

проникают сквозь туман и облака. Поэтому радиолокацию иногда называют „видением в темноте“.

4) Радиозонд. Так называется прибор, служащий для метеорологических наблюдений в высоких слоях атмосферы. Он представляет собой небольшой шар, наполненный водородом (так называемый „шар-пилот“), к которому подвешен радиопередатчик весьма малых размеров; всем частям его (катушкам, конденсатору, батареям накала и анода) придан весьма малый вес, так как подъёмная сила водородного шара невелика.

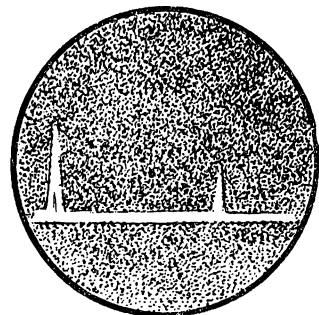


Рис. 201. Регистрация отражённых волн на экране катодного осциллографа (зубцы).

На земле передатчик приводится в действие, а затем весь прибор отпускается в атмосферу. Во время подъёма он всё время автоматически даёт сигналы метеорологических элементов, например давления воздуха. Эти сигналы принимаются на земле и регистрируются.

Приведём пример того, как радиозонд сигнализирует давление воздуха. Представим себе, что конденсатор колебательного контура передатчика на радиозонде состоит из двух пластин с воздушным промежутком; одна из пластин укреплена на коробке барографа. При уменьшении давления коробки увеличивается в объёме, пластина поднимается, воздушный зазор конденсатора изменяется, от чего и ёмкость конденсатора изменяется, а с нею — частота колебаний и длина волны. Это изменение длины волны тотчас же регистрируется на земле при помощи радиоприёмника. Если ёмкость конденсатора приёмника градуирована на единицы воздушного давления (миллиметры ртутного столба, или миллибары), тогда можно прямо отсчитать давление по конденсатору приёмника.



5) Телемеханика — область техники, занимающаяся вопросами управления механизмами на расстоянии (издалека).

Современная телемеханика получила широчайшее и многообразное применение.

Некоторое представление о сущности телемеханики можно получить из следующего примера.

Представим себе движущийся механизм, например самолёт, в кабине которого нет лётчика; вместо него имеется целый ряд радиоприёмников, соединённых с органами управления и настроенных каждый на определённую длину волны.

Благодаря этому каждый из регулирующих механизмов включается лишь в том случае, если на него попадут волны определённой длины.

Благодаря избирательному приёму сигнализации имеется возможность на расстоянии управлять по радио движением самолёта, изменять скорость его, выпускать снаряды и т. п.

Телемеханика и радиолокация получили широкое развитие и применение во вторую мировую войну.

Токи высокой частоты широко применяются в технике, медицине, агрономии и в устройстве самых разнообразных измерительных приборов.

Говоря о радиоволнах, нельзя не упомянуть о колебательных разрядах, которые имеют место в природе. Наиболее эффективные из них — грозовые разряды. Цепь облаков обладает некоторой ёмкостью и самоиндукцией, а молнии представляют собой огромные искры (в несколько километров длиной). Отсюда можно понять колебательный характер грозовых разрядов.

А. С. Попов был первым в мире, принявшим эти „сигналы“ природных „радиостанций“ на свой „грозоотметчик“.

### **ВОПРОСЫ ДЛЯ ПРОВЕРКИ УСВОЕНИЯ.**

1. Что такое токи высокой частоты?
2. Чем токи высокой частоты отличаются от обыкновенного тока?
3. Какой характер имеет искровой разряд?
4. От чего зависит частота колебаний?
5. Из каких частей состоит колебательный контур?
6. Изобразите графически затухающие колебания, незатухающие колебания.
7. В чём кроется причина затухания?
8. Каким способом, кроме искрового разряда, можно получить ток высокой частоты?
9. Как происходит излучение электромагнитной энергии?
10. Какой колебательный контур даёт излучение?
11. Что называется длиной электромагнитной волны?

12. Почему обыкновенный переменный ток не применяется для излучения?
13. Из каких частей состоит простейшая телеграфная радиостанция?
14. Какая зависимость существует между длиной волны и частотой переменного тока?
15. В чём состоит явление резонанса в электромагнитных колебаниях?
16. Как достигнуть резонанса двух колебательных контуров?
17. Из каких частей состоит простейший детекторный радиоприёмник?
18. Для чего служит детектор? телефон?
19. Как устроена простейшая радиотелефонная станция?
20. Что такое модуляция?
21. Каким образом модулированные электромагнитные колебания в радиоприёмнике превращаются в звуковые?
22. Какие существуют применения радиоволн?

**Литература.** Берг А. И. и Садовский М. И., Александр Степанович Попов. (К 50-летию изобретения радио.) Головин Г., Изобретатель радио А. С. Попов, Горячкин Е. Н., Радио в школе. Выпуски 1, 2, 1941. Коваленков А. И. и Духон Н. И., Радиоприёмные устройства, изд. Акад. наук. Малов Н. Н., Радио на службе человека, 1947, 64 стр. Марков, Радио наших дней, 1947. Гарتمان Г. А., Что такое радио? Детиздат, 1941, 160 стр. Жеребцов И. П., Учебник радиотехники.

---

# ОПТИКА

---

## ВВЕДЕНИЕ.

Раздел физики, посвящённый изучению особой формы движущейся материи — света, носит название „оптика“. Основными задачами оптики являются: изучение законов распространения света, исследование взаимодействия света с веществом, выяснение процессов возникновения света и его природы. Современное учение о свете вплотную смыкается с учением о строении вещества, с учением о строении атома.

В жизни природы и человека свет играет огромную роль. Только благодаря свету энергия Солнца переносится на Землю и обуславливает возможность жизни на ней. Но совершенно неверно было бы рассматривать свет как один из видов энергии. Свет представляет собой особую форму материи, которая как и всякая другая форма материи обладает энергией. Энергию света обычно называют световой или лучистой энергией.

На изучении световых явлений основана техника искусственного освещения жилищ, рабочих зданий и общественных помещений, техника управления ходом световых лучей, именно техника оптических приборов, имеющая громадное значение в военном деле. Световые способы измерения температуры расплавляемых тел применяются в металлургии. Лучистая энергия используется также в рентгентехнике, применяющей особого вида лучи, так называемые рентгеновские, в медицине для исследования состояния внутренних органов живого организма и в металлургии для исследования строения металлических изделий.

Агротехника связана с использованием лучистой энергии, посылаемой на Землю Солнцем.

Благодаря развитию у человека органа зрения — глаза — луч света сделался орудием познания мира для человека. Построив микроскопы, телескопы и другие оптические приборы, человек чрезвычайно расширил область своего знания: он мог изучить строение клетки — мог дать себе отчёт в расположении атомов в молекуле, мог создать теорию строения атома. С другой стороны, он изучил движение, массы, состав миров, находящихся на необозримо больших расстояниях от Земли, и процессы преобразования их.

## I. РАСПРОСТРАНЕНИЕ СВЕТА.

158. Распространение света в однородной среде. Опыты с получением изображения предмета при прохождении света от него через малое отверстие и с образованием теней и полутеней от непрозрачных предметов

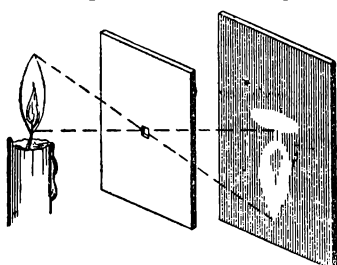


Рис. 202. Прохождение лучей через малое отверстие.

от непрозрачных предметов (рис. 202, 203, 204), разобранные в начальном курсе физики, привели к заключению о *прямолинейном распространении света от светящейся точки в однородной среде.*

159. Световые явления на границе двух сред. Когда луч света падает на границу двух сред, то энергия, которую несёт луч, разделяется на две части (рис. 205): часть энергии остаётся в той же среде, но изменяется направление её распространения, она даёт начало отражённому лучу; другая часть переходит в другую среду, причём также изменяется направление её распространения, и она даёт начало преломлённому лучу.

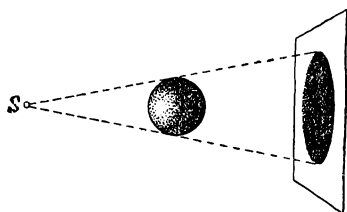


Рис. 203. Образование тени.

Явление, состоящее в том, что изменяется направление луча на границе двух сред, когда луч остаётся в той же среде, называется *отражением.*

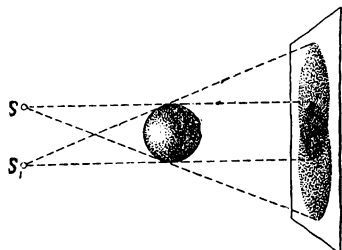


Рис. 204. Образование полутени.

Явление, состоящее в том, что изменяется направление луча на границе при переходе его во вторую среду, называется *преломлением.* Луч *AB*, отразившийся от границы, называется *лучом отражённым*; луч *AC*, перешедший во вторую среду,

называется *лучом преломлённым.*

*Угол между перпендикуляром к границе двух сред в точке падения луча и лучом падающим называется углом падения; угол между перпендикуляром и лучом отражённым назы-*

вается углом отражения; угол между перпендикуляром и лучом преломлённым называется углом преломления.

Гладко отшлифованная поверхность, отражающая лучи, называется зеркалом. Зеркалом является отполированная поверхность металлов, а также поверхность чистой ртути.

С увеличением угла падения возрастает количество отражённого света и уменьшается количество преломлённого; при уменьшении угла падения — наоборот. От спокойной поверхности пруда отчетливее отражаются к наблюдателю лучи от отдалённых предметов, чем от близких; наоборот, дно <sup>1)</sup> лучше можно рассмотреть на близком расстоянии от лодки, чем на дальнем.

Законы отражения света известны из курса 7-го класса. Они должны дать ответ на вопрос, как найти отражённый луч по заданному падающему. Первый закон указывает, в какой плоскости находится отражённый луч; второй — под каким углом в этой плоскости он направлен. Законы отражения найдены из опыта <sup>2)</sup>.

Если обозначить угол падения через  $a$ , угол отражения через  $b$ , то  $\angle b = \angle a$ .

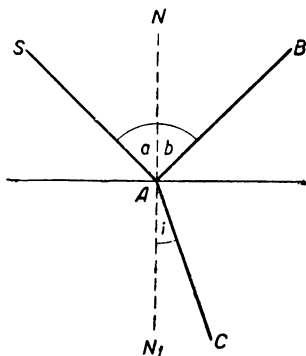


Рис. 205. Лучи — падающий, отражённый и преломлённый.

1. Луч отражённый находится в одной плоскости с лучом падающим и перпендикуляром к границе в точке падения.

2. Угол отражения равен углу падения.

Следствие из обоих законов — обратимость луча: *если направить падающий луч по направлению отражённого, то он стразится по направлению первоначального падающего луча.*

<sup>1)</sup> Дно рассматривается при помощи лучей света, перешедших из воздуха в воду и отразившихся от дна.

<sup>2)</sup> Законы отражения света были известны ещё Евклиду (305 г. до н. э.).

**160. Изображение в плоском зеркале.** На основании законов отражения можно найти изображение светящейся точки или предмета в плоском и кривом зеркалах.

Чтобы найти изображение точки в плоском зеркале (рис. 206), рассмотрим из всех лучей, от неё исходящих, два луча: один — перпендикулярный к зеркалу, другой — наклонный. Луч  $SA$ , перпендикулярный к зеркалу  $MN$ , отразится от него по тому же направлению. Наклонный луч  $SB$  отразится по направлению  $BC$ . Если оба отражённых луча попадут в глаз, они будут казаться ему выходящими из точки пересечения их воображаемых продолжений, т. е. из точки  $S_1$ . Из равенства треугольников  $SAB$  и  $S_1AB$  следует, что  $S_1A = SA$ .

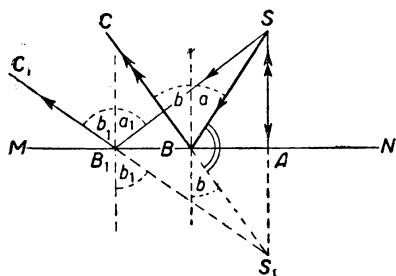


Рис. 206. Построение изображения светящейся точки в плоском зеркале.

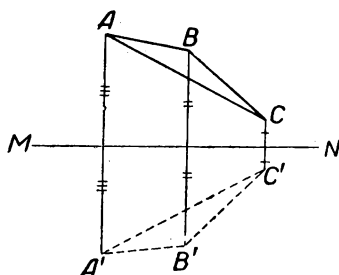


Рис. 207. Построение изображения предмета в плоском зеркале.

Какой бы наклонный луч (например  $SB_1$ ) ни был взят вместе с перпендикуляром  $SA$ , можно доказать таким же способом, что точка пересечения воображаемых продолжений будет  $S_1$ . Итак,  $S_1$  есть изображение точки  $S$  в плоском зеркале. Это изображение называется мнимым, так как в нём нет пересечения самих лучей: лучи так отражаются, что кажутся выходящими из этой точки. Эта точка  $S_1$  симметрична точке  $S$ ; симметричными точками по отношению к плоскости называются две точки, лежащие на одном перпендикуляре к плоскости по обе стороны её на равных расстояниях.

Итак, *изображение светящейся точки в плоском зеркале мнимо и симметрично светящейся точке.*

Чтобы построить изображение предмета в плоском зеркале, надо для каждой его точки найти симметричную точку. Рисунок 207 даёт построение изображения предмета в плоском зеркале.

*Изображение предмета в плоском зеркале мнимо и симметрично ему.*

**161. Лабораторная работа № 6. Исследование законов преломления света.**

Приборы: 1) прибор для опытов со светом (рис. 208); 2) стеклянный полуцилиндр; 3) полый стеклянный сосуд в форме полуцилиндра; 4) вода и какие-либо другие прозрачные жидкости; 5) сильный источник света, один для всех работающих.

Ход работы: 1. Поместите сплошной стеклянный полуцилиндр на фанерный<sup>1)</sup> круг так, чтобы диаметр и центр полуцилиндра совпали с диаметром и центром круга.

2. Направьте щель прибора на солнце или искусственный источник света и перемещайте прибор до тех пор, пока прошедший через щель узкий пучок света не попадёт в середину плоской грани полуцилиндра, установите круг так, чтобы оба луча — падающий и преломлённый — осветили фанерный круг и дали на нём светящийся след.

3. Измерьте по наклеенному кругу угол падения  $\alpha$ , угол преломления  $i$ ; вычислите по таблицам синусы их, найдите отношение  $\frac{\sin \alpha}{\sin i}$ .

4. Перемещая пластинку со щелью, измените 5—6 раз угол падения и для каждого из них произведите указанные выше измерения и вычисления. Направьте луч перпендикулярно к плоскости полуцилиндра.

5. Замените сплошное стекло полым сосудом; наполните его водой или другой жидкостью и произведите те же измерения.

6. Для каждого вещества запишите получаемые числа в таблицу.

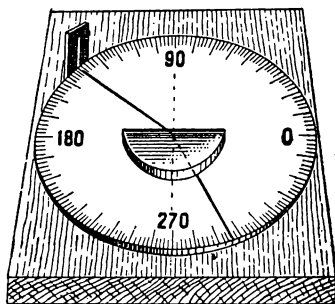


Рис. 208. Прибор для изучения законов преломления света.

Номера опытов	Угол падения $\alpha$	Угол преломления $i$	$\sin \alpha$	$\sin i$	$\frac{\sin \alpha}{\sin i} = n$

7. Какое заключение можно сделать о ходе луча во второй среде?

<sup>1)</sup> Фанерный круг с наклеенным на него бумажным кругом, разделённым на градусы и их половины, с проведёнными на нём двумя взаимно перпендикулярными диаметрами. По окружности может передвигаться жестяная пластинка с вертикальной щелью. В центре круга помещаются стёкла (прибор В. Н. Бакушинского).

8. Существует ли пропорциональность между углами падения и преломления?

9. Какое заключение можно сделать об отношении синусов углов падения и преломления?

10. Какие законы преломления света можно вывести из опыта? <sup>1)</sup>

**162. Законы преломления света.** Если направить ряд лучей на границу двух сред, то можно наблюдать, что каждый луч, проникая во вторую среду, изменяет своё направление, преломляется.

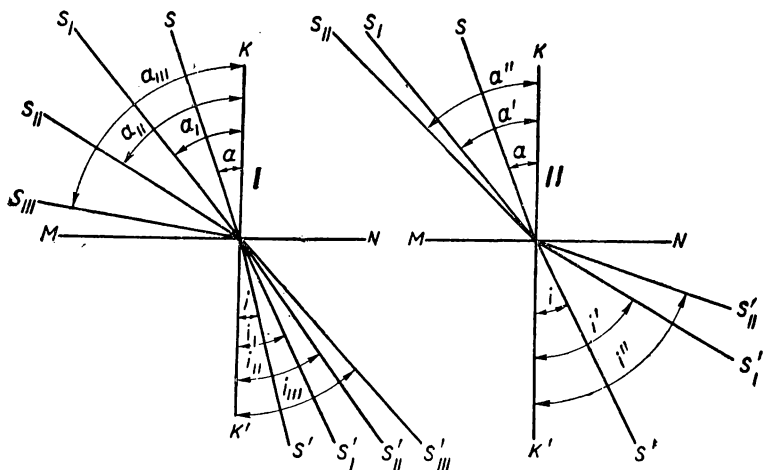


Рис. 209. Переход луча из одной среды в другую.

Опыт показывает, что при переходе света из одной среды в другую в одних случаях угол преломления меньше угла падения и луч приближается к перпендикуляру (рис. 209, I); в других случаях угол преломления больше угла падения, и луч удаляется от перпендикуляра (рис. 209, II).

В первых случаях вторая среда считается оптически более плотной, во вторых — менее плотной, чем первая.

Исследования показывают, что существует пропорциональность между синусами углов падения и преломления. Вследствие

---

<sup>1)</sup> На этом же приборе можно изучить законы отражения света; для этого надо к числу принадлежностей присоединить малое плоское зеркало, которое помещают в центре круга.



сравнительной сложности законов преломления они были открыты <sup>1)</sup> двумя тысячелетиями позже законов отражения.

**1. Луч преломлённый находится в одной плоскости с лучом падающим и перпендикуляром, восставленным к границе двух сред в точке падения.**

**2. Отношение синуса угла падения к синусу угла преломления для данных двух сред есть величина постоянная, называемая показателем преломления второй среды относительно первой.**

Следствие из двух законов — обратимость луча: *если пустить падающий луч по направлению преломлённого, то новый преломлённый луч выйдет по направлению прежнего падающего.*

Если обозначить показатель преломления второй среды относительно первой через  $n$ , то:

$$n = \frac{\sin a}{\sin i}. \quad (1)$$

Легко сообразить, что показатель преломления первой среды относительно второй выразится обратной величиной, т. е. через  $n_1 = \frac{1}{n}$ .

Показатель преломления, измеренный при переходе луча из пустоты в какое-либо вещество, называется абсолютным показателем преломления этого вещества.

Некоторые показатели преломления даны в следующей таблице:

Алмаз . . . . .	2,42	Стекло (лёгкий крон) . . . . .	1,51
Стекло (тяжёлый флинт) . . . . .	1,80	Скипидар . . . . .	1,41
Сероуглерод . . . . .	1,63	Спирт . . . . .	1,36
Каменная соль . . . . .	1,55	Вода . . . . .	1,33
Кварц . . . . .	1,55	Лёд . . . . .	1,31
Канадский бальзам . . . . .	1,54	Воздух . . . . .	1,00029

<sup>1)</sup> Законы преломления света пытался найти ещё Птолемей в 110 г.; открыл их Снеллиус в 1620 г.; в современной форме установил их Декарт в 1637 г.

## Упражнение 18.

1. Как отразится и преломится луч, падающий перпендикулярно к поверхности?
2. Построить изображение светящейся точки в плоском зеркале.
3. Построить изображение плоского предмета в плоском зеркале.
4. Построить изображение горизонтально расположенного предмета в зеркале, наклонённом под углом в  $45^\circ$  к горизонту; сделать то же для вертикально расположенного предмета.
5. Начертить схему траншейного перископа и объяснить его действие и ход лучей. Объяснить применение перископа в подводных лодках.
6. Луч падает перпендикулярно к зеркалу. На сколько отклонится отражённый луч от падающего, если зеркало повернулось на угол  $\alpha$ ?
7. Луч солнца падает под углом в  $24^\circ$  к горизонту. Под каким углом к горизонту надо поставить плоское зеркало, чтобы солнечный луч, отразившись, пошёл горизонтально? *Отв.*  $78^\circ$  или  $12^\circ$ .
8. Каков угол отражения от грани алмаза и каков угол преломления в алмазе для луча, падающего на грань алмаза из пустоты под углом в  $60^\circ$  к перпендикуляром? *Отв.*  $21^\circ$ .
9. Угол преломления в кварце равен  $24^\circ$ . Каков угол падения?
10. Угол падения луча равен  $50^\circ$ ; угол преломления равен  $28^\circ$ . Каков показатель преломления? *Отв.* 1,6.
11. Угол отражения равен  $40^\circ$ , а угол преломления равен  $46^\circ$ . Что можно сказать о плотности второй среды относительно первой?
12. Луч переходит из алмаза в пустоту и образует угол преломления, равный  $90^\circ$ . Каков угол падения? Решить ту же задачу для стекла (крона) и воды. *Отв.* Для алмаза  $24^\circ$ .
13. Почему палка в воде кажется ломаной? В какую сторону направлен излом?

**163. Полное внутреннее отражение.** Поместим в приборе для преломления (рис. 208) сплошной стеклянный или полый полуцилиндр с жидкостью и бросим теперь луч света через щель на цилиндрическую поверхность. Следя за ходом преломлённого луча внутри вещества, заметим, что этот луч, дойдя до плоской грани, отделяющей вещество от воздуха, разделится на этой границе на две части: одна отразится внутри сосуда по законам отражения; другая преломится и выйдет в воздух, удалившись от перпендикуляра, т. е. образуя угол преломления, больший угла падения. Постараемся так перемещать полуцилиндр, чтобы угол падения луча на плоскую грань внутри вещества увеличивался. Мы заметим тогда, что, во-первых, луч, выходящий из вещества, всё больше и больше удаляется от перпендикуляра; во-вторых, луч выходящий становится всё бледнее, луч, отражённый внутри вещества, — всё ярче. Наконец, по достижении некоторого угла падения луч совсем не выходит во вторую среду, целиком отражаясь в первой.

Такое явление может наступить только при падении луча на границу, отделяющую более плотную среду от менее плотной. Только в этом случае угол преломления больше угла падения и может достигнуть прямого угла, когда угол падения будет ещё острым.

Тот угол падения, для которого угол преломления становится равным  $90^\circ$ , называется предельным углом.

Отражение лучей, падающих под углом, большим

предельного, на границу менее плотной среды, называется полным внутренним отражением.

Ход лучей, претерпевающих полное внутреннее отражение, изображён на рисунке 210.

Обозначим предельный угол падения из вещества в пустоту через  $A$  и вспомним, что показатель преломления при переходе из вещества в пустоту обратен показателю преломления при переходе из пустоты в вещество. Тогда предельные углы могут быть вычислены из формулы:

$$\frac{\sin A}{\sin 90^\circ} = \frac{1}{n}, \quad \boxed{\sin A = \frac{1}{n}} \quad (II)$$

Предельные углы полного внутреннего отражения на границе с воздухом:

Алмаз . . . . .	$24^\circ$
Сероуглерод . . . . .	$38^\circ$
Стекло разных сортов . .	$30-42^\circ$
Вода . . . . .	$49^\circ$

Явление полного внутреннего отражения встречается весьма часто в природе. Пузырьки воздуха в воде или стекле, водяные паучки в воде кажутся блестящими благодаря полному внутреннему отражению света на границе воды или стекла и воздуха. Те же паучки, вынутые из воды, оказываются серыми. Явление миражей объясняется полным внутренним отражением при пере-

ходе лучей света из более плотного слоя воздуха в менее плотный.

В технике пользуются полным внутренним отражением на границе стекла и воздуха для изменения хода лучей при проектировании горизонтальных предметов на экран, при освещении подвальных помещений и т. п. Как происходит такое изменение хода лучей, можно понять из задачи 4, упражнения 19.

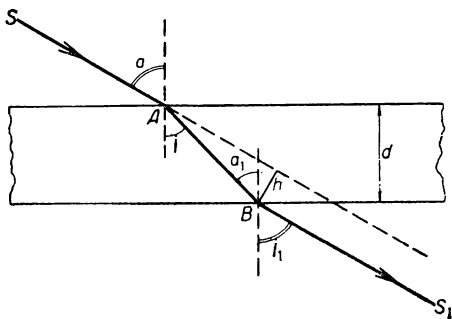


Рис. 211. Ход луча через пластинку с параллельными гранями.

пустоты и могут выйти из каменной соли в пустоту?

4. Луч света падает перпендикулярно на грань (катет) стеклянной призмы, сечение которой имеет форму равнобедренного прямоугольного треугольника. Начертить дальнейший ход луча.

5. Стеклянная призма имеет в сечении равносторонний треугольник. Луч света падает перпендикулярно к грани на расстоянии одной трети стороны от какой-либо вершины. Начертить дальнейший ход луча.

6. Под каким углом к радиусу должен падать луч света на водяную шаровую каплю, чтобы получилось на внутренней границе её полное внутреннее отражение?

#### 164. Ход луча через пластинку с параллельными гранями.

Если на стеклянную пластинку с параллельными гранями падает луч света  $SA$  (пучок параллельных лучей) (рис. 211), то на границе стекла луч делится на две части, из которых одна отражается, другая преломляется в стекле по направлению  $AB$ . На второй границе луч  $AB$  также отчасти отражается, отчасти преломляется при переходе в воздух по направлению  $BS'$ . Проследим только за выходящим лучом. На первой границе углы падения  $a$  и преломления  $i$  связаны соотношением:

$$\frac{\sin a}{\sin i} = n.$$

#### Упражнение 19.

1. Вычислить предельный угол полного внутреннего отражения для кварца, скипидара, льда.

2. Луч падает на границу воды и воздуха под углом в  $55^\circ$ . Выйдет ли он в воздух?

3. Внутри какого линейного угла лежат лучи, которые падают в одну точку границы каменной соли и могут выйти из каменной соли в пустоту?

На второй границе при переходе из стекла в воздух углы падения  $a_1$  и преломления  $i_1$  связаны соотношением:

$$\frac{\sin a_1}{\sin i_1} = \frac{1}{n}.$$

От перемножения найдём:

$$\frac{\sin a \cdot \sin a_1}{\sin i \cdot \sin i_1} = 1.$$

Из параллельности граней следует, что  $\angle a_1 = \angle i$ . Откуда:

$$\sin i_1 = \sin a \quad \text{и} \quad \angle i_1 = \angle a.$$

Так как грани параллельны, то из равенства углов  $a_1$  и  $i_1$  следует, что луч  $BS'$  параллелен лучу  $AS$ .

Отсюда вывод: *при прохождении луча через пластинку с параллельными гранями луч выходящий параллелен лучу падающему и только смещается от него на некоторое расстояние.*

*При рассматривании предмета через пластинку с параллельными гранями он видим по направлению выходящего луча и кажется смещённым относительно своего действительного положения.*

Величина смещения  $h$  увеличивается с увеличением угла падения  $a$ , толщины пластинки  $d$  и показателя преломления  $n$ .

Вычисление величины смещения предлагается сделать в задачах 1—3 следующего упражнения.

При рассматривании предметов через оконное стекло все предметы кажутся смещёнными. Но так как толщина стекла мала, то это смещение незаметно, за исключением тех случаев, когда стекло имеет неравномерную толщину.

**165. Ход луча через призму.** Возьмём призму с треугольным основанием (рис. 212). Две грани, через которые проходит луч, называются преломляющими гранями; их ребро — преломляющим ребром; линейный угол между ними — преломляющим углом призмы. Ход луча из воздуха через стеклянную призму изображён на рис. 213. Как видно из построения, *луч света отклоняется призмой из вещества более плотного, чем окружающая среда, в сторону её основания. Предмет, рассматриваемый через такую призму, кажется отклонённым к вершине преломляющего угла.*

Изображения светящейся точки и предмета в призме мнимы. В этом можно убедиться, построив ход через призму двух лучей, выходящих из одной точки.

Угол  $\delta$  между направлением луча падающего и выходящего называется углом отклонения.

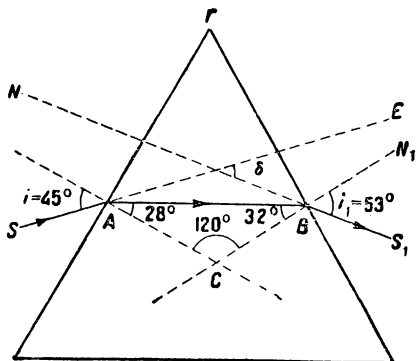
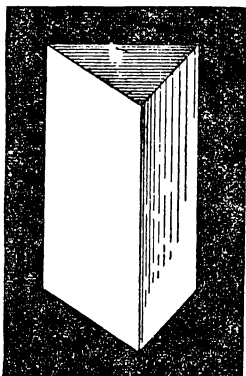


Рис. 212. Оптическая призма.

Рис. 213. Ход луча через призму.

### Упражнение 20.

1. Луч  $SA$  падает на стеклянную пластинку (крон) с параллельными гранями (рис. 211) под углом в  $60^\circ$  к нормали. Под каким углом он выйдет из пластинки? Чему будет равно смещение выходящего луча, если толщина пластинки  $AB = d = 5$  см и если  $d = 0,5$  см?

*Отв.  $\approx 1$  см;  $\approx 1$  мм.*

2. Решить предыдущую задачу для угла падения в  $50^\circ$ .

*Отв. 1,9 см.*

3. Решить задачи 1 и 2, если пластинка будет из стекла флинта.

4. Построить ход через призму из флинта двух лучей, падающих из одной точки под углами в  $30^\circ$  и  $40^\circ$  на грань  $AB$  (первый луч ближе к вершине  $A$ ). Найти построением и измерением при помощи транспортира угол отклонения для каждого из лучей и найти изображение светящейся точки. Углы призмы:  $\angle A = 60^\circ$ ;  $\angle B = 50^\circ$ .

*Отв. Для второго  $\approx 51^\circ$ .*

5. Представим себе внутри воды пустоту в форме призмы предыдущей задачи. Начертить ход лучей для этого случая при тех же числовых данных.

**166. Скорость света.** Начиная с середины XVII в. до настоящего времени скорость света измерялась различными приемами — астрономическими и физическими. Мы остановимся на самом первом и самом последнем методах измерения.

До середины XVII в. вследствие неудач всех попыток определить скорость света господствовало мнение, что свет от источника до наблюдателя распространяется мгновенно.

1. *Метод Рёмера.* В 1675 г. датский учёный Рёмер, наблюдая затмение одного из спутников планеты Юпитера (рис. 214),

мог точно установить время между двумя последовательными вхождениями или выходами спутника из тени, отбрасываемой планетой.

Сделав эти наблюдения при положении Земли на ближайшем расстоянии её от Юпитера, равном  $T_1$ , Рёмер по этим данным мог рассчитать момент выхода спутника из тени через полгода при положении Земли на наиболее удалённом расстоянии её  $T_2$ . Наблюдая, Рёмер заметил, что действительное появление запаздало сравнительно с вычисленным почти на 1000 сек. Такое расхождение Рёмер приписал тому, что в этом втором положении свету надо было пройти лишней, сравнительно с первым, путь, равный приблизительно диаметру земной орбиты.

Так как диаметр орбиты был известен (округлённо 300 000 000 км), то, зная путь и время, Рёмер мог вычислить скорость света (округлённо 300 000 км/сек).

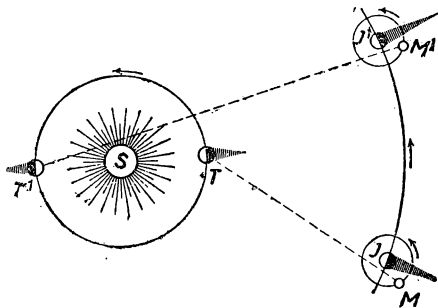


Рис. 214. Определение скорости света по способу Рёмера.

## 2. Метод Майкельсона.

Физические методы основаны на том, чтобы измерять время прохождения света между двумя точками на земной поверхности, находящимися на определённом расстоянии. Но при громадной скорости света световой луч за

1 сек. может пройти путь в  $7 \frac{1}{2}$  раз больший земного экватора. Поэтому между любыми точками на земной поверхности свет проходит расстояние в ничтожные доли секунды. Главная трудность при измерении скорости света физическими методами и заключается в отсчёте исчезающе малых промежутков времени.

Эта трудность преодолена была следующим образом в одном из последних измерений скорости света, произведённом американским физиком Майкельсоном в 1928 г.

Луч света должен был пройти прямой и обратный путь между двумя горами (Вильсон и Сан-Антонио, расстояние между которыми около 35 км). На одной горе помещался мощный источник света А (рис. 215). Один из пучков света АВ отражался от грани восьмигранного зеркала (например, от 1-й грани) и направлялся в сторону другой горы. На этой второй горе луч отра-

жался обратно к первой и путём отражений отбрасывался на грань восьмигранного зеркала, параллельную первой (на 5-ю). От этой последней грани луч направлялся к глазу наблюдателя.

Когда зеркало будет приведено во вращение, то возможны два случая. Или за время прохождения света от одной горы до другой и обратно зеркало повернётся на  $\frac{1}{8}$  часть оборота так, что на место 5-й грани встанет точно в такое положение грань 6-я и последний отражённый луч пойдёт по тому же направлению, что и при покоем зеркале: тогда наблюдатель будет видеть источник света. Или за время прохождения светом указанного пути зеркало повер-

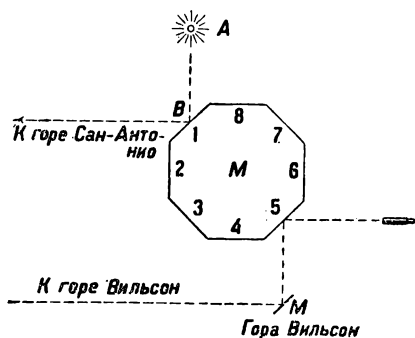


Рис. 215. Установка приборов для определения скорости света по способу Майкельсона.

нётся не на  $\frac{1}{8}$  оборота, тогда грань, следующая за 5-й, не займёт точно такого же положения, как 5-я, и последний отражённый луч пойдёт по иному пути, минуя глаз наблюдателя.

Наблюдение ведётся следующим образом: наблюдателем улавливается свет при неподвижном зеркале; затем зеркало приводится во вращение; источник света становится невидимым; ско-

рость вращения зеркала увеличивается до тех пор, пока снова не станет видимым источник света. Его появление указывает, что за время прохождения света между горами произошёл поворот зеркала на  $\frac{1}{8}$  часть оборота <sup>1)</sup>.

Зеркало совершало 530 об/сек. Продолжительность одной восьмой доли оборота составляет  $\frac{1}{4240}$  сек. Деля двойное точно измеренное расстояние между точками наблюдения на время  $\frac{1}{4240}$  сек., Майкельсон нашёл скорость света в воздухе 299 711 км/сек.

<sup>1)</sup> При увеличении скорости это может произойти через  $\frac{2}{8}$ ;  $\frac{3}{8}$  и т. д. оборота.



Отсюда *скорость света в пустоте равна 299 796 км/сек* с точностью до 1 км/сек. Округлённо принимается скорость света  $c = 300\,000$  км/сек.

Фуко во Франции и Майкельсон в Америке измерили непосредственно скорость света в воде и нашли, что она в  $\frac{4}{3}$  раза меньше, чем в пустоте.

### **ВОПРОСЫ ДЛЯ ПРОВЕРКИ УСВОЕНИЯ.**

1. Как измеряется скорость света в воздухе? Чему равна скорость света в пустоте?
2. Что называется углом падения? углом отражения? углом преломления?
3. Что такое отражение света и каковы его законы?
4. Что такое преломление света и каковы его законы?
5. Что называется показателем преломления и чему он равняется?
6. Что называется полным внутренним отражением?
7. Каковы условия полного внутреннего отражения?
8. Что называется и как вычисляется предельный угол полного внутреннего отражения на границе более плотной и менее плотной среды?
9. Привести примеры из природы и из применения в технике явлений отражения, преломления и полного внутреннего отражения.
10. Каков ход луча, проходящего через пластинку, ограниченную параллельными гранями?
11. От чего зависит величина смещения луча, прошедшего через пластинку с параллельными гранями?
12. Что называется углом отклонения при прохождении луча через призму?
13. Куда смещается изображение предмета, рассматриваемого через призму?

**167. Источники света.** Естественными источниками света являются самосветящиеся тела, среди которых самое главное место занимает Солнце. Световая энергия, посылаемая на Землю звёздами и другими светящимися небесными телами, ничтожно мала сравнительно с энергией Солнца. Другим естественным источником света служит свечение газов при прохождении через них электричества (например, полярные сияния).

Свечение сопровождается большим числом химических реакций, протекающих с выделением теплоты. Такое свечение называется *хемилюминесценцией*. Примерами такого свечения служат свечение твёрдого фосфора при окислении, свечение многих жидкостей, окисляющихся в присутствии перекиси водорода, свечение газов (пламя) при отсутствии в них твёрдых частиц.

Частный случай химического свечения представляет собой свечение некоторых живых организмов (биолюминесценция) — рыб, жуков, червяков, инфузорий.

Интересно отметить, что живые источники света дают очень высокий коэффициент полезного действия; из химической энергии они превращают в световую до 50%.

Свечение возникает также при кристаллизации, при размывании кристаллических тел, например сахара; при трении (например, при разматывании изоляционной ленты).

Современные искусственные источники света, имеющие практическое значение, основаны на горении, на накаливании твёрдых тел электрическим током, на возбуждении свечения газов проходящим через них электричеством.

**Литература.** Историю создания искусственных источников света можно прочесть в книгах: Пресман и Фентиклюз, От лучины к электричеству; Сахаров, Борьба за свет.

**168. Международная свеча. Люмен.** Источники света отличаются друг от друга качественно и количественно. Зажжённая спичка в качестве источника света совсем не то, что комнатная электрическая лампочка накаливания, и последняя не похожа на вольтову дугу.

Для сравнения источников света надо было принять какой-нибудь из них за образец, или так называемый эталон, источника света. По международному соглашению сперва трёх стран: Англии, США и Франции, а позднее СССР и других стран за эталон силы источника света принята международная свеча<sup>1)</sup>.

В качестве реального примера ближе всего подходит к международной свече — горящая стеариновая шестериковая (около 70 г) свеча. Обозначение международной свечи: *св.*

---

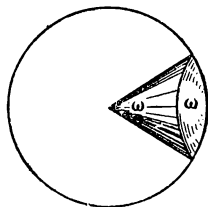
<sup>1)</sup> В каждом из государств, примкнувших к соглашению, имеется ряд (у нас 24) тщательно сверенных между собой электрических лампочек накаливания, горящих при определённом напряжении, и каждая из них выражена через соответствующее число международных свечей. Надо иметь в виду, что лампочка в 1 международную свечу в качестве образца не существует. Все эталоны разных стран заключают многократное количество международных свечей и в качестве таковых служат образцами. Таким образом, одна международная свеча есть несуществующая в действительности, но определённая часть каждой из образцовых ламп.

С 1940 г. введена новая единица силы света, именно свеча, равная 1/60 силы света в направлении нормали, получаемой с 1 см<sup>2</sup> поверхности чёрного тела при температуре затвердевания платины 2046,6°K.

О качествах источника света можно судить по количеству излучаемой им энергии. Количество световой энергии, проходящей через какую-либо площадку в единицу времени, называется световым потоком через эту площадку.

Поток энергии относят к определённой пространственной величине. За такую величину принимается пространственный (телесный) угол, равный единице, называемый **стерадианом**.

За единицу телесного угла принимается часть пространства, лежащая внутри конуса, имеющего вершину в центре шара, а основанием — часть поверхности шара, численно равную квадрату радиуса (рис. 216).



Если радиус равен  $1 \text{ м}$ , то единица телесного угла будет опираться на часть поверхности шара в  $1 \text{ м}^2$ . Так как поверхность шара равна  $4\pi R^2$ , телесный угол вокруг одной точки будет равен  $4\pi$  единиц (стерадианов).

Рис. 216. Стерадиан.

Единица светового потока называется **люмен**<sup>1)</sup>.

*Люмен есть световой поток внутри единицы телесного угла, испускаемый из вершины его точечным источником света в одну международную свечу.*

Обыкновенные источники света — керосиновые лампы, лампочки накаливания и др. — обнаруживают разные силы света по разным направлениям. Поэтому для источников света определяют или среднюю силу света, или силу света по данному направлению (горизонтальному, вертикальному и т. п.).

**169. Освещённость.** Освещение всякого предмета определяется величиной, называемой **освещённостью**.

*Освещённость поверхности измеряется световым потоком, падающим на единицу поверхности.*

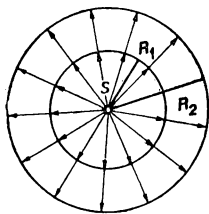
Если световой поток обозначить буквою  $\Phi$ , поверхность, на которую падает этот поток, — буквою  $S$  и освещённость поверхности — буквою  $E$ , то  $E = \frac{\Phi}{S}$ .

Техника освещения основана на двух законах освещённости.

Первый закон, найденный **Ламбертом** (1728—1777), устанавливает зависимость освещённости поверхности от её расстояния до источника света при условии перпендикулярности лучей к поверхности.

<sup>1)</sup> Люмен на латинском языке обозначает свет.

Для его вывода представим себе, что точечный источник света посылает по всем направлениям равномерно световой поток  $\Phi$ .



Если провести вокруг точечного источника две шаровые поверхности радиусами  $R_1$  и  $R_2$  (рис. 217), то величины этих шаровых поверхностей будут  $S_1 = 4\pi R_1^2$  и  $S_2 = 4\pi R_2^2$  и освещённости их:

$$E_1 = \frac{\Phi}{4\pi R_1^2}; E_2 = \frac{\Phi}{4\pi R_2^2},$$

Рис. 217. К выводу первого закона освещённости.

откуда:  $\frac{E_2}{E_1} = \frac{\Phi \cdot 4\pi R_1^2}{\Phi \cdot 4\pi R_2^2}$ , или  $\boxed{\frac{E_2}{E_1} = \frac{R_1^2}{R_2^2}}$  (IIIa)

Отсюда первый закон освещённости:

**При освещении точечным источником света освещённость поверхности обратно пропорциональна квадрату расстояния её от источника света.**

Таким образом, если удалить поверхность на расстояние втрое большее, чем прежде, её освещённость уменьшится в 9 раз, если же приблизить на расстояние вдвое меньшее, чем прежде, то освещённость увеличится в четыре раза.

Если поверхность освещается параллельными лучами, то освещённость не зависит от расстояния поверхности до источника света.

В этом случае легко видеть, что количество энергии, проходящей на данную площадь, поставленную перпендикулярно к лучам, остаётся одно и то же, когда площадка перемещается параллельно самой себе. Конечно, при расчёте не принимается во внимание возможность поглощения лучистой энергии средой.

Освещённость изменяется, когда изменяется угол падения лучей на поверхность, когда освещение производится лучами, наклонными к ней, вместо перпендикулярных. В самом деле, возьмём прямоугольник (рис. 218), плоскость которого перпендикулярна к чертежу; одна сторона его  $AB$  лежит на плоскости чертежа; две другие (длиною по одному сантиметру) перпендикулярны к чертежу и потому не изображены на нём; также не изображена и четвёртая сторона, параллельная  $AB$ .

Тогда площадь этой фигуры  $S = 1 \cdot AB = AB$  квадратных сантиметров и освещённость её  $E = \frac{\Phi}{AB}$ . Но тот же световой поток  $\Phi$  падает на другую площадь  $S_0$  прямоугольника со сторонами  $AC$  и  $1 \text{ см}$ , поставленного перпендикулярно к лучам. Эта площадь  $S_0 = 1 \cdot AC = AC$  квадратных сантиметров и освещённость её  $E_0 = \frac{\Phi}{AC}$ . Сравнивая первую освещённость со второй, находим:  $\frac{E}{E_0} = \frac{\Phi \cdot AC}{\Phi \cdot AB}$ ,

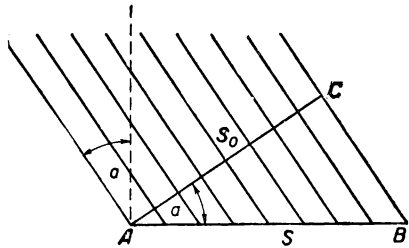


Рис. 218. К выводу второго закона освещённости.

или  $\frac{E}{E_0} = \frac{AC}{AB}$ . Из  $\triangle ACB$  имеем:  $\frac{AC}{AB} = \cos \alpha$ , тогда:

$$\frac{E}{E_0} = \cos \alpha, \quad \text{или} \quad \boxed{E = E_0 \cos \alpha.} \quad (\text{IIIб})$$

Отсюда второй закон освещённости:

**Освещённость поверхности параллельными лучами прямо пропорциональна косинусу угла падения лучей.**

Освещённость косыми лучами постоянно имеет место при освещении Земли солнечными лучами; в течение суток с изменением положения Солнца на небе непрерывно изменяется освещённость земной поверхности.

**170. Единица освещённости и формула освещённости.** При помощи единицы силы света источника устанавливается и единица освещённости поверхности.

*За единицу освещённости принимается освещённость, производимая одной свечой на площадке, перпендикулярной к лучам света и отстоящей на 1 м от источника. Эта единица освещённости называется люкс<sup>1)</sup>.*

То же определение можно выразить другими словами: за единицу освещённости принимается освещённость поверхности,

<sup>1)</sup> Люкс на латинском языке значит свет.

которая на площадь в  $1 \text{ м}^2$  получает равномерно распределённый по нему световой поток в 1 люмен<sup>1)</sup>.

Пример. 1 свеча на расстоянии 1  $\text{м}$  даёт освещённость в 1 люкс, 10 свечей дадут на том же расстоянии 10 люксов и 36 свечей дадут 36 люксов. Но 36 свечей на расстоянии 2  $\text{м}$  дадут освещённость в четыре раза меньше (§ 169), т. е. 9 люксов, на расстоянии 4  $\text{м}$  — в 16 раз меньше, т. е. 2,25 люкса; на расстоянии 10  $\text{м}$  — в 100 раз меньше, т. е. 0,36 люкса; на расстоянии  $\frac{1}{2}$   $\text{м}$  — в 4 раза больше, т. е. 144 люкса.

Вообще, если силу света источника обозначить через  $I$  свечей, то освещённость поверхности на расстоянии  $R$  метров от этого источника:

$$E = \frac{I}{R^2} \text{ люксов.} \quad (\text{IV})$$

Гигиена устанавливает для различных видов занятий нормы освещённости. Так, для чтения считается нормальной освещённость в 50 люксов.

Наибольшая освещённость, при которой глаз ещё может различать предметы на белом фоне, равна 2 000 000 люксов, наименьшая — около 0,00003 люкса, наилучшая — между 10 и 10 000 люксов. Чем мельче работа (у часовщиков, гравёров, чертёжников и т. п.), тем больше должна быть освещённость. При этом необходимо заботиться о том, чтобы освещённость была возможно ровная (надо выше подвешивать сильные источники света, применять целесообразно устроенные отражатели), так как попадание в глаз лучей непосредственно от сильного источника света или резкое чередование света и тени безусловно вредно для зрения.

Глаз не выносит яркости<sup>2)</sup> источника при непосредственном взгляде на него свыше  $0,75 \frac{\text{свечи}}{\text{см}^2}$  (0,75 свечи на 1  $\text{см}^2$  светящей поверхности). Стеариновая свеча даёт  $0,5 \frac{\text{свечи}}{\text{см}^2}$ , керосиновая лампа —  $1,5 \frac{\text{свечи}}{\text{см}^2}$ ; пустотная лампа с вольфрамовой

1) По ОСТ 4891 устанавливается другая единица освещённости: фот (по-гречески *φωσ* — свет). Фот есть освещённость поверхности, которая на площадь в 1  $\text{см}^2$  получает равномерно распределённый по ней световой поток в 1 люмен; фот содержит 10 000 люксов.

2) Яркость света источника измеряется силой света с 1  $\text{см}^2$  поверхности источника, перпендикулярной лучу зрения.

нитью —  $200 \frac{\text{свечей}}{\text{см}^2}$ , газонаполненная с мощностью в 100 ватт —  $580 \frac{\text{свечей}}{\text{см}^2}$ , солнце —  $200\,000 \frac{\text{свечей}}{\text{см}^2}$ .

### Норма освещённости для различных видов работ.

Название работ и помещений	Освещённость в люксах
1. Мелкие и тонкие работы (часовщика, гравёра, ткачество тёмных материй, тонкос прядение, черчение и т. п.) . . . . .	100
2. Работы, связанные с применением опасных мелких режущих инструментов: резцов, свёрл, фрез и пр. . . . .	100
3. Мелкая точная работа на станках; шитьё на швейных машинах; конторские и письменные работы	75
4. Чтение, наблюдение за показанием различных инструментов; прядение . . . . .	50
5. Раздевальни . . . . .	25
6. Проходы в помещениях . . . . .	10
7. Лестницы . . . . .	8
8. Дворы, проезды . . . . .	2

Светотехника выработала нормы освещённости для различных видов работ и для разных помещений. Узаконенные по Союзу нормы изданы под заглавием «Временные правила освещения фабрик и заводов», изд. «Вопросы труда». В таблице на стр. 263 приведены в извлечении некоторые числа.

Для более экономного освещения и для более равномерного распределения освещённости на поверхности внутри помещений имеет большое значение окраска стен и потолков.

Баритовые белила отражают 99<sup>0</sup>/<sub>0</sub> падающего на них света, цинковые белила 94<sup>0</sup>/<sub>0</sub>, свинцовые 93<sup>0</sup>/<sub>0</sub>, мел 84<sup>0</sup>/<sub>0</sub>; белая бумага отражает 82<sup>0</sup>/<sub>0</sub>, жёлтые обои — до 40<sup>0</sup>/<sub>0</sub>, голубые — до 25<sup>0</sup>/<sub>0</sub>, чёрное сукно даёт только 1,2<sup>0</sup>/<sub>0</sub>, чёрный бархат 0,2<sup>0</sup>/<sub>0</sub>.

### Упражнение 21.

1. Какую освещённость даёт лампочка в 25 свечей, висящая на высоте 76 см от стола? *Отв.*  $\approx 43$  люкса.
2. Даст ли нормальную для чтения освещённость лампа в 100 свечей на высоте в 1,5 м?
3. На какой высоте над столом надо повесить лампочку в 32 свечи, чтобы иметь на столе нормальную освещённость? *Отв.* 80 см.
4. В каком случае получится большая освещённость: от лампочки в 200 свечей на расстоянии 4 м или от лампочки в 25 свечей на расстоянии 1,2 м?

5. Какой доле освещённости Солнцем на экваторе равна освещённость горизонтальной поверхности в Москве в полдень дня равноденствия? Географическая широта в Москве  $\varphi = 55^{\circ}45'$ . *Отв.* 0,56.

6. Во сколько раз освещённость горизонтальной поверхности в Москве в полдень дня летнего (зимнего) солнцестояния больше (меньше), чем в полдень на экваторе?

**171. Измерение силы света источника.** Для сравнения силы света двух источников надо поместить их так, чтобы они давали одинаковую освещённость поверхности. Если первый источник даёт освещённость  $E$  люксов на расстоянии  $R_1$  метров, то по формуле IV его сила света равна  $I_1 = ER_1^2$  свечей; если ту же освещённость  $E$  люксов даёт другой источник на расстоянии  $R_2$  метров, то его сила света равна  $I_2 = ER_2^2$  свечей. Сравнивая силу света второго источника с силой света первого, получим:

$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{ER_2^2}{ER_1^2}; \quad \frac{I_2}{I_1} = \frac{R_2^2}{R_1^2}.$$

*Силы света двух источников относятся, как квадраты расстояний их от одинаково освещаемой ими поверхности.*

При сравнении сил света двух источников необходимо устанавливать источники так, чтобы они давали одинаковую освещённость какой-либо поверхности.

Для измерения силы света одного источника другой источник должен быть известной силы света (или может быть принят за единицу).

Приборы, предназначенные для измерения силы света источника, называются **фотометрами** <sup>1)</sup>.

**172. Фотометр.** Одной из употребительных форм фотометра является фотометр с парафиновыми пластинками (Жолли). Он состоит из экрана, в середине которого вырезано прямоугольное окошко (рис. 219).

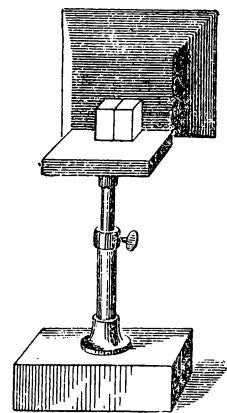


Рис. 219. Фотометр Жолли.

Сзади окошка подставляются две одинаковые тесно сложенные пластинки парафина; разделённые тонким листом станиоля. Пластинки парафина плотно закрывают окошко; линия их раздела проходит посередине окошка. Фотометр помещается на линейку

<sup>1)</sup> По-гречески *фос* — свет, *метрео* — мерю.



или ленту масштаба; по обе его стороны на уровне парафина помещают оба сравниваемых источника света. Тогда одна пластинка парафина освещается одним источником, другая — другим. Передвигая источники, можно установить их на равенство освещённости обеих пластинок. Когда такая установка достигнута, измеряют по масштабу расстояния источников до линии раздела пластинок. На основании предыдущего параграфа можно сравнить силы света  $I_1$  и  $I_2$  двух источников или измерить одну из них, приняв другую за единицу. Если положить  $I_1 = 1$  свече, то:

$$\frac{I_2}{1} = \frac{R_2^2}{R_1^2}, \text{ или } I_2 = \left(\frac{R_2}{R_1}\right)^2 \text{ свечей.}$$

### 173. Лабораторная работа № 7. Сравнение сил света двух источников.

Приборы: 1) фотометр, 2) масштаб в форме линейки или ленты, 3) две подставки для источников света, 4) стеариновая свеча, керосиновая лампа, различные электрические лампочки.

Ход работы: 1. Поставьте фотометр на масштаб и поместите по обе стороны его свечу и керосиновую лампу.

2. Перемещайте фотометр до тех пор, пока освещённость обеих пластинок не будет казаться одинаковой.

3. Измерьте расстояния  $R_1$  и  $R_2$  от середины фотометра до свечи и лампы.

4. Вычислите силу света лампы  $I = \left(\frac{R_2}{R_1}\right)^2$  свечей, приняв силу света свечи за единицу.

5. Сместите фотометр и снова ищите установку на равную освещённость.

6. Измеряйте каждый раз расстояния, занося числа в таблицу:

Номер опыта	Название измеряемого источника	$R_2$	$R_1$	$I = \left(\frac{R_2}{R_1}\right)^2$	Как помещён источник
	Среднее для каждого источника . . . . .				

7. Если лампа была сперва обращена к фотометру широкой стороной пламени, поверните её ребром и повторите измерение.

8. Поместите на место керосиновой лампы электрическую лампочку вертикально и горизонтально и произведите измерения.

9. Помещайте вместо свечи различные электрические лампы и сравните их с предыдущей.

## Упражнение 22.

1. Расстояние источника света в одну единицу от фотометра  $R_1 = 10$  см, а расстояние исследуемого источника  $R_2 = 25$  см. Чему равна сила света последнего источника? *Отв.* 6,25 ед.

2. Лампочка в 5 свечей на расстоянии  $R_1 = 16$  см и другая лампочка на расстоянии  $R_2 = 60$  см дают одинаковую освещённость. Найдите силу света последней. *Отв.*  $\approx 70$  св.

3. На каком расстоянии над столом надо повесить лампочку в 100 свечей, чтобы она давала такую же освещённость, как и лампочка в 25 свечей на расстоянии 80 см? *Отв.* 1,6 м.

4. Лампочка в 32 свечи висит над столом на расстоянии в 1,2 м, другая лампочка висит на высоте 2 м и даёт такую же освещённость. Какова сила света её? *Отв.*  $\approx 90$  св.

## ВОПРОСЫ ДЛЯ ПРОВЕРКИ УСВОЕНИЯ.

1. Как измеряется освещённость поверхности?
2. В чём состоит первый закон освещённости?
3. В чём состоит второй закон освещённости?
4. Что такое люкс?
5. Написать формулу для измерения освещённости.
6. Что такое международная свеча?
7. На каком соотношении основано сравнение сил света источников?
8. Как называется и как устроен прибор для сравнения сил света источников?

**174. Управление ходом световых лучей.** Изменять естественный ход световых лучей в необходимом для тех или других целей направлении можно при помощи отражения или преломления света.

Плоское зеркало, поставленное на пути луча, меняет его направление (задачи 4, 5, 6, упр. 18). Зеркало, поставленное под углом в  $45^\circ$  к горизонтальному лучу, делает его вертикальным.

Если надо не только изменить направление луча, но и получить от того же светового потока иную освещённость того же предмета, то пользуются или отражением света от сферического (вообще кривого) зеркала, или преломлением его в сферическом (вообще ограниченном кривыми поверхностями) стекле, или в другом прозрачном веществе.

Мы не будем здесь повторять известных из начального курса фактов: устройства перископа, световой сигнализации и т. д. Для освежения сведений о применении светотехники в обороне страны прочтите книжку В ну ко ва „Физика и оборона страны“, 1935 г., часть II, вопросы 49, 50, 53—57.

**175. Формула сферического зеркала.** Сферическим зеркалом называется часть поверхности шара (обыкновенно с радиусом

значительного размера). Если отражающей сделана внутренняя поверхность шара, зеркало называется вогнутым, если же внешняя, то называется выпуклым.

Прямая, проведённая через середину зеркала  $O$  и центр шаровой поверхности  $C$ , называется главной оптической осью.

Если на поверхность вогнутого зеркала упадёт луч  $SD$ , параллельный главной оптической оси (рис. 220), под углом  $a$ , то

при своём отражении он образует угол  $b$ , равный углу падения  $a$ . Перпендикуляром к поверхности в данном случае служит радиус  $CD$ , проведённый в точку падения  $D$ .

Но  $\angle a = \angle DCO$  как накрестлежащему при параллельных  $SD$  и  $CO$ . Поэтому  $DF = FC$ . Если луч  $SD$  лежит очень близко к оси (так

называемый *центральный пучок лучей*), то с очень малой погрешностью можно принять  $DF = OF$ , т. е.  $F$  есть середина радиуса. Подобным образом и для всякого другого луча центрального пучка, параллельного главной оси, можно доказать, что после отражения он пересечёт ось в середине радиуса.

Отсюда получается вывод: *центральный пучок лучей, параллельных главной оптической оси, после отражения от вогнутого зеркала пересекает главную оптическую ось в одной точке, называемой *главным фокусом* и лежащей посередине радиуса.*

Расстояние  $OF$  называется *главным фокусным расстоянием*; оно обозначается буквою  $F$  и равно половине радиуса:

$$F = \frac{R}{2}.$$

Если источник света  $S$  лежит на главной оси, то его луч  $SD$  (рис. 221), образовав при

отражении угол, равный углу падения, пересечёт ось в точке  $S_1$ . В  $\triangle SDS_1$  линия  $CD$  будет биссектрисой угла и разделит противоположную сторону на отрезки, пропорциональные двум

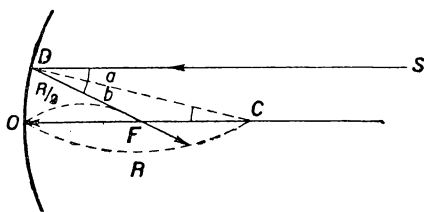


Рис. 220. Фокус  $F$  вогнутого сферического зеркала.

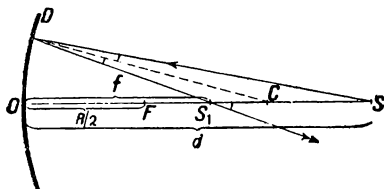


Рис. 221. Сопряжённые точки  $S$  и  $S_1$  вогнутого сферического зеркала.

другим сторонам треугольника:

$$SC : CS_1 = SD : S_1D.$$

Если и здесь брать лучи, очень близкие к оси, то без большой погрешности можно принять  $SD = SO$  и  $S_1D = S_1O$ .

Обозначим расстояние светящейся точки от зеркала  $SO$  через  $d$ , расстояние  $S_1O$  — через  $f$ . Тогда  $SC = d - R$ ;  $CS_1 = R - f$  и предыдущее равенство получит вид:

$$\frac{d - R}{R - f} = \frac{d}{f}.$$

Все следующие преобразования имеют целью привести это равенство к виду, наиболее удобному для запоминания:

$$df - Rf = Rd - df; \quad 2df = Rd + Rf;$$

$$\frac{2df}{Rdf} = \frac{Rd}{Rdf} + \frac{Rf}{Rdf}; \quad \frac{2}{R} = \frac{1}{f} + \frac{1}{d}; \quad \boxed{\frac{1}{d} + \frac{1}{f} = \frac{1}{F}} \quad ^1) \quad (V)$$

Если мы бросим из той же точки  $S$  другой луч на зеркало, то для него можно вывести подобное же равенство. Так как для второго луча значения  $d$  и  $F$  остаются теми же, что и для первого, то и значение  $f$ , определяемое написанным уравнением, будет таким же. Отсюда следует, что лучи, выходящие из какой-либо точки главной оси, лежащей за центром (близкие к оси), пересекаются в одной точке, лежащей на главной оси между центром и фокусом. Точка  $S_1$  будет изображением светящейся точки  $S$ . Если источник света поместить в точку  $S_1$ , то по свойству обратимости лучей при отражении изображение её получится в точке  $S$ . Поэтому две точки главной оси — источник света и его изображение — называются сопряжёнными точками. Введенное выше уравнение (V) называется формулой вогнутого зеркала.

### 176. Построение изображения в сферическом зеркале.

Для построения изображения предмета надо найти изображения отдельных его точек. Чтобы построить изображение точки, достаточно провести из неё два луча и найти для них отражённые лучи. Простейшим образом можно вычертить ход следующих трёх лучей: 1) падающий — параллелен оптической оси; отражённый — проходит через главный фокус; 2) падающий — проходит через главный фокус; отражённый — идёт параллельно главной оптической оси;

<sup>1)</sup> Исследование этой формулы производится так же, как и формулы для линз (§ 180).

3) падающий — проходит через центр кривизны зеркала; отражённый — возвращается обратно по тому же пути. Для построения изображения точки из перечисленных трёх лучей можно выбрать любые два.

Рисунок 222 показывает ход лучей при построении изображения отрезка  $AB$ , посылающего лучи на зеркало.

Выберем из лучей, идущих из точки  $A$ , луч, параллельный главной оси  $AS_1$ ; он даёт отражённый луч, идущий через главный фокус  $S_1F$ . Вторым лучом берём луч, идущий от  $A$  через центр  $C$  в точку  $T_1$ . Он отразится обратно. Оба отражённых луча пересекутся в точке  $A_1$ , которая будет изображением точки  $A$ . Подобным же образом строим изображение точки  $B$ . Выберем луч, падающий через главный фокус  $BS_2$ ; он, отразившись, пойдёт параллельно главной оси. За второй луч возьмём центральный луч  $BT_2$ , отражающийся по тому же направлению. Их пересечение  $B_1$  даст изображение  $B$ . Отрезок  $A_1B_1$  будет изображением отрезка  $AB$ .

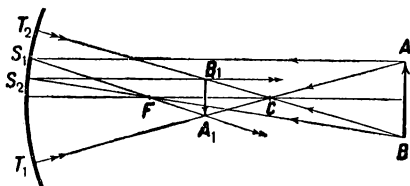


Рис. 222. Построение изображения в вогнутом сферическом зеркале, когда предмет находится дальше центра.

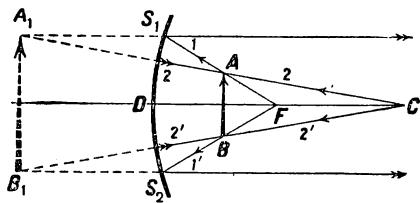


Рис. 223. Построение изображения в вогнутом сферическом зеркале, когда предмет лежит ближе фокуса.

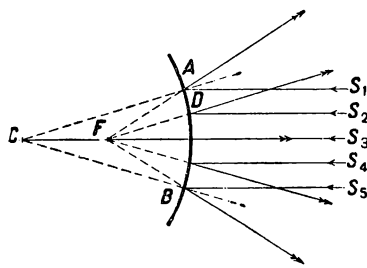


Рис. 224. Мнимый фокус  $F$  выпуклого сферического зеркала.

Итак: *когда предмет лежит за центром, его изображение — действительное, обратное и уменьшенное — находится между центром и главным фокусом.*

По рисунку 223 можно разобрать ход лучей для того случая, когда предмет лежит ближе главного фокуса, по рисунку 224 — ход лучей, падающих параллельно главной оси на выпуклое сферическое зеркало; по рисунку 225 — построение изображения в выпуклом зеркале.

Заметим, что во всех последних случаях (рис. 223—225) отражённые лучи, выходящие из одной точки источника, не пересекаются. На рисунке могут пересекаться только их воображаемые продолжения. Поэтому как полученные изображения, так и главный фокус выпуклого зеркала называются мнимыми.

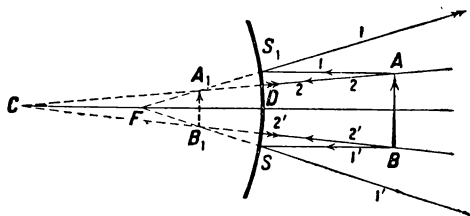


Рис. 225. Построение изображения в выпуклом сферическом зеркале.

Вогнутое зеркало, в фокусе которого помещён источник света около 1 000 свечей, посылает в пространство параллельный пучок. Освещённость поверхности, на которую этот пучок падает, очень медленно уменьшается с увеличением расстояния освещённой поверхности от источника света, и это уменьшение освещённости происходит только от непрозрачности воздуха. Такой прибор может давать значительную освещённость на расстоянии километров; он называется прожектором и служит на войне для поисков ночью неприятеля, в особенности вражеских самолётов (рис. 226).

Среди многих других технических применений кривых зеркал остановимся на применении их для превращения солнечной энергии в механическую в так называемых солнечных двигателях. В нашем Союзе около Ташкента, а также и в других местах построены сооружения, состоящие из многих полированных пластин. Солнечные лучи, падающие на всю огромную поверхность этого сооружения, отражаясь, направляются в сторону небольшой трубы, помещённой внутри этого сооружения и заключающей в себе воду. Теплота солнечных лучей, сконцентрированных на трубе, доводит воду до кипения, и образующиеся пары поступают в паровой двигатель. Таким образом устраи-

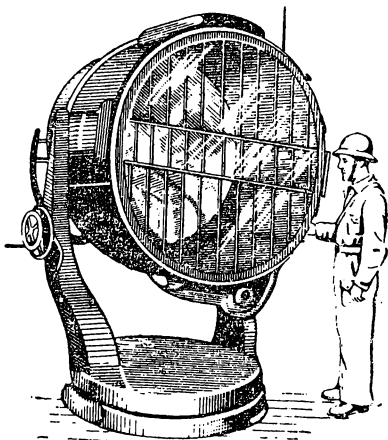


Рис. 226. Прожектор.

вается солнечный двигатель, превращающий солнечную энергию в энергию тепловую и механическую.

**Литература.** Орлов В., Разящие лучи (рассказы о прожекторах).

**177. Сферические стёкла.** Подобно тому как призма из преломляющего вещества отклоняет падающие на неё из воздуха лучи к своему основанию, так же изменяют ход луча сферические стёкла.

Стекло называется сферическим, если оно с обеих сторон отшлифовано по шаровой поверхности (или с одной — по шаровой, с другой — по плоской). Виды сферических стёкол изображены на рисунке 227; первое стекло называется двояковыпуклым, четвёртое — двояковогнутым; сферическое стекло называется также чечевицей или линзой<sup>1)</sup>. *Линия, проходящая через центры шаровых поверхностей стекла, называется главной оптической осью.*

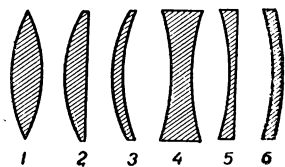


Рис. 227. Виды сферических стёкол.

Для всякой линзы существует точка, через которую проходят лучи, не меняя своего направления. Она лежит на главной оптической оси и называется *оптическим центром линзы.*

Всякая прямая, проходящая через оптический центр под углом к главной оптической оси, называется *побочной оптической осью.*

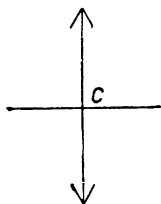


Рис. 228а. Схематическое изображение выпуклой линзы.

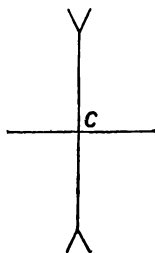


Рис. 228б. Схематическое изображение вогнутой линзы.

рисунку 228а, а вогнутые — как рисунок 228б.

Если поставить выпуклую линзу так, чтобы на неё падали лучи, параллельные главной оптической оси, то они соберутся в одной точке на её главной оси. *Та точка главной оси, в кото-*

<sup>1)</sup> Вообще оптической линзой называется прозрачное тело, ограниченное двумя правильными поверхностями (в большинстве случаев сферическими), служащими для изменения сходимости проходящего через него светового пучка.

рой собираются лучи, падающие на выпуклую линзу параллельно её главной оси, называется главным фокусом линзы (рис. 229а).

Если сделать такой же опыт с вогнутой линзой, то лучи, падающие на линзу параллельно главной оси её, выйдут из линзы расходящимся пучком. Но, как показывает опыт и построение, лучи расходятся так, что они как бы выходят из одной точки, лежащей на их продолжении. Та точка главной оси, через которую проходят продолжения преломлённых в вогнутой линзе расходящихся лучей, падающих на неё параллельно главной оптической оси, называется мнимым главным фокусом (рис. 229б). Как показывают рисунки, выпуклая линза подобна

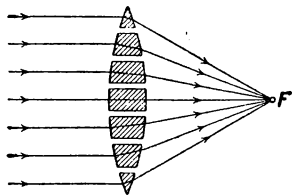


Рис. 229а. Главный фокус  $F$  выпуклой линзы.

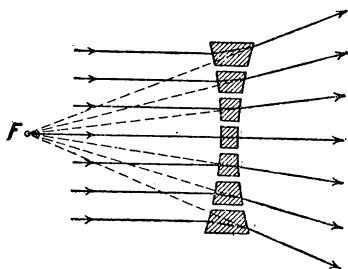


Рис. 229б. Главный фокус  $F$  вогнутой линзы (мнимый).

призм, сближенным основаниями, и отклоняет падающие на неё лучи к основаниям, т. е. к середине, вогнутая — подобна призмам, сближенным вершинами, и тоже отклоняет лучи к основаниям призм, т. е. в данном случае к краям линзы.

В каждой линзе имеются два фокуса, лежащие по обе стороны её.

**178. Формула линзы.** Чтобы построить изображение предмета, надо построить изображения отдельных точек его. Для построения изображения точки достаточно провести из неё два луча и найти для них преломлённые лучи. Обыкновенно выбирают два из следующих трёх лучей, для которых направление выходящего луча может быть вычерчено без измерения углов и вычисления по тригонометрическим таблицам, именно: 1) луч падает параллельно главной оптической оси, преломлённый проходит через главный фокус; 2) луч падает через главный фокус, преломлённый идёт параллельно главной оптической оси; 3) луч, проходящий через оптический центр, идёт через линзу без изменения направления.



Чтобы вывести формулу линзы, возьмём точку  $A$  (рис. 230) где-нибудь слева от линзы над главной осью. Её расстояние по главной оси до линзы (до её оптического центра) обозначим через  $d$  (т. е.  $CB = d$ ). Проводя луч, параллельный главной оптической оси, и луч, совпадающий с побочной осью, найдём изображение точки  $A$  в точке  $A_1$  пересечения этих двух лучей после прохождения их через линзу. Расстояние точки  $A_1$  по главной оси до линзы обозначим через  $f$  (т. е.  $CB_1 = f$ ). Главное фокусное расстояние  $CF$  обозначается через  $F$  (т. е.  $CF = F$ ), тогда  $B_1F = f - F$ . Из подобия треугольников  $ACB$  и  $A_1CB_1$  имеем:

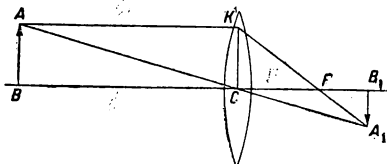


Рис. 230. К выводу формулы линзы.

$AB : A_1B_1 = CB : CB_1$ .

Из подобия треугольников  $A_1FB_1$  и  $CFK$  следует:

$$KC : A_1B_1 = CF : B_1F.$$

Так как в прямоугольнике  $CKAB$  отрезок  $KC = AB$ , то левые части обоих равенств равны; следовательно, должны быть равны и правые:

$$CF : B_1F = CB : CB_1.$$

Заменяя члены пропорции через введённые ранее обозначения, находим:

$$F : (f - F) = d : f; \quad Ff = df - Fd; \quad Fd + Ff = df.$$

Отсюда можно вычислить главное фокусное расстояние:

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

Разделив же все члены предпоследнего равенства на произведение  $dfF$ , можно вывести формулу линзы:

$$\boxed{\frac{1}{d} + \frac{1}{f} = \frac{1}{F}}. \quad (\text{VI})$$

Словесное выражение формулы (VI):

**сумма обратных величин расстояний сопряжённых точек от центра линзы равна обратной величине главного фокусного расстояния.**

Если за источник света взять точку  $A_1$ , то её изображение, как видно из рисунка, получится в точке  $A$ . Это же свойство вытекает из закона обратимости (§ 162) и из вышеприведённой формулы, где  $d$  и  $f$  занимают совершенно одинаковое положение. Поэтому светящаяся точка и её изображение называются сопряжёнными точками и выведенное уравнение называется формулой выпуклой линзы.

**179. Увеличение изображения.** Если в предыдущем рисунке рассматривать отрезок  $AB$  как предмет, то отрезок  $A_1B_1$  будет его изображением. Отношение линейного размера изображения к линейному размеру предмета называется увеличением. Из первого равенства предыдущего параграфа видно, что увеличение:

$$\frac{A_1B_1}{AB} = \frac{f}{d},$$

т. е. *увеличение линзы равно отношению расстояния изображения от оптического центра линзы к расстоянию предмета от него.*

**180. Изображение в линзе при различных расстояниях предмета от неё.** Положение и размер изображения можно получить построением и вычислением из формулы линзы (VI), а именно:

$$f = \frac{Fd}{d - F}, \quad \text{или} \quad f = \frac{F}{1 - \frac{F}{d}}$$

Первый случай. Предмет находится на чрезвычайно большом расстоянии на главной оптической оси (в бесконечности); от такого предмета лучи идут параллельно главной оптической оси и собираются в главном фокусе. Если  $d = \infty$ , то  $\frac{F}{d} = 0$ ;  $f = F$ .

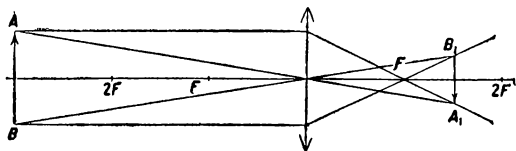


Рис. 231. Построение изображения предмета в выпуклой линзе, когда он помещён за двойным фокусным расстоянием.

Второй случай. Предмет лежит дальше двойного фокусного расстояния. Таково обычно положение предмета при фотографировании.

Если  $d > 2F$ , то  $\frac{F}{d} < \frac{1}{2}$ ;  $1 - \frac{F}{d} > \frac{1}{2}$  и  $f < 2F$ ;

$A_1B_1 < AB$ , так как  $f < d$ .

Построение изображения дано на рисунке 231.

Когда предмет лежит за двойным фокусным расстоянием, его изображение — действительное, обратное, уменьшенное — лежит между главным фокусом и точкой на двойном фокусном расстоянии.

Третий случай. Предмет лежит на двойном фокусном расстоянии.

Если  $d = 2F$ , то  $\frac{F}{d} = \frac{1}{2}$ ;  $1 - \frac{F}{d} = \frac{1}{2}$ ;  $f = 2F$ ,  $A_1B_1 = AB$ ,

так как  $d = f$ .

Изображение построено на рисунке 232.

Когда предмет лежит на двойном фокусном расстоянии, его изображение — действительное, обратное, равное по величине предмету — лежит на двойном фокусном расстоянии.

Четвёртый случай.

Предмет лежит между точкой

на двойном фокусном расстоянии и главным фокусом. Таково положение предмета при проектировании проекционным фонарём.

Если  $F < d < 2F$ , то  $\frac{F}{d} > \frac{1}{2}$ ;  $1 - \frac{F}{d} < \frac{1}{2}$ ;  $f > 2F$ ;  $A_1B_1 > AB$ ,

так как  $f > d$ .

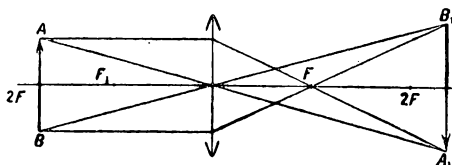


Рис. 233. Построение изображения предмета в выпуклой линзе, когда он помещён дальше фокусного, но ближе двойного фокусного расстояния.

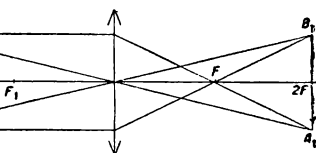


Рис. 232. Построение изображения предмета в выпуклой линзе, когда он помещён на двойном фокусном расстоянии.

Построение дано на рисунке 233.

Когда предмет находится между точкой на двойном фокусном расстоянии и главным фокусом, его изображение — действительное, обратное, увеличенное — лежит за двойным фокусным расстоянием.

Пятый случай. Предмет лежит на главном фокусном расстоянии.

Если  $d = F$ , то  $\frac{F}{d} = 1$ ;  $1 - \frac{F}{d} = 0$ ;  $f = \infty$ , т. е.  $f$  превос-

ходит всякое, какое угодно большое число. Как видно из хода лучей на рисунке 234, оба луча, которые своим пересечением должны бы дать изображение точки, идут параллельно и не пересекаются (или, как говорят в математике, пересекаются в бесконечности).

*Когда предмет в главном фокусе, его изображения не существует (оно уходит в бесконечность).*

Шестой случай. Предмет лежит между главным фокусом и линзой.

Если  $d < F$ , то  $\frac{F}{d} > 1$ ;  $1 - \frac{F}{d}$  — число отрицательное;

$f = \frac{F}{1 - \frac{F}{d}}$  есть также число

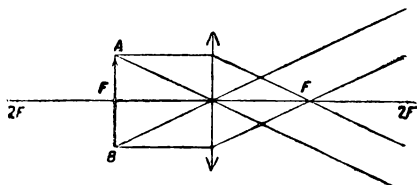


Рис. 234. Построение изображения предмета в выпуклой линзе, когда он помещён в главном фокусе.

отрицательное, т. е.  $f$  направлено от линзы в ту же сторону, где лежит предмет. Ход лучей при построении изображения дан на рисунке 235.

*Когда предмет лежит между главным фокусом и линзой, его изображение — мнимое, прямое, увеличенное. Изображение уменьшается по мере приближения предмета к линзе, пока не сделается у самой линзы равным предмету.*

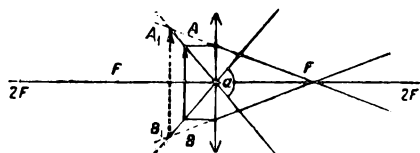


Рис. 235. Построение изображения предмета в выпуклой линзе, когда он помещён ближе главного фокуса.

Общий обзор. По мере приближения предмета из бесконечности до точки на двойном фокусном расстоянии его изображение перемещается с гораздо меньшей скоростью из главного фокуса до точки, лежащей на двойном фокусном расстоянии по другую сторону линзы; размер изображения увеличивается до размера предмета. При дальнейшем перемещении предмета из точки на двойном фокусном расстоянии до главного фокуса его изображение перемещается за двойное расстояние в бесконечность со всё возрастающей скоростью, большей, чем скорость перемещения предмета. При перемещении предмета от главного фокуса к линзе изображение появляется со стороны предмета,

становясь мнимым, прямым и увеличенным, и движется следом за предметом со скоростью, значительно превосходящей скорость перемещаемого предмета.

Построение изображения для вогнутой линзы показано на рисунке 236.

*Изображение в вогнутой линзе — всегда мнимое, прямое, уменьшенное.*

Формула вогнутой линзы:

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

Подводя итог исследованию хода световых лучей в различных случаях, мы видим, что при помощи плоских зеркал, сферических зеркал, призм и линз люди научились управлять ходом световых лучей.

Этим умением пользуются для устройства всех оптических приборов, для получения параллельных или слабо расходящихся пучков лучей в автомобильных фонарях, маяках и прожекторах, получивших такое большое значение в военном деле.

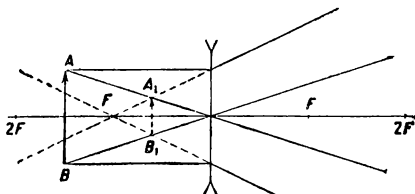


Рис. 236. Построение изображения предмета в вогнутой линзе.

### 181. Лабораторная работа № 8. Изучение на опыте свойства линз.

Приборы: 1) две выпуклые линзы, одна длиннофокусная, другая короткофокусная с подставками; 2) вогнутая линза; 3) оптическая скамья или линейка — масштаб или лента миллиметровой бумаги; 4) экран на подставке; 5) экран с вырезом в виде стрелы; 6) источник света.

Ход работы:

1. Установите на одном конце скамьи или линейки, или ленты экран с вырезом в виде стрелы, осветите его источником света, затем на ту же скамью поставьте подставку с линзой и экран.

2. Передвигайте линзу и экран до тех пор, пока на экране не получится отчетливое изображение предмета.

3. Измерьте расстояние от предмета до середины линзы  $d$ , от середины линзы до изображения  $f$ , отметьте качество изображения и вычислите по формуле  $F$ , занеся числа в таблицу.

4. Сделайте 7—8 различных установок и вычислите среднее  $F$ .

5. Прделайте такие же измерения для второй линзы.

6. Воспользуйтесь этими вычислениями для проверки выводов § 180.

Номер измерения	$d$	$f$	$F$	Качество изображений
1 2				
	Среднее			

При этом постарайтесь сделать хотя бы одну установку так, чтобы в ней  $d$  равнялось  $f$  одной из предыдущих установок, и сравните, чему будет равно в этом случае  $f$ .

7. Направив линзу на Солнце, получите фокус солнечных лучей, измерьте фокусные расстояния с обеих сторон, возьмите среднее из них и сравните его с вычисленным фокусным расстоянием.

8. Поставьте на место выпуклой линзы вогнутую и попытайтесь получить изображение от неё.

**182. Оптическая сила линз.** Для сравнения между собой оптических свойств различных линз пользуются не величиной фокусного расстояния  $F$  линз, а обратной величиной  $\frac{1}{F}$ .

Величина  $\frac{1}{F}$  называется оптической силой линзы. Применение этой величины основано на следующем. Чем длиннее главное фокусное расстояние, тем слабее преломляющая способность линзы и тем меньше дробь  $\frac{1}{F}$ ; чем короче фокусное расстояние  $F$ , тем сильнее преломляет линза и тем больше дробь  $\frac{1}{F}$ . Таким образом, дробь  $\frac{1}{F}$  может служить характеристикой преломляющей способности линзы.

За единицу оптической силы линзы принимается *оптическая сила такой линзы, главное фокусное расстояние которой равно 1 м*; такая единица называется *диоптрией*. Оптическая сила всякой линзы равна единице, делённой на фокусное расстояние в метрах, причём для выпуклых стёкол она выражается положительными и числами, для вогнутых — отрицательными.

Так, если  $F = 20$  см, то оптическая сила равна  $\frac{1}{0,2} = 5$  диоптриям; если оптическая сила равна 2 диоптриям, то  $\frac{1}{F} = 2$ ;  
 $F = \frac{1}{2} \text{ м} = 50 \text{ см}$ .

Линзы, применяемые в оптических приборах, характеризуются ещё одной величиной, называемой *светосилой*. Качество линзы, применяемой, например, для фотографического аппарата, обуславливается также и той освещённостью, которую она может дать на фотографической пластинке. Количество же лучей, дающих освещённость изображения, будет тем больше, чем больше отверстие стекла, т. е. его диаметр, и чем сильнее преломляются лучи, т. е. чем короче фокусное расстояние. Поэтому *светосила линзы измеряется отношением диаметра линзы к её фокусному расстоянию*.

### Упражнение 23.

1. Скольким диоптриям равна оптическая сила выпуклых линз с  $F = 16 \text{ см}$ ?  $7,5 \text{ см}$ ?  $1,5 \text{ м}$ ? вогнутых линз с  $F = 1 \text{ м}$ ?  $60 \text{ см}$ ?  $2 \text{ м}$ ?

2. Определить главное фокусное расстояние  $F$  линз, у которых оптическая сила в диоптриях равна  $+13\frac{1}{3}$ ;  $-16,6$ ;  $+2$ ;  $-0,5$ ;  $+0,75$ ;  $+0,4$ .

3. Почему с увеличением изображения его освещённость уменьшается?

4. Во сколько раз освещённость изображения на экране будет меньше освещённости диапозитива, если линейный размер изображения больше линейного размера диапозитива в 4 раза (при условии, что все лучи, освещающие диапозитив, попадают на экран)?

5. Найти главное фокусное расстояние выпуклой линзы, если расстояние предмета от линзы  $d = 24 \text{ см}$ , а расстояние его изображения  $f = 40 \text{ см}$ .

6. Найти оптическую силу выпуклой линзы, если  $d = 25 \text{ см}$  и  $f = 1 \text{ м}$ . *Отв. 5 диоптрий.*

7. Главное фокусное расстояние линзы  $F = 16 \text{ см}$ ,  $d = 36 \text{ см}$ . Найти  $f$  и увеличение линзы. *Отв. 28,8 см.*

8. Оптическая сила линзы равна  $16\frac{2}{3}$  диоптрий,  $d = 100 \text{ см}$ . Найти  $f$  и увеличение линзы. *Отв.  $\approx 6,4 \text{ см}$ .*

9.  $F = 12 \text{ см}$ ,  $d = 10 \text{ см}$ . Найти  $f$  и увеличение линзы.

*Отв. — 60 см.*

10. Оптическая сила линзы равна  $13\frac{1}{3}$  диоптрий. Где надо поместить предмет, чтобы получить мнимое изображение на расстоянии  $25 \text{ см}$ . *Отв.  $\approx 5,8 \text{ см}$ .*

11. Главное фокусное расстояние вогнутой линзы равно  $10 \text{ см}$ ,  $d = 12 \text{ см}$ . Найти  $f$ . *Отв. — 5,5 см.*

12. Оптическая сила линзы равна 4 диоптриям,  $d = 20 \text{ см}$ . Найти  $f$ . *Отв. — 1 м.*

13. По данным задач 7—10, 12—14 построить изображение предмета, взяв его в виде отрезка, перпендикулярного к главной оси.

**183. Проекционный фонарь.** Линзы применяются в проекционном фонаре. Проекционный фонарь имеет назначение давать на экране действительное, увеличенное изображение картины или предмета. Такое изображение может быть одновременно видимо большому собранию людей и на большом расстоянии. Рисунок 237 изображает схему фонаря; рисунок 238 — его общий вид; рисунок 233 даёт ход лучей в нём.

Главную часть фонаря составляет выпуклая линза  $S$  — объектив. Так как изображения должны быть действительные и увеличенные, то предмет должен помещаться за фокусом от линзы, но во всяком случае ближе двойного фокусного расстояния. Изображение должно быть сильно увеличено; при увеличении его линей-

ных размеров в 20 раз его площадь увеличивается в  $20^2 = 400$  раз и поэтому в 400 раз уменьшается освещённость его изображения. Чтобы изображение и при больших увеличениях оставалось достаточно хорошо освещённым, освещённость самого предмета должна быть чрезвычайно усилена. Этим обстоятельством объясняются все остальные подробности устройства фонаря.

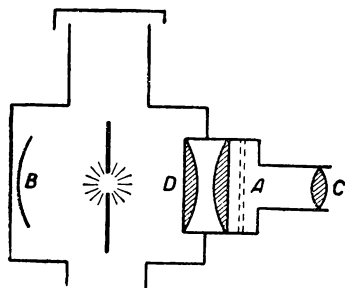


Рис. 237. Схема проекционного фонаря.

От всякого источника свет распространяется по всем направлениям, и значительная часть его пропадает бесполезно для освещения проектируемого предмета. Для улавливания части этой пропадающей энергии между источником света и предметом помещается „конденсор“ — совокупность собирающих на предмете сходящийся пучок лучей.

Устройство конденсора — сгустителя лучей — представлено на рисунке 237 под буквой D.

Иногда на задней стороне фонаря укрепляется вогнутое зеркало (B, рис. 237) так, чтобы источник света был в его центре.

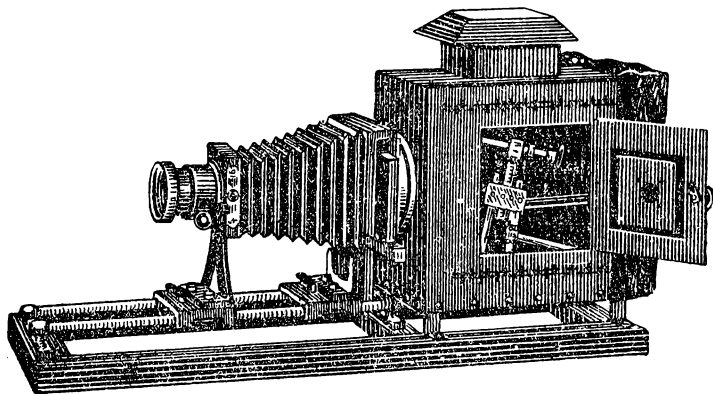


Рис. 238. Общий вид проекционного фонаря.

Его назначение — отражать в сторону предмета ту часть энергии, которая падает на заднюю часть фонаря. Итак, назначение объектива — давать изображение; назначение всех остальных частей — усиливать освещённость предмета до такой степени, чтобы



освещённость изображения, несмотря на увеличение его площади в сотни раз, оставалась достаточно большой.

Для получения на экране изображений непрозрачных предметов применяются особые приборы — эпидиаскопы.

**184. Фотографический аппарат.** Фотографический аппарат предназначен для производства фотографической съёмки. Основными частями его являются: камера, объектив-линза, обращённая к предмету, затвор и кассеты со светочувствительными пластинками.

Изображение большею частью получается уменьшенное, следовательно предмет помещается дальше двойного фокусного расстояния. Рисунок 239 изображает схему аппарата, а ход лучей дан на рисунке 231.

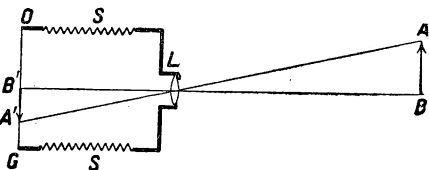


Рис. 239.

При наведении аппарата перемещается объектив аппарата до тех пор, пока на экране (в виде матового стекла), помещённого у задней стенки камеры, не получится изображение предмета.

Перемещение выполняется при помощи винтов и возможно потому, что боковые стенки аппарата сделаны в форме гармоника из непроницаемого для света материала. Когда наводка закончена, матовое стекло вынимается и в точности на его место вставляется к а с с е т а — плоский ящичек, непроницаемый для света, заключающий внутри себя светочувствительную пластинку. Передняя стенка кассеты, обращённая к объективу, открывается, когда объектив закрыт колпаком или ширмой. Самое снятие состоит в том, что колпак с объектива удаляется или ширма механически отодвигается на то или другое время, в зависимости от силы света, и на пластинке получается световое изображение предмета. По окончании съёмки передняя стенка кассеты закрывается.

### Упражнение 24.

1.  $F$  объектива фонаря равно  $15\text{ см}$ ; расстояние объектива до экрана  $f$  равно  $1,6\text{ м}$ ; найти расстояние  $d$  предмета от объектива и увеличение.

Отв.  $d = 16,5\text{ см}$ ; увеличение почти в 10 раз.

2.  $F$  объектива равно  $18\text{ см}$ ; расстояние  $d$  предмета от объектива равно  $20\text{ см}$ ; найти расстояние экрана и увеличение.

Отв.  $f = 1,8\text{ м}$ ; 9 раз.

3.  $F$  объектива равно  $30\text{ см}$ , и изображение получается на расстоянии  $8,65\text{ м}$ . Как надо передвинуть предмет, чтобы изображение получить на расстоянии  $12,25\text{ м}$ ?

Отв. На  $0,3\text{ см}$  к объективу.

4.  $F$  объектива равно  $40\text{ см}$ . На каком расстоянии поставлен предмет, если линейное увеличение равно 20?

Отв.  $42\text{ см}$ .

5. Каково  $F$  объектива, если предмет поставлен на расстоянии 18 см, а увеличение равно 10? *Отв.* 16,4 см.

6. Линза проекционного фонаря имеет  $F = 16$  см. На каком расстоянии надо поставить диапозитив от линзы, чтобы его изображение проектировалось на экран, находящийся на расстоянии 2,16 м? Каково увеличение изображения? *Отв.* 17,3 см.

7. Экран предыдущей задачи поставлен на расстоянии 1,6 м. В какую сторону и насколько надо переместить от линзы диапозитив, чтобы получить отчётливое изображение? *Отв.* 0,5 см.

8. Высота здания на фотографическом снимке равна 5 см. Фокусное расстояние объектива равно 20 см. Аппарат стоял при съёмке на расстоянии 5 м от здания. Найти высоту здания. *Отв.* 18 м.

9. Для воздушной разведки с самолёта на высоте 3000 м требуется получить снимки с местности в масштабе 1 : 5000. Каково должно быть фокусное расстояние объектива? *Отв.* 60 см.

**185. Получение снимка.** Светочувствительная пластинка изготавлиется следующим образом: растворяют желатину и бромистый калий или аммоний в воде и прибавляют (при красном свете) азотнокислое серебро; при этом образуется бромистое серебро, которое распределяется в желатине в мелко раздроблённом состоянии в виде эмульсии. Затем для увеличения светочувствительности эмульсия подвергается нагреванию. Застывшую после охлаждения эмульсию измельчают, промывают для удаления следов растворимых солей, расплавляют и поливают ею стеклянные пластинки.

**Проявление.** После съёмки светочувствительная пластинка вынимается из кассеты в темноте или при красном освещении и погружается в ванну с так называемым проявителем (проявители имеют различный химический состав). В проявителе выделяется мельчайший порошок металлического серебра только на тех местах пластинки, которые подвергались освещению, и притом густота выделения соответствует степени освещённости.

В качестве проявителя широкое распространение получил метологидрохиноновый. Один из рецептов его следующий: 1 л воды, 5 г метола, 100 г сульфита натрия, 7 г гидрохинона, 100 г погаша, 2,5 г бромистого калия. Взятая для проявления порция разбавляется трёх- или четырёхкратным количеством воды.

**Закрепление.** Чтобы устранить все следы серебра на неосвещённых местах, так как иначе при вынесении на свет и они подверглись бы химическому действию света, пластинка из проявителя переносится во вторую ванну с закрепителем (фиксаж), обычно с серноватокислым натрием — гипосульфитом, который даёт с бромистым серебром легко растворимое соединение, вымываемое из слоя при промывке его водой.

Из закрепителя пластинка выходит с тёмными слоями серебра на освещённых частях предмета и прозрачной — на неосвещённых. Короче говоря, светлые части предмета изображаются тёмными, тёмные — светлыми. Вследствие такой противоположности предмету полученный снимок называется негативом (рис. 240).

**Промывание.** После фиксирования пластинка подвергается тщательной промывке, чтобы смыть всякие следы проявителя и фиксажа и полученных солей. После промывания пластинка высушивается, и негатив готов.

**Печатание.** Для получения отпечатков с негатива к нему прижимается светочувствительным слоем бумага и выставляется на некоторое

время на свет. Светочувствительная бумага готовится так же, как и пластинка. Обработка её производится одинаково с пластинкой. Так как отпечаток на бумаге противоположен по распределению света и тени негативу, то он одинаков в этом отношении с предметом и называется *позитивом*.

Позитивы, изготовленные на стеклянной пластинке и предназначенные для проекционного фонаря, называются *диапозитивами*.

*Культурное значение фотографии.* Помимо запечатления лиц и сохранения их в памяти следующих поколений фото-

графия имеет большое научное значение. Редкие явления природы или неповторяемые случаи могут быть запечатлены фотографически. Так, фотография применяется постоянно при наблюдениях над Солнцем во время солнечных затмений, длящихся в течение нескольких минут. Исчезающие памятники старины или разрушающиеся предметы могут быть навсегда сохранены для изучения в фотографических снимках.

Лётчики, пролетающие большие пространства, лишены возможности делать измерения на тех местностях, над которыми они пролетают, но делаемые ими снимки позволяют потом произвести все необходимые вычисления. Фотография может дать изображение предметов, не видимых глазом по малой их яркости. Фотографический аппарат, присоединённый к астрономической трубе и вместе с ней вращающийся соответственно суточному вращению Земли в течение всей ночи, может получать длительное время энергию на одно и то же место от какого-нибудь слабого светила и дать его отпечаток, хотя бы оно само и оставалось невидимым для глаза. Вообще многое из того, что отделено пространством и временем, может быть запечатлено фотографическим снимком, разноможно и сделано достоянием масс в любом месте Земли.

**186. Кинематограф.** Кинематограф — это проекционный аппарат, в котором диапозитивом является движущаяся целлулоидная лента, на которой отпечатаны фотографические снимки (рис. 241). На прозрачной целлулоидной ленте делаются фотографические снимки с каких-нибудь движущихся тел в количестве 24 в секунду через равные перерывы в движении ленты. Когда эта лента вставляется в аппарат и приводится в движение мотором



*Позитив.*



*Негатив.*

Рис. 240.

с той же скоростью и с тем же числом перерывов в секунду, то на экране появляются изображения.

Так как глаз сохраняет впечатление до 0,1 сек., то мы видим

изображение ещё и тогда, когда его уже нет на экране; поэтому все изображения сливаются в одну целую картину, и перед зрителем воспроизводится движение. В этом — преимущество кинематографического снимка перед обыкновенной фотографией. В настоящее время производится запись не только изображений, но и звуков (звуковое кино).

### 187. Сферическая аберрация.

Сферическое стекло собирает в одной точке только узкий пучок лучей, падающих вдоль оптической оси. Чем дальше падает луч от оси, тем ближе к стеклу он пересекает ось после преломления (рис. 242). Пересечение преломлённых линзой лучей в разных точках называется сферической аберрацией<sup>1)</sup>.

При падении широкого пучка лучей аберрация делает изображение расплывчатым. Когда необходима резкость изображения, хотя бы за счёт уменьшения яркости его, перед объективом ставят диафрагму — непрозрачный экран с круглым отверстием посередине, выделяющий пучок лучей желательного диаметра.

188. Хроматическая аберрация. При прохождении белого<sup>2)</sup>

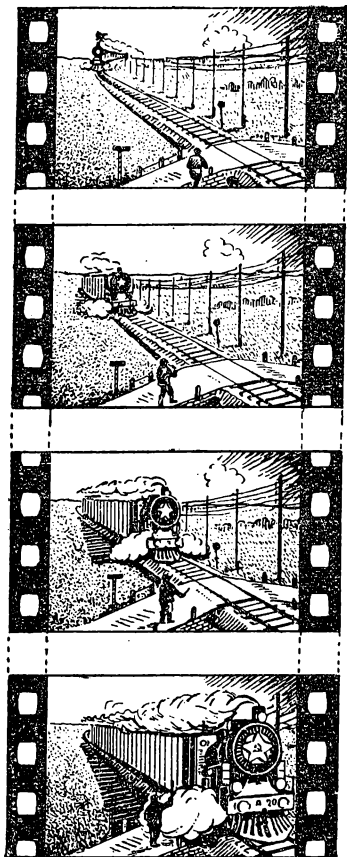


Рис. 241. Образчик фильма (кадры выбраны с промежутками).

1) Сферическая аберрация происходит и в вогнутом сферическом зеркале: крайние лучи, параллельные главной оси, после отражения от него пересекают главную оптическую ось в точках, лежащих между главным фокусом и зеркалом.

2) Из начального курса физики известно, что белый свет состоит из многих цветных лучей, причём стекло для лучей различной цветности имеет различные показатели преломления.

света через линзу фиолетовые лучи преломляются сильнее всех и собираются в точке ближе всего к стеклу; красные — слабее всех и собираются в точке дальше всего от стекла; остальные цветные лучи собираются по порядку между этими точками (рис. 243). Это явление называется хроматической абберацией. Результатом хроматической абберации является то, что края изображения в линзе получают радужную окраску. В самом деле, если поставить экран к линзе ближе фиолетового фокуса, то, как видно из чертежа,

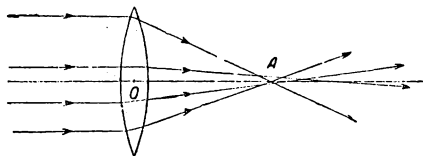


Рис. 242. Сферическая абберация.

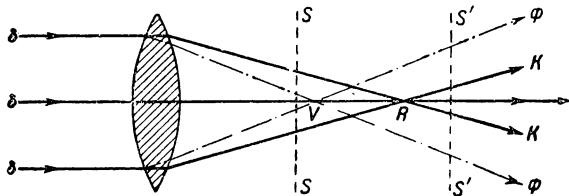


Рис. 243. Хроматическая абберация.

все лучи, кроме наружных красных, будут смешиваться на экране, давая белый свет, красные же дадут наружную красную окраску; если же отодвинуть экран за красный фокус, то дадут окраску наружные фиолетовые лучи.

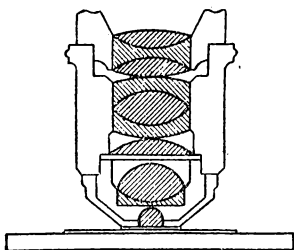


Рис. 244. Сложный объектив микроскопа.

Хроматическая абберация является крупным недостатком изображения. Она может быть устранена соответствующим подбором нескольких выпуклых и вогнутых линз из сортов стекла с различными показателями преломления. Поэтому объективы и окуляры современных оптических приборов представляют собой очень сложные системы многих линз (рис. 244).

### **ВОПРОСЫ ДЛЯ ПРОВЕРКИ УСВОЕНИЯ.**

1. Что называется сферическим зеркалом?
2. Что называется главной оптической осью зеркала?
3. Что называется главным фокусом сферического зеркала?
4. Какие изображения даёт вогнутое сферическое зеркало?

5. Какое изображение даёт выпуклое сферическое зеркало?
6. Что называется сопряжёнными точками сферического зеркала?
7. Какова формула сферического зеркала?
8. Что называется выпуклой линзой? вогнутой?
9. Что называется главной оптической осью линзы?
10. Что называется оптическим центром линзы?
11. Что называется побочной осью линзы?
12. Что называется главным фокусом выпуклой линзы? вогнутой?
13. Что называется главным фокусным расстоянием?
14. Что называется сопряжёнными точками линзы?
15. Какова формула выпуклой линзы? вогнутой?
16. Сколько надо лучей для построения изображения светящейся точки в линзе?
17. Какими лучами проще всего построить изображение точки?
18. Построить изображения в выпуклой линзе и определить качества изображения для случаев:  $d > 2F$ ;  $d = 2F$ ;  $F < d < 2F$ ;  $d = F$ ;  $d < F$ .
19. Оценить увеличение для всех случаев предыдущего вопроса.
20. Проследить перемещение изображения и изменения его размера при изменении расстояния предмета от  $d = \infty$  до  $d = 0$ .
21. Какими способами можно измерить главное фокусное расстояние выпуклой линзы?
22. Чем измеряется оптическая сила линзы?
23. Что такое диоптрия?

**189. Глаз как оптический аппарат.** Для восприятия света в животном организме имеется особый орган — глаз. Рисунок 245 изображает главные части человеческого глаза.

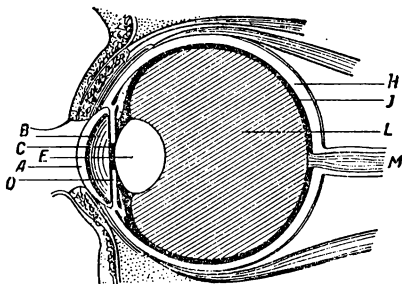


Рис. 245. Разрез в горизонтальной плоскости глазного яблока.

Внешняя оболочка глаза хрящевидная склеротика  $H$ ; передняя часть её выпуклая и прозрачная — роговая оболочка  $A$ . Внутренняя оболочка, в которой разветвляются кровеносные сосуды, питающие глаз, — сосудистая оболочка  $J$ , передняя часть её (разного цвета у разных людей) — радужная оболочка  $D$ ;

в радужной оболочке отверстие — зрачок  $C$ .

За радужной оболочкой — двояковыпуклая линза — хрусталик  $E$ ; он окружён мышцей, которая его поддерживает и может сжимать.

Пространство между роговой и радужной оболочками заполнено водянистой влагой  $B$ , а за хрусталиком — прозрачным стекловидным телом  $L$ .

Сзади, через оболочки, входит зрительный нерв  $M$ , соединяющий глаз с мозгом. Зрительный нерв, разветвляясь, устилает всю заднюю часть глаза и образует сетчатую оболочку, или ретину. Место входа нерва нечувствительно к свету и называется слепым пятном. На некотором расстоянии от слепого пятна в сторону виска лежит наиболее чувствительная часть ретины — *жёлтое пятно*.

Передний главный фокус глаза лежит на расстоянии 13,75 мм от роговой оболочки<sup>1)</sup>.

Оптический центр глаза лежит внутри хрусталика у самой задней поверхности его. Прямая, проходящая через оптический центр глаза и середину жёлтого пятна, называется оптической осью глаза, или глазной осью. При приведённом выше фокусном расстоянии предмет всегда находится за двойным фокусным расстоянием, и две выпуклые преломляющие среды — *водянистая влага* и главным образом *хрусталик* — *обращают расходящиеся от предмета лучи в сходящиеся и дают действительное, обратное, уменьшенное изображение предмета, лежащее между внутренним главным фокусом и точкой на двойном фокусном расстоянии. Отчётливое видение предмета происходит в том случае, когда изображение предмета падает на сетчатую оболочку (ретину) глаза.*

При разборе свойств линз было указано, что при перемещении предмета от бесконечности до двойного фокусного расстояния изображение перемещается от фокуса до двойного фокусного расстояния. Между тем для отчётливого видения предмета необходимо, чтобы изображение предмета всегда попадало на одно и то же место глаза — сетчатую оболочку, независимо от расстояния предмета. Такое постоянство в положении изображения достигается изменением самой оптической системы, изменением кривизны шаровых поверхностей и вследствие этого изменением фокусного расстояния. Если предмет в каком-либо положении даёт изображение на сетчатой оболочке, то при приближении его к глазу при неизменности оптической системы его изображение должно было бы уйти за глаз внутрь головы, ближе к точке на двойном фокусном расстоянии. Чтобы вернуть его на прежнее место, необходимо конец двойного фокусного расстояния приблизить к ретине; для этого необходимо уменьшить главное фокусное расстояние, а это уменьшение достигается увеличением

---

<sup>1)</sup> Показатель преломления роговой оболочки, водянистой влаги и стекловидного тела для средней части спектра (§ 213) равен 1,336; показатель преломления хрусталика равен в среднем 1,437 (хрусталик состоит из разнородных слоёв).

выпуклости хрусталика. Увеличение же выпуклости хрусталика осуществляется напряжением глазного мускула. Пока мускул бездействует, хрусталик имеет наименее выпуклую форму. При всяком напряжении мускула концы его, удерживающие хрусталик, сближаются: хрусталик уменьшается по направлению, перпендикулярному к глазной оси, но утолщается посередине, становится более выпуклым, и его главное фокусное расстояние уменьшается. При перемещении предмета происходит такое не зависящее от сознания изменение напряжения мускула и, следовательно, такое изменение кривизны хрусталика, что изображение предмета неизменно попадает на сетчатую оболочку.

*Способность глаза изменять кривизну хрусталика в такой степени, чтобы изображение предмета всегда попадало на сетчатую оболочку, называется аккомодацией.* Следовательно, получение на сетчатке резкого изображения от предметов, находящихся на различных расстояниях, возможно благодаря аккомодации, или приспособлению глаза к расстоянию.

Приспособление глаза к расстоянию не безгранично. Для каждого глаза есть дальняя точка, т. е. такое расстояние, на котором глаз видит предмет при спокойном состоянии мускула, и ближняя точка — расстояние, на котором глаз видит предмет при наибольшем напряжении мускула. Кроме того, различают ещё расстояние наилучшего зрения, т. е. такое расстояние предмета от глаза, на котором глаз видит наибольшее число различных подробностей этого предмета при наименьшем утомлении мускула. В зависимости от величины этих расстояний глаза делятся на три основные группы: нормальный, близорукий и дальнозоркий.

**190. Близорукость и дальнозоркость.** Глаз называется нормальным, если он без напряжения глазного мускула фокусирует на сетчатке поступающие в него пучки параллельных лучей. Таким образом можно сказать, что для нормального глаза его дальняя точка лежит в бесконечности. По мере приближения предмета к глазу глазной мускул должен всё больше напрягаться, чтобы предмет оставался видимым: ближняя точка в юношеском возрасте лежит на расстоянии 10 см; расстояние наилучшего зрения для него равно 25 см.

Близоруким называется такой глаз, в котором главный фокус при спокойном состоянии мускула лежит внутри глазного яблока (рис. 246). Такой глаз не может отчётливо видеть очень отдалённые предметы, так как при напряжении мускула главный фокус приближается к хрусталику, а не к сетчатке. Дальняя точка близорукого глаза лежит не в бесконечности, а на некотором



расстоянии. Расстояние наилучшего зрения и ближняя точка для близорукого глаза ближе, чем для нормального (в зависимости от степени близорукости). Фокус параллельных лучей в близоруком глазе получается ближе сетчатки. Чтобы для него получить фокус параллельных лучей на сетчатке при спокойном состоянии мускула, надо присоединить к нему рассеивающую вогнутую линзу соответствующей кривизны (очки) (рис. 247).

Дальновзорким называется такой глаз, в котором главный фокус при спокойном состоянии мускула лежит за глазным яблоком (рис. 248). Дальней точки для такого глаза не существует; ближняя точка — около 30 см; расстояние наилучшего зрения больше нормального. Дальновзоркий глаз преломляет слабее нормального; чтобы для него получить фокус параллельных лучей на сетчатке при спокойном состоянии мускула, надо присоединить к нему собирающую выпуклую линзу соответствующей кривизны (очки) (рис. 249).

### 191. Условия отчётливого видения.

**Угол зрения.** Первым условием отчётливого видения является *получение изображения на жёлтом пятне*. При рассматривании предмета мускулы так поворачивают глаз, чтобы на рассматриваемую точку попадала глазная ось. Если предмет большой, то его рассматривание производится по отдельным точкам, на которые переводится глазная ось. Это происходит потому, что жёлтое пятно, через середину которого проходит глазная ось, есть самое чувствительное к свету место глаза. Различная чувствительность разных частей сетчатки к свету зависит от различия анатомического строения их. Восприятие глазом света связано с химическими явлениями, происходящими с веществом сетчатки, которое разлагается при освещении, а в моменты перерыва освещения, в темноте, восстанавливается от питания кровью. Поэтому вторым условием видения должна

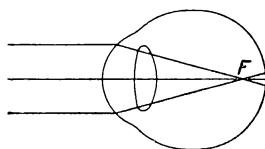


Рис. 246. Близорукий глаз.

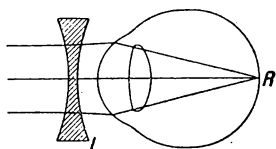


Рис. 247. Близорукий глаз с очками.

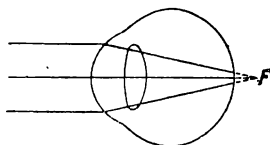


Рис. 248. Дальновзоркий глаз.

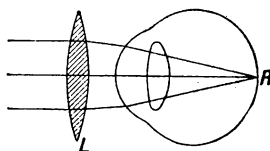


Рис. 249. Дальновзоркий глаз с очками.

быть такая *степень освещённости сетчатки*, которая была бы не ниже предела, необходимого для возбуждения химического явления.

Наконец, третье условие отчётливого видения состоит в том, чтобы *угол зрения предмета был не меньше предельного угла* (рис. 250). *Углом зрения называется угол между двумя прямыми, проведёнными от оптического центра глаза к концам предмета*. Две точки предмета остаются раздельно видимыми тогда, когда расстояние их изображений на жёлтом пятне не меньше 0,004 мм. В противном случае они сливаются в одну.

Этому предельному расстоянию соответствует угол около  $1'$ , который и является предельным углом зрения. Этот угол, под которым виден отрезок в 1 см на расстоянии 34 м от глаза.

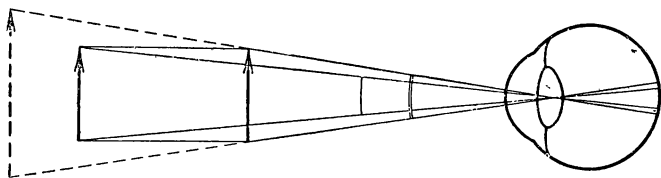


Рис. 250. К понятию об угле зрения.

Угол зрения увеличивается при приближении предмета к глазу, но границей этого приближения является ближняя точка; она ближе всего у близоруких, поэтому близорукие лучше остальных могут рассматривать мелкую печать, чертежи и другие мелкие предметы. Но человек с помощью своих оптических приборов научился увеличивать угол зрения при рассматривании или ничтожно малых, или чрезвычайно удалённых предметов. Микроскоп (§ 201) и телескоп (§ 202) служат для увеличения угла зрения.

Наиболее отчётливое видение предмета происходит в том случае, если изображение предмета падает на жёлтое пятно; но возможно также видение, если изображения предметов падают и на другие части сетчатки, окружающие жёлтое пятно. Принимая в расчёт все случаи видения, можно сказать, что всё поле зрения глаза несколько меньше двух прямых углов (около  $150^\circ$ ).

**192. Зрение двумя глазами.** При рассматривании какого-нибудь предмета получается по изображению в каждом глазу. Несмотря на пару изображений, мы видим один предмет, но только в том случае, если оба изображения приходятся на соответственные точки (по отношению к оси) той или другой сетчатки.

Предметы же, изображения которых падают не на соответственные точки ретины, дwoятся.

В этом можно убедиться, поместив два карандаша: один — близко к глазам, другой — подальше. Если смотреть, не сводя глаз, на первый, второй кажется двойным; если же пристально смотреть на второй, — дwoится первый (рис. 251).

При рассматривании всякого предмета в обоих глазах получают изображение, немного отличные друг от друга. Проще всего в этом убедиться, если, закрыв один глаз, поставить перед

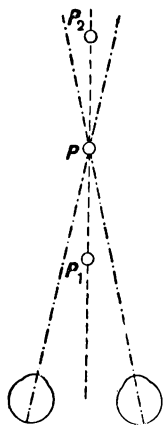


Рис. 251. Зрение двумя глазами.

Если смотрим на предмет  $P$ , то предметы  $P_1$  и  $P_2$  дwoятся.

другим два пальца так, чтобы передний закрывал задний. Если не меняя положения головы и пальцев, открыть первый глаз и закрыть второй, то пальцы уже не будут видимы на одной прямой. При всяком рассматривании группы расположенных в глубину предметов по очереди то одним, то другим глазом легко отметить различие в их относительном положении.

Пространственное, рельефное восприятие предметов возможно только в том случае, если в обоих глазах получают различные изображения предметов. Если сделать два фотографических снимка так, что один снимок даёт изображение предмета в том виде, как он воспринимается правым глазом, другой так, как он воспринимается левым, и рассматривать оба снимка через прибор стереоскопа, сводящий оба изображения в одно (рис. 252), то плоские снимки будут казаться рельефными.

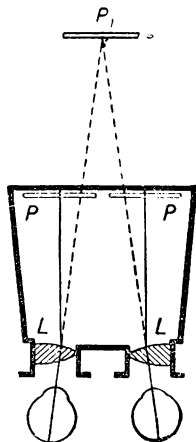


Рис. 252. Схема устройства стереоскопа.

Наоборот, когда в глазах изображения предметов становятся одинаковыми, то пространственно расположенные предметы начинают казаться плоскими. За пределами свыше половины километра мы видим местность как плоскую картину без глубины. Такое свойство глаза чрезвычайно затрудняет оценку относительного расстояния предметов вдали. О дальномерах, применяемых в военном деле, можно прочитать у Внук ова („Физика и оборона страны“, часть 2-я, стр. 54, „Стереотрубы“).

**193. Суждение о величине и удалённости предметов.** Суждение о величине и удалённости предметов основывается на получаемых от них изображениях и на том мышечном чувстве, которое сопровождает всякую работу мускулов по перемещению глазного яблока или изменению кривизны хрусталика. Степень правильности этого суждения повышается постепенно с приобретением опыта.

Если предметы находятся на одинаковом расстоянии, то об их относительной величине мы судим на основании того мышечного чувства, которое сопровождает перемещение глазной оси на разные точки того или другого предмета. Если два одинаковых предмета находятся на разных расстояниях, то суждение основывается на мышечном чувстве, сопровождающем аккомодацию.

При рассматривании разных предметов на разных расстояниях большое значение имеет именно зрение двумя глазами: при переводе глаз с близкого на более отдалённый предмет приходится по-разному перемещать глазные яблоки, чтобы главные оси всё время пересекались в одной точке. Различие мышечного чувства при этих перемещениях лежит в основе опытного суждения о размере и расстоянии предмета.

**194. Продолжительность зрительного впечатления.** Возбуждённое зрительное впечатление сохраняется в данном месте сетчатки и после того, как с него сошло изображение источника впечатления. При средней освещённости продолжительность зрительного впечатления длится около 0,1 сек., при большей может доходить до 1 сек. Это свойство обнаруживается во множестве повседневных явлений: быстро движущийся в темноте раскалённый уголёк оставляет за собой светлую линию; спицы быстро вращающегося велосипедного колеса сливаются в сплошную поверхность; если посмотреть на раскалённый волосок лампочки, то сохраняется световое впечатление и после закрытия век или перевода глаза на тёмную поверхность.

**195. Утомление глаза.** Если на одном и том же месте сетчатки долгое время получается изображение предмета, то чувствительность этого места уменьшается; при переводе глаза на менее освещённую поверхность, например белую стену, на освещение отзываются остальные части сетчатки, кроме утомлённой, и глазу видно на белом фоне тёмное изображение того же предмета. Так, переводя глаза со светящейся электрической лампочки на белую стену, можно видеть на стене тёмное изображение лампочки.

**196. Восприятие цветов.** По теории Гельмгольца, в глазу существуют три рода окончаний нервов, отзывающихся: один род — только на красные лучи; другой — только на зелёные; третий — только на фиолетовые. Пока попадает в глаз только один из перечисленных выше цветов, он и приводит в действие соответствующие окончания. Если же попадает какой-нибудь промежуточный луч, то он приводит в действие окончания нервов, отзывающиеся на оба основных соседних луча, притом в различной степени. Так, все цвета, лежащие в спектре между красным и зелёным, возбуждают те органы, которые отзываются на красное и зелёное, только в каждом случае в различной степени.

При попадании в глаз сложных цветных лучей отзываются одновременно в разных степенях все три рода окончечностей нервов.

**197. Чувствительность глаза к различным цветам.** Глаз не обладает одинаковой чувствительностью ко всем лучам спектра. Наибольшая чувствительность приходится на долю жёлто-зелёных лучей; чувствительность к крайним лучам спектра в 1000 раз меньше. Поэтому объективное (прибором) измерение распределения энергии в спектре <sup>1)</sup> отличается от субъективного его восприятия (глазом).

Распределение светлых и тёмных частей, а также степень их интенсивности на фотографическом снимке отличаются от распределения и степени интенсивности на самом предмете при рассматривании глазом, так как фотографическая пластинка чувствительнее всего к синим и фиолетовым цветам; глазу же кажется наиболее яркой средняя часть спектра.

**198. Цветовое утомление.** При действии на сетчатую оболочку каких-либо отдельных цветов она становится менее чувствительной к этим цветам — наступает цветовое утомление. Если глаз, утомлённый цветовым впечатлением, перевести на слабее освещённую белую поверхность, то утомлённые части сетчатки не будут отзываться на те цветные лучи, входящие в состав белого цвета, которые вызвали утомление, но отзовутся на совокупность всех остальных цветных лучей; получается изображение того же предмета, только окрашенного в дополнительный цвет.



Рис. 253. Иррадиация.

**199. Иррадиация.** При рассматривании ярко освещённого предмета на чёрном фоне он кажется всегда больше своих геометрических размеров; так, серп молодого месяца всегда кажется большего радиуса, чем остальная часть Луны, освещённая „пепельным“ светом; волосок светящейся лампочки — толще, чем ненакалённой; белый квадрат на чёрном фоне — больше, чем такой же чёрный на белом фоне (рис. 253). Увеличение размеров светлых предметов за счёт тёмного фона называется и р р а д и а ц и е й. Она объясняется тем, что раздражение сетчатой оболочки, вызванное изображением предмета, физиологически распространяется и на соседние части её за геометрическое изображение, и предмет кажется большим.

**200. Назначение оптических приборов.** Если бы человек пользовался непосредственно только своими глазами, то круг предметов, доступных рассматриванию, был бы очень ограничен: все малые предметы и все отдалённые предметы, для которых угол зрения меньше предельного, оставались бы недоступными для рассматривания.

Но человек сумел, пользуясь преломляющими свойствами стёкол и отражающими свойствами поверхностей, построить приборы, так называемые оптические, назначение которых состоит в увеличении угла зрения и, следовательно, в расширении круга предметов, доступных видению и изучению.

<sup>1)</sup> См. § 210.

Тот оптический прибор, который предназначен для рассматривания близких, но ничтожно малых предметов, называется микроскопом; тот же прибор, который предназначен для рассматривания хотя и больших, но настолько удалённых предметов, что их угол зрения всё же очень мал, называется телескопом<sup>1)</sup>.

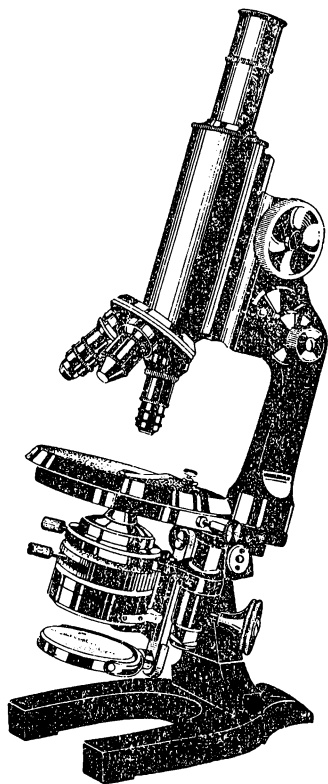


Рис. 254. Микроскоп.

Простейшим из микроскопов является обыкновенное собирающее стекло. Когда предмет ставится ближе фокуса, то, как известно, получается мнимое увеличенное изображение. При таком пользовании стекло получило название лупы.

Если лупа ставится перед предметом так, чтобы мнимое изображение получилось на расстоянии наилучшего зрения, т. е. для нормального глаза на  $d = 25 \text{ см}$ , то увеличение лупы равно  $\frac{25}{F}$ .

**201. Микроскоп.** Оптическая система микроскопа (рис. 254) состоит из двух линз: одной — обращённой к рассматриваемому предмету и называемой объективом, и другой — помещаемой со стороны глаза и называемой окуляром.

Обе линзы заключены в металлическую трубу — тубус.

Объектив — короткофокусная линза, окуляр — длиннофокусная.

Объектив должен дать действительное увеличенное изображение предмета, поэтому предмет помещается от объектива немого дальше фокусного расстояния. Изображение строится по правилу § 180 (рис. 255). Это первое изображение служит предметом для окуляра. Чтобы получить снова увеличенное изображение, окуляр помещается на таком расстоянии, чтобы изо-

<sup>1)</sup> По гречески *скопо* значит *смотрю*, *микрос* — малый, *теле* — далеко.

бражение  $A_1B_1$  лежало между окуляром и его главным фокусом. Проводя от каждой точки  $A_1$  и  $B_1$  по два луча (из числа указанных в § 178), можно построить по тем же правилам второе изображение  $A_2B_2$ . Оно будет мнимое, обратное относительно предмета и увеличенное. Тубус винтом перемещают до тех пор,

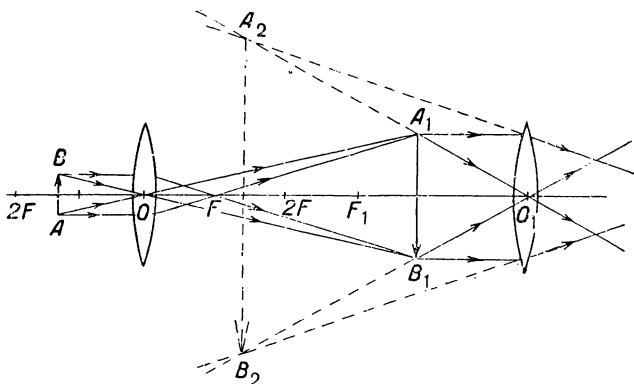


Рис. 255. Ход лучей в микроскопе.

пока мнимое изображение не окажется на расстоянии наилучшего зрения от глаза, следовательно, для нормального глаза — на расстоянии 25 см. Увеличение микроскопа может быть доведено до 3000 раз<sup>1)</sup>.

Если направить сбоку на рассматриваемый предмет очень сильный пучок света, то лучи, отражаясь от мельчайших частиц, могут попасть в объектив микроскопа и позволят обнаружить присутствие этих частиц.

Подобным же образом становятся видимыми в боковом направлении мельчайшие пылинки, носящиеся в комнате, при освещении их солнечным лучом. По их освещённости можно судить о размерах отражающих свет частиц. Таким способом можно обнаружить наличие и определить размер частиц с диаметром до 0,000005 мм, но форма и строение их неразличимы. Действующий так прибор называется ультрамикроскопом.

**202. Телескоп.** Телескопы, в которых увеличение достигается сферическими стёклами, называются рефракторами. Одним из первых рефракторов была астрономическая труба, устроенная

<sup>1)</sup> Полезное увеличение микроскопа не превышает 1000, так как при больших увеличениях мы видим лишь размазанную картину, усложнённую дифракционными фигурами, не имеющими никакого отношения к рассматриваемому объекту.

Кеплером в 1611 г. Схема трубы Кеплера сходна с микроскопом: две выпуклые линзы — объектив и окуляр (рис. 256).

Объектив трубы — длиннофокусный, окуляр — короткофокусный. Лучи, идущие от каждой точки предмета, могут быть приняты за параллельные. Пусть от верхней точки предмета идёт луч  $B$ . После преломления в объективе он пойдёт через фокус, лежащий на побочной оси почти на главном фокусном расстоянии. От нижней точки предмета идёт луч  $A$ . После преломления в объективе он пройдёт через фокус на своей побочной оптической оси, лежащий также почти на главном фокусном расстоянии. Таким образом, возле самого главного фокуса (за ним) объектива получается действительное, сильно уменьшенное, обратное

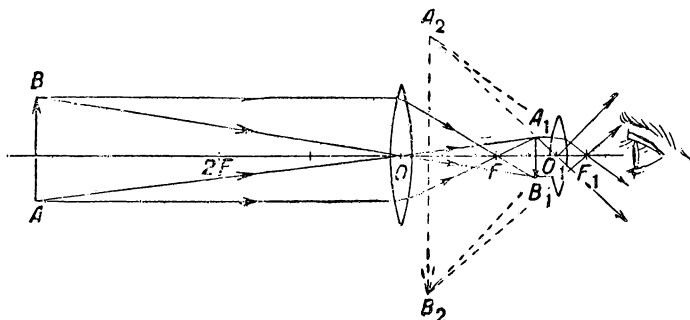


Рис. 256. Ход лучей в трубе Кеплера.

изображение предмета. Это действительное изображение рассматривается через окуляр, который помещается на таком расстоянии, чтобы первое изображение  $A_1B_1$  лежало между ним и его главным фокусом, а образованное окуляром мнимое изображение  $A_2B_2$  находилось от глаза на расстоянии наилучшего зрения.

При помощи телескопа предмет рассматривается под углом зрения  $A_2O_1B_2$ , тогда как для невооружённого глаза <sup>1)</sup> углом зрения является угол  $AOB$ . В зависимости от фокусного расстояния линз телескопа увеличение угла зрения соответствует приближению рассматриваемых тел в 1000 и более раз.

Благодаря этому на Луне, Солнце и планетах изучены такие подробности, какие без телескопа оставались бы совершенно неизвестными. Вследствие громадного расстояния звёзд они в телескопе остаются точками, но яркость их сильно возра-

<sup>1)</sup> Ввиду дальности расстояния размером трубы можно пренебречь и считать, что глаз помещён в точке  $O$ .



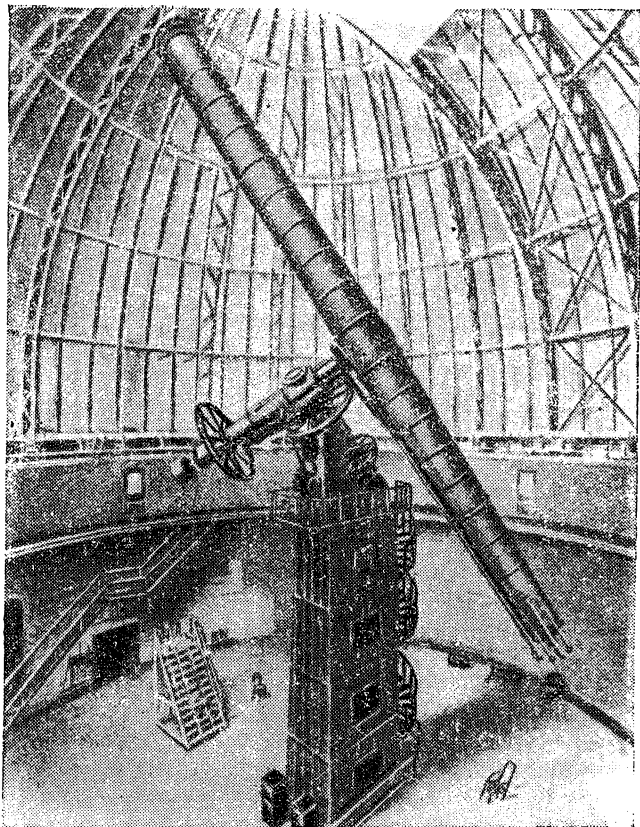


Рис. 257. Рефрактор.

стает, так как в одну точку собираются лучи, падающие на всю поверхность объектива телескопа.

Благодаря увеличению яркости через телескоп можно видеть сотни миллионов звёзд, тогда как невооружённый глаз различает их около 5000. Телескопы позволяют разделять на части так называемые звёздные скопления; они улавливают слабый свет туманностей. В соединении со спектроскопом и фотографическим аппаратом телескопы дают нам все разнообразные сведения о строении вселенной, раздвигая до очень отдалённых пределов видимый мир и обогащая научную мысль.

Рисунок 257 даёт изображение одного из современных рефракторов <sup>1)</sup>.

Немного раньше Кеплера, в 1609 г. Галилей изобрёл свою трубу. В ней окуляр состоит из вогнутой линзы; ход лучей изображён на рисунке 258. Изображение получается прямым

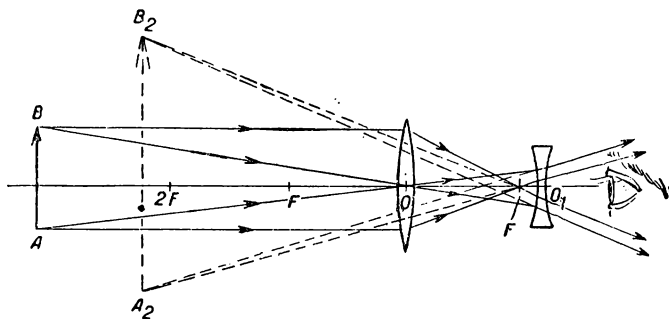


Рис. 258. Ход лучей в трубе Галилея.

по отношению к предмету — в этом состоит её преимущество перед трубой Кеплера при рассматривании земных предметов, которые неудобно наблюдать в перевёрнутом виде.

Соединение вместе двух галилеевых труб, дающее возможность одновременно рассматривать предмет двумя глазами, называется биноклем. Рисунок 259 изображает разрез трубы обыкновенного театрального бинокля.

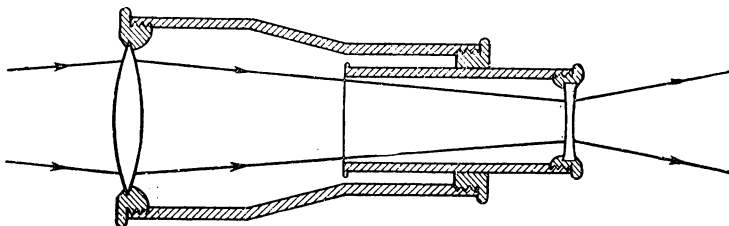


Рис. 259. Разрез театрального бинокля.

В настоящем столетии вошли в употребление так называемые призмные бинокли, в которых обращение изображения в прямой вид производится путём многократного полного вну-

<sup>1)</sup> В отличие от рефрактора телескоп, в котором первое изображение получается при помощи сферических зеркал, называется рефлектором.

ттенного отражения в призмах. Рисунок 260 даёт внешний вид бинокля, схему устройства и ход луча. Преимущество призмённого бинокля — более широкое поле зрения сравнительно с галилеевым биноклем и меньший размер при том же увеличении, чем у галилея бинокля. Благодаря этим своим преимуществам призмённые бинокли получили широкое применение в военном деле в качестве полевых биноклей.

Телескоп Максутава. В том же XVII веке, когда были построены первые линзовые телескопы — рефракторы, были изобретены и телескопы отражательные — рефлекторы. В них линзовый объектив был заменён

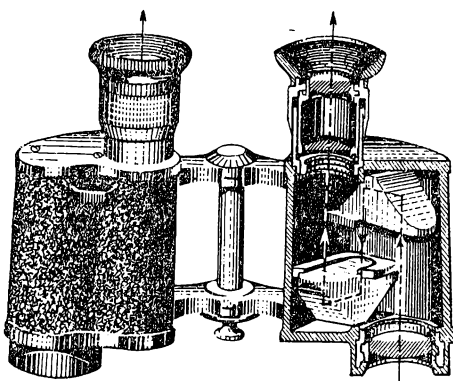


Рис. 260. Призмённый бинокль.

зеркальным. Обе системы связаны с большими трудностями в их изготовлении и с недостатками в их работе. Главными недостатками рефракторов являются хроматическая абберация (§ 188), большая длина и строгие требования к качествам стекла. Основным затруднением при изготовлении рефлектора была необходимость

чрезвычайной точности обработки стекла. Простое решение задачи устранения недостатков нашёл советский учёный Д. Д. Максут в 1941 г. Основной принцип устройства его телескопа состоит в исправлении сферической абберации зеркала сферической абберацией линзы (§ 187). Такое исправление возможно только в том случае, если

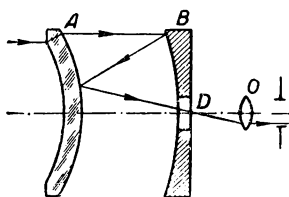


Рис. 260а.

абберации линзы и зеркала будут противоположны по знаку и равны по величине. Такому условию, по исследованию изобретателя, может удовлетворять только один вид линз — мениск<sup>1)</sup>, с небольшими радиусами кривизны и с очень малой разностью радиусов. Хроматической абберации в таком мениске практически

<sup>1)</sup> Мениском называется вогнуто-выпуклая и выпукло-вогнутая линза.

нет. Свой телескоп изобретатель назвал менисковым. Схема его устройства изображена на чертеже 260а. На нём *A* обозначает мениск, на который падают лучи света от наблюдаемого светила. Преломившись в мениске, луч падает на отражающую поверхность зеркала *B*. От зеркала луч падает на посеребрённую часть мениска, а оттуда через отверстие в зеркале на окуляр *O*. Школьные менисковые телескопы имеют отверстие диаметром в 7 см, длину в 18 см, увеличение в 70 раз. Строятся более крупные с отверстием в 0,5 м и с длиной в 1 м.

### **Упражнение 24а.**

В „Наставлении по стрелковому делу“<sup>1)</sup> при определении расстояния от стрелка до цели по глазомеру (стр. 296) сказано: „известно:

1) что предметы яркого цвета (белого, оранжевого) кажутся ближе, чем тёмного (синего, чёрного, коричневого);

2) что одноцветный, однообразный фон (луг, снег, пашня) выделяет и как бы приближает находящиеся на нём предметы, если они иначе окрашены, а пёстрый, разноцветный фон, наоборот, их удалит и как бы маскирует;

3) что в пасмурный день, в дождь, в сумерки, во время тумана и т. п. все расстояния кажутся увеличенными, а в светлый, солнечный день, наоборот, сокращёнными;

4) что в горной местности, при чистом воздухе, все видимые предметы как бы приближаются“.

Объяснить эти явления, привлекая к объяснению первый закон освещённости (при объяснении не упускать из вида, что изменение расстояний только кажущееся).

### **ВОПРОСЫ ДЛЯ ПРОВЕРКИ УСВОЕНИЯ.**

1. Описать главные части глаза.
2. Какие части глаза преимущественно влияют на ход лучей?
3. Что представляет собой хрусталик? Как он удерживается в глазу? От чего и как изменяется форма хрусталика?
4. Что такое ретина?
5. Что такое слепое пятно?
6. Что такое жёлтое пятно? Каково его положение и значение?
7. Какие изображения получаются в глазу при зрении?
8. Что такое аккомодация? Как она происходит?
9. Что такое дальняя точка? ближняя?
10. Что называется расстоянием наилучшего зрения?
11. Что называется углом зрения?
12. Каков предельный угол зрения? От чего он зависит?
13. Какие три условия отчётливого зрения?
14. Одинаковые ли изображения тела получаются в том и другом глазу?
15. При каком условии при зрении двумя глазами виден один предмет?

---

1) „Наставление по стрелковому делу РККА. Оружие стрелкового звзда“. Госвоениздат, Москва, 1943.

16. Какое основное назначение микроскопа и телескопа?
17. Какая линза оптического прибора называется объективом?
18. Какая линза оптического прибора называется окуляром?
19. Описать устройство и ход лучей в микроскопе.
20. Описать устройство и ход лучей в трубе Кеплера.
21. Описать устройство и применение трубы Галилея.

## II. ПРИРОДА СВЕТА.

**203. Интерференция света.** Зажжём газовую или спиртовую горелку и поместим в её пламя кусочек асбеста, смоченного в растворе поваренной соли, чтобы получить однородный жёлтый цвет. Возьмём две стеклянные пластинки (достаточно размер  $60 \text{ мм} \times 30 \text{ мм} \times 2 \text{ мм}$ ). Очень сильно сожмём их пальцами и увидим в отражённом от них изображении жёлтого пламени чередование жёлтых и тёмных полос. Получается неожиданная картина: в некоторых местах *свет гасится светом* (рис. 261).

Это явление напоминает гашение звука звуком в опытах с интерференцией звука.

Гашение света светом также является следствием интерференции света.

Интерференция может происходить только при наложении волн.

Следовательно, описанный простой опыт с интерференцией света служит доказательством того, что *причиной света является волнообразное движение.*

Кроме описанных опытов, интерференцию света можно получить следующим образом. Если к плоской пластинке зеркального стекла приложить выпуклую линзу с очень большим радиусом (с малой кривизной) и осветить дуговым фонарём, закрытым красным или каким-либо другим цветным стеклом, то при проектировании на экран проходящим светом можно наблюдать в центре изображения цветное пятно, окружённое чередующимися тёмными и цветными кольцами.

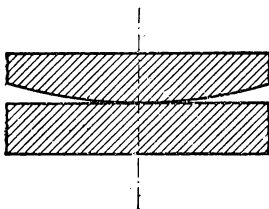


Рис. 262. Прибор для получения колец Ньютона.

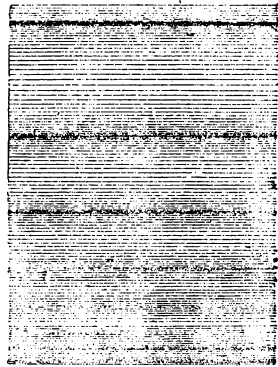


Рис. 261. Интерференционные полосы при освещении однородным светом мыльной плёнки.

В отражённом свете в центре получается тёмный круг, за которым располагаются цветные и тёмные кольца (так называемые кольца Ньютона) (рис. 262 и 263).

Если заменить красное стекло зелёным, затем фиолетовым, то можно наблюдать, что ширина цветных и тёмных полос в зелёном свете меньше, чем в красном, в фиолетовом —

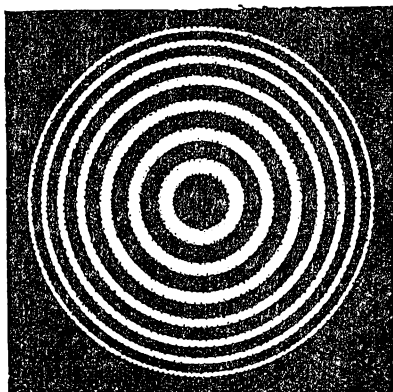


Рис. 263. Интерференционные кольца Ньютона в отражённом свете.

меньше, чем в зелёном. Из этого опыта можно заключить, что спектральные цвета вызываются волнами, чем-то отличающимися друг от друга. Это отличие состоит, как это будет вытекать из последующего изложения, в различии длин волн.

Легко предвидеть, что при освещении прибора белым светом можно наблюдать совокупность колец всех спектральных цветов, что и подтверждается опытом.

Такие же интерференционные спектральные полосы можно наблюдать при освещении белым светом тончайших плёнок керосина или масла, расплывшихся по поверхности воды, или на мыльных плёнках (мыльная пена, мыльные пузыри).

**204. Световая волна. Луч.** Интерференция света прочно устанавливает волнообразный характер тех процессов, которые производят световые явления. Свет распространяется совершенно свободно в межпланетном пространстве, в котором нет вещества, входящего в состав изучаемых в физике и химии тел, и также свободно распространяется через внутренние полости стеклянных трубок, из которых выкачан воздух с возможно высокой степенью разрежения.

Волновая теория света учит, что вокруг всякого точечного источника света, например малой вольтовой дуги, маленького волоска лампы накаливания, распространяются сферические (шаровые) волны (рис. 264). Каждая сферическая поверхность заключает точки, находящиеся в одной фазе колебания.

Если провести концентрические сферические поверхности через точки одинаковых фаз, то расстояние по радиусу между двумя такими поверхностями называется длиной волны. Перпен-

дикуляр к поверхности сферы (нормаль) называется лучом  $m^1$ ). Если источник света находится от места наблюдения на очень большом расстоянии, то небольшая часть сферической волны неизмеримо мало отличается от плоскости, и тогда волна называется плоской. В случае плоской волны все лучи параллельны.

**205. Объяснение интерференции света.** Установив характер световых колебаний и относящиеся сюда термины, попытаемся пояснить явление интерференции  $^2$ ), с которого мы начали изучение световых явлений.

Если взять чрезвычайно тонкую стеклянную пластинку с параллельными гранями и осветить её параллельными лучами какого-либо одного цвета, то рассматриваемая в отражённых или проходящих лучах пластинка при изменении наклона лучей будет казаться то более светлой, то более тёмной.

Параллельные лучи (рис. 265), падающие на пластинку и проходящие внутрь стекла, испытывают на гранях пластинки многократное отражение; поэтому по любому направлению, например по направлению  $DS''$ , могут выйти из пластинки два луча:

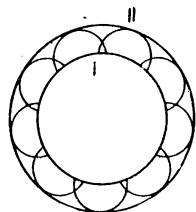


Рис. 264. Огибающая элементарных волн (по принципу Гюйгенса) — § 208 в сечении.

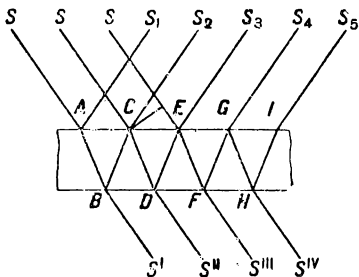


Рис. 265. Объяснение интерференции в тонкой пластинке.

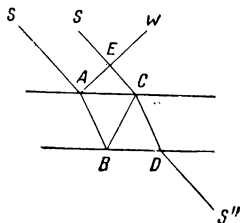


Рис. 266.

один луч  $SC$ , параллельный  $SA$ , преломившийся по линии  $CD$  и выходящий по  $DS''$ ; другой  $SA$ , преломившийся по  $AB$  и дважды отразившийся в точках  $B$  и  $C$ , также выходящий по направлению  $DS''$ .

$^1$ ) В изотропной среде, т. е. в среде, свойства которой одинаковы по всем направлениям.

$^2$ ) Объяснение интерференции дано Юнгом в 1807 г.

Так как лучи параллельны, то фронт волны плоский, перпендикулярный к направлению лучей, имеет направление  $AW$  (рис. 266). В то время как волна, падающая в точку  $A$ , проходит до точки  $C$  путь  $AB + BC$ , волна, падающая в  $C$ , проходит только отрезок  $EC$ . Надо заметить, что волна в воздухе идёт со скоростью  $v$ , а в стекле — со скоростью  $v_1 = \frac{v}{n}$ , где  $n$  — показатель преломления стекла (§ 166, 209). Поэтому длине пути волны в стекле  $AB + BC$  будет соответствовать путь в воздухе, равный  $n(AB + BC)$ . Если на фронте  $AW$  колебания в  $A$  и  $E$  имеют одинаковую фазу, то, встречаясь опять в точке  $C$ , до которой они проходят различные пути, они могут получить различные фазы. Если волнообразное движение в одном луче отстаёт от другого на целую длину волны, то обе волны в точности совпадают по своим фазам, амплитуда результирующего колебания будет более амплитуд слагаемых колебаний, и яркость проходящего света получается наибольшая. Если же на лишнем пути  $[n(AB + BC) - EC]$  одна волна отличается от другой на половину длины волны, т. е. фазы их противоположны, то колебания взаимно уничтожаются, их общая амплитуда наименьшая и пластинка кажется наименее яркой.

Изменять разность хода можно, или изменяя наклон лучей к пластинке, или изменяя толщину пластинки <sup>1)</sup>.

Интерференция в опыте с кольцами Ньютона или в нашем первоначальном опыте <sup>2)</sup> объясняется по предыдущему; причём она зависит от изменения толщины воздушного промежутка между обоими стёклами.

При освещении пластинки или сферического стекла белым светом получаются цветные полосы или кольца (цвет мыльных пузырей, масляной плёнки, расплывшейся по поверхности воды).

Возникновение цветных полос объясняется тем, что скорость распространения и длины волн лучей разного цвета в данном веществе различны. Поэтому условия наложения волн разной длины в одном и том же месте пластинки тоже различны. Если в одном месте пластинки произойдёт совпадение фаз у волн

<sup>1)</sup> Явление интерференции в тонких пластинках впервые наблюдалось в 1665 г.

<sup>2)</sup> Подобным же образом объясняется и интерференция в отражённом свете; только надо при этом помнить, что к разности хода, полученной при разных путях и разных скоростях в воздухе и стекле, в этом случае присоединяется потеря полуволны на границе более плотной среды — стекла. Явление интерференции лучше наблюдать в отражённом свете, так как в проходящем свете один из интерферирующих лучей очень ослаблен вследствие двойного отражения.



одной длины, а в другом месте — волн другой длины, то в этих двух местах и видимая окраска пластинки будет разная.

**206. Поляризация света.** Установив волновой характер световых явлений, надо выяснить, поперечные или продольные колебания распространяются в световой волне.

На этот вопрос отвечает следующая группа опытов.

Пучок параллельных лучей  $L$  бросается под углом падения в  $55^\circ$  <sup>1)</sup> на стеклянную пластинку  $P$  с зачёрнённой задней стороной (рис. 267).

Падающий пучок разложится на пучок отражённых лучей  $M$  и пучок преломлённых в стекле, которые поглотятся в слое чёрной краски.

Отражённый луч  $M$  получил теперь новое свойство, которым не обладал луч  $L$ .

Как известно, луч, идущий непосредственно от источника света, способен отражаться от поверхности при любом угле падения.

Луч же  $M$ , однажды отражённый от поверхности под углом в  $55^\circ$ , отразится от второго зеркала  $A$  только в том случае, если плоскости падения в обоих зеркалах совпадают (положение  $I$  и  $III$ , рис. 267), и более всего ослабляется, если плоскости падения взаимно перпендикулярны <sup>2)</sup>.

Описанный опыт показывает, что в луче  $M$  возникла какая-то односторонность, вследствие чего при обращении луча  $M$  одной стороной ко второму зеркалу происходит явление вторичного отражения; при обращении же его другой стороной отражение прекращается.

Эта односторонность луча была открыта в 1808 г. Малюсом (1775—1812) и была названа поляризацией света.

Такая односторонность свойств светового луча свидетельствует о поперечности световых колебаний.

При продольности колебаний, т. е. при направленности колебаний вдоль светового луча, явление не может зависеть от того, какой стороной световой пучок обращён к отражающей поверхности.

Это обстоятельство мы можем легко понять, если возьмём какой-нибудь пример упругих поперечных колебаний, например колебание резинового шнура. Приготовим из досок две решётки со щелями такой ширины, чтобы через них свободно проходил шнур. Если поставим решётки вертикально (рис. 268), пропустим сквозь них шнур и вызовем в нём вертикальные поперечные колебания, то волна этих колебаний свободно распространится за обе решётки. Если же вторую из них повернуть горизонтально, то колебания шнура, пропущенные первой, будут погашены второй щелью.

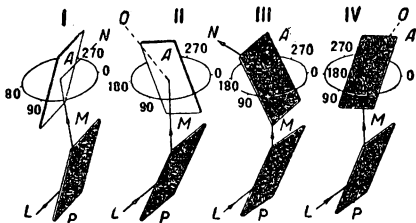


Рис. 267. Поляризация света вследствие отражения от стеклянной пластинки.

<sup>1)</sup> При других углах падения явление будет таким же, но проявится в менее отчётливой форме.

<sup>2)</sup> При промежуточных положениях зеркал наблюдается частичное ослабление вторично отражённого луча.

Если вызвать в шнуре продольные колебания, то они одинаково будут проходить через обе щели, какое бы положение относительно друг друга щели ни имели.

Волновая теория света объясняет явление следующим образом. В естественном луче света колебания происходят по всем возможным направлениям. Поэтому все направления, перпендикулярные к лучу света, являются в оптическом отношении совершенно равноправными, совершенно одинаковыми.

При первом отражении из всех возможных поперечных колебаний выделяется колебание только одного определённого направления.

Выделение из всевозможных направлений поперечных колебаний одного определённого направления и называется поляризацией света.

Свет с одним определённым направлением поперечных колебаний называется поляризованным светом.

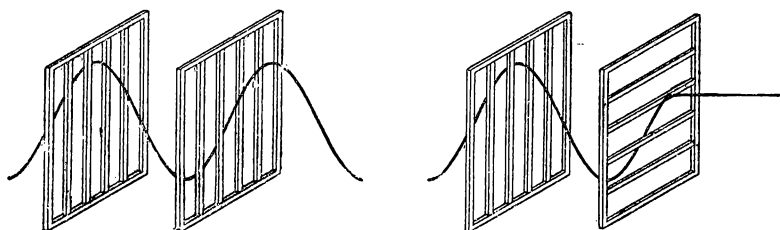


Рис. 268. Модель поляризации колебаний.

Волновая теория приняла, что плоскость световых колебаний, поляризованных первым отражением, перпендикулярна к плоскости падения. Про такую поляризацию говорят так: свет поляризован в плоскости падения (рис. 267).

Поляризованный луч может отразиться от второго зеркала, если его колебания будут перпендикулярны к плоскости падения на второе зеркало, и погаситься, если они будут параллельны ей.

Зеркало позволяет определить: поляризованный или неполяризованный свет падает на него. Если луч отражается от него при всяких углах падения, луч до зеркала неполяризован; если же отражение происходит при одних положениях зеркала относительно луча, а при других — гашение, то падающий луч поляризован. В этом случае зеркало служит анализатором.

Итак, явление поляризации дало определённый ответ на поставленный вопрос: *свет есть волнообразное распространение поперечных колебаний.*

**207. Поляризация света при преломлении.** *Поляризацию луча света можно вызвать не только отражением, но и преломлением.*

Если отражение под углом в  $55^\circ$  от стеклянной пластинки выделяет в отражённый пучок лучи, поляризованные в плоскости падения, то пучок преломлённых в стекле лучей, как лишённый хотя бы отчасти указанных выше колебаний, тоже оказывается поляризованным, но не так полно, как отражённый пучок.

Более полная поляризация достигается при многократных преломлениях через стопу из 10—20 стеклянных пластинок.

По выходе из такой стопы лучи поляризованы в плоскости, перпендикулярной к плоскости падения; значит, колебания лежат в плоскости падения (рис. 267).

Такая стопа пластинок может служить как поляризатором, так и анализатором (рис. 269).

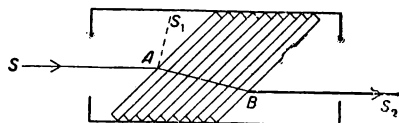


Рис. 269. Стопа тонких пластинок — поляризатор.

## 208. Принцип Гюйгенса.

Познакомившись с явлениями, которые привели к созданию волновой теории света, попытаемся объяснить на основе этой теории некоторые из световых явлений, разобранные выше. Объяснение их производится при помощи приёма, данного Гюйгенсом.

Пусть шаровая поверхность  $I$  рисунка 264 охватывает точки, имеющие в данный момент колебания одну и ту же фазу. Через некоторый промежуток времени  $t$  поверхность волны, проходящая через те же фазы, займёт в пространстве новое положение  $II$ . Гюйгенс предложил рассматривать переход поверхности волны из одного положения в другое следующим образом. Если известно положение поверхности волны для какого-нибудь мгновения, то все точки этой поверхности принимаются за центры новых колебаний, которые за время  $t$  распространятся от этих центров новыми шаровыми волнами на расстоянии  $ct$ , где  $c$  — скорость распространения колебаний.

Эти волны называются элементарными волнами. Эти элементарные волны, приходящие в любую точку пространства из разных точек прежней поверхности волны, интерферируют между собой. Те из пришедших в рассматриваемую точку колебаний, фазы которых совпадают, усиливают друг друга; при всяком расхождении фаз они в той или другой степени гасятся. Подробное построение хода волн и разбор их фаз (что мы оставляем без рассмотрения) показывают, что новый волновой фронт, на котором колебания имеют одинаковую фазу, представляет собой поверхность, касательную (или, как называют её, „огibaющую“) ко всем воображаемым шаровым поверхностям, проведённым из отдельных точек. Данный Гюйгенсом способ нахождения нового фронта волны называется принципом Гюйгенса.

Принцип Гюйгенса в связи с интерференцией позволяет понять возможность прямолинейного распространения света при наличии волнообразного движения, составляющего основу световых явлений.

Объясним при помощи принципа Гюйгенса и на основании волновой теории света законы отражения и преломления света.

**209. Объяснение отражения и преломления света волновой теорией.** От светящейся точки идёт сферическая световая волна с поперечными колебаниями. Если светящаяся точка находится на бесконечно большом расстоянии, то каждый отдельный небольшой участок волны будет плоскостью. Направление распространения волны в каждый момент перпендикулярно (нормально) к поверхности волны.

Пусть на границе двух разнородных сред  $XU$  (рис. 270) падает волна из бесконечно удалённого источника; тогда поверх-

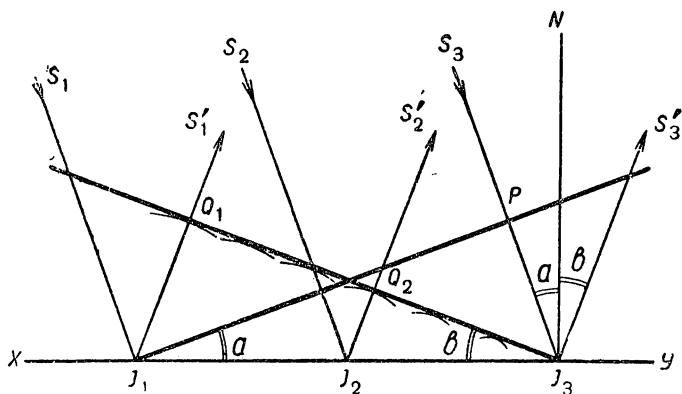


Рис. 270. Объяснение отражения света по волновой теории.

ность её будет плоская и в сечении плоскости рисунка даст линию  $I_1P$ . Все точки границы, до которых дошла волна, приходят в колебание и сами становятся центрами сферических волн.

Эти волны отчасти распространяются в той же первой среде, откуда они падают на границу, отчасти переходят во вторую среду.

Проследим сперва за волнами в первой среде (рис. 270).

Падающая плоская волна с поверхностью  $I_1P$  (в сечении), подвигаясь параллельно себе вперёд, последовательно затронет точки  $I_1, I_2, I_3$  поверхности  $XU$ . Пока колебания проходят путь  $PI_3$ , все точки прямой, перпендикулярной к плоскости чертежа и проектирующей в точку  $I_1$ , сделаются центрами вторичных волн. Сечение одной из этих волн изображено на рисунке; радиус этой сферической волны  $I_1Q_1$ ; он равен расстоянию  $PI_3$  ( $I_1Q_1 = PI_3$ ). Точки  $I_2$  (середины расстояния  $I_1I_3$ ) дадут

волны, радиус которых будет вдвое меньше предыдущего ( $I_2Q_2 = \frac{1}{2}PI_3$ ), и т. д. В точке  $I_3$  возникновение новой волны ещё не начнётся (радиус равен нулю).

Из рисунка видно, что вся система образовавшихся сферических волн огибается плоскостью, перпендикулярною к рисунку и дающей в сечении прямую  $I_3Q_1$ . Эта плоскость и будет фронтом отражённой волны.

Перпендикуляры к ней  $I_1S'_1$ ,  $I_2S'_2$ ,  $I_3S'_3$  показывают направления отражённых лучей. Прямоугольные треугольники  $I_1Q_1I_3$  и  $I_1PI_3$ , имеющие по две равные стороны, равны между собою. Следовательно,  $\angle PI_1I_3 = \angle Q_1I_3I_1$ . Но угол  $PI_1I_3 = S_3I_3N = a$ , а угол  $Q_1I_3I_1$  равен углу  $S'_3I_3N = b$  как углы с перпендикулярными сторонами.

Угол  $a$  равен углу падения лучей, угол  $b$  — углу отражения лучей. Из предыдущего получается равенство углов отражения и падения, т. е. получается второй закон отражения.

Обратимся теперь к явлению преломления (рис. 271). Волны во второй среде распространяются со скоростью  $c_2$ , отличной от скорости  $c_1$  в первой среде (например,  $c_2 < c_1$ ). В то мгновение, когда волна дошла до  $I_1$ , от этой точки отделилась новая сферическая волна; за время  $t$ , в течение которого первая плоская волна  $I_1P$  прошла путь  $PI_3 = c_1t$ , из точки  $I_1$  успела отойти волна на расстояние  $I_1Q = c_2t$ . Каждая точка поверхности  $I_1I_3$  становится также центром новой сферической волны в последовательные промежутки времени, но радиусы этих волн для одного и того же момента убывают пропорционально расстояниям точек от  $I_3$ . Всё бесконечное множество этих сферических волн имеет общую касательную  $QI_3$ , которая и будет фронтом преломлённой волны. Сравнивая направления распространения волн (лучей) в первой среде  $S_1I_1$  и во второй  $I_1S'_1$ , можно видеть происшедшее преломление луча. Так как  $\angle I_3I_1P = \angle a$  (углу падения), а  $\angle I_1I_3Q = \angle i$  (углу преломления), то  $PI_3 = I_1I_3 \sin a$  и  $QI_1 = I_1I_3 \sin i$ , откуда:

$$\frac{PI_3}{QI_1} = \frac{I_1I_3 \sin a}{I_1I_3 \sin i} = \frac{c_1t}{c_2t}; \quad \frac{\sin a}{\sin i} = \frac{c_1}{c_2}.$$

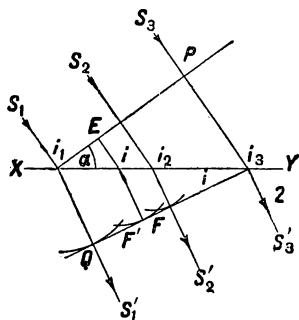


Рис. 271. Объяснение преломления света по волновой теории.

Отсюда видно, что *показатель преломления есть отношение скорости распространения волны в первой среде к скорости распространения её во второй среде*, что подтверждается опытом.

Всякий раз, как происходит изменение скорости на границе двух сред, меняется направление движения.

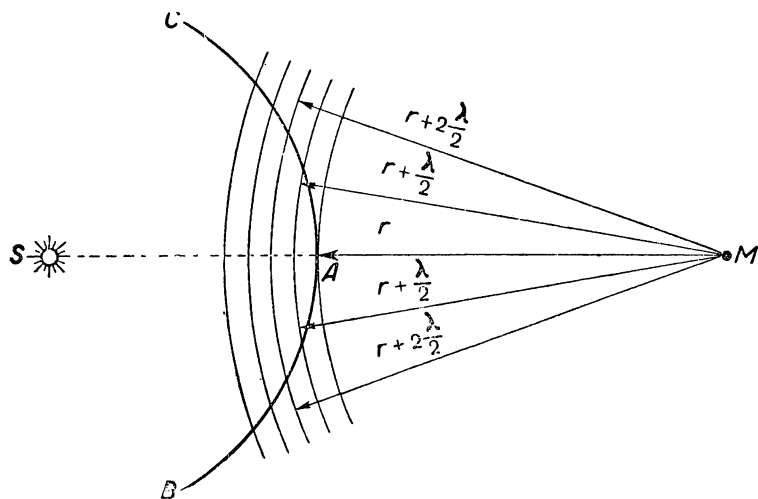


Рис. 272. К объяснению прямолинейного распространения однородного света по волновой теории.

**210. Объяснение прямолинейного распространения света по волновой теории.** Как же согласовать распространение сферической световой волны от точечного источника света с возможностью описывать световые явления так, как будто свет распространялся прямолинейно от источника света?

Френель дал следующее объяснение прямолинейного распространения света, применив принцип Гюйгенса и правило интерференции.

Пусть в некоторый момент световая волна, вышедшая из источника S, занимает положение BC (рис. 272). Как будет идти свет в точку M? Расстояние от точки M до ближайшей точки поверхности волны A обозначим через  $r$ . Проведем из точки M ряд сферических поверхностей

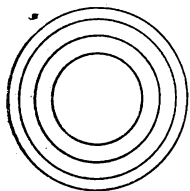


Рис. 273.

радиусами  $r$ ;  $r + \frac{\lambda}{2}$ ;  $r + \frac{\lambda}{2}$  и т. д., где  $\lambda$  — длина волны распространяющегося однородного света. Эти сферы вырежут на волновой поверхности ряд поясов или зон (рис. 273). Так как  $\lambda$  чрезвычайно мала сравнительно с  $r$ , то все эти пояса, как можно доказать, будут иметь одинаковые величины поверхности. Каждая зона всеми своими элементами посылает волны в точку M. Но волны каждой дальнейшей зоны

отстают от предыдущей на половину длины волны; следовательно, они, интерферируя, будут ослаблять друг друга и тем полнее, чем дальше будут отстоять зоны от точки *A*.

Окончательно, вследствие интерференции, действие всей волны на точку *M* таково, как если бы оно происходило от половины первой зоны. При малости  $\lambda$  такой чрезвычайно тонкий пучок и можно считать за прямолинейный луч.

**211. Дифракция света.** Возьмём точечный источник света, поставим перед ним непрозрачный экран, в котором сделан прокол тонкой иглой, и дальше за ним — второй белый экран. На этом последнем экране получим от света, прошедшего через отверстие, освещённый круг, окружённый чередующимися светлыми и тёмными кольцами (рис. 274).

Если взять клинообразную щель, поставить её на расстоянии метров

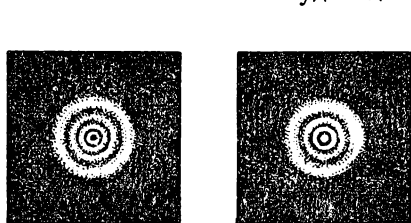


Рис. 274. Дифракционные картины для малого отверстия.

собой узкий прямоугольник, то по ту и другую стороны от средней полосы будут идти, чередуясь, тёмные и светлые



Френель <sup>1)</sup> (1788—1827).

двадцати от экрана и стоящем далеко за щелью, получится причудливо освещённая фигура (рис. 275) с цветными полосами, причём освещение выходит далеко за геометрические пределы щели, соответствующие прямолинейному ходу лучей (на рисунке эти границы отмечены пунктирными линиями).

Если щель представляет

<sup>1)</sup> Френель Огюстен родился в Броли во Франции, инженер путей сообщения, с 1823 г. член французской академии.

Френель разработал волновую теорию света, согласно которой свет от источника света распространяется в виде волн. На основе представления о свете как о волновом процессе Френель подробно разработал объяснение явлений прямолинейного распространения, отражения, преломления, интерференции, дифракции, поляризации и двойного преломления света в кристаллах.

полосы. Наконец, если смотреть на источник света, держа около зрачка глаза тонкую проволоку диаметром около  $0,2 \text{ мм}$ , или получить её тень на экране, поставленном метра на два от неё, можно видеть в теновом пространстве проволоки несколько светлых и тёмных полос (рис. 276).

Все только что описанные явления показывают, что прямолинейное распространение света происходит только в том случае, когда отверстия, пропускающие свет, и предметы <sup>1)</sup>, задерживающие свет, не будут чрезвычайно малы. В противном случае происходит *огибание* светом границ тел, задерживающих

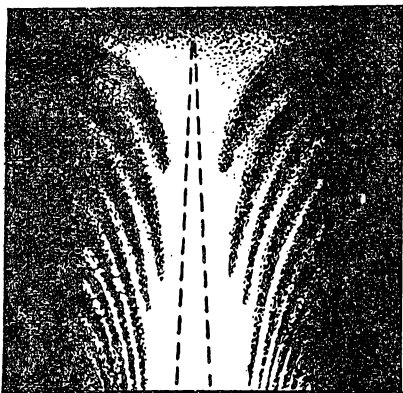


Рис. 275. Дифракционные явления от клинообразной щели.

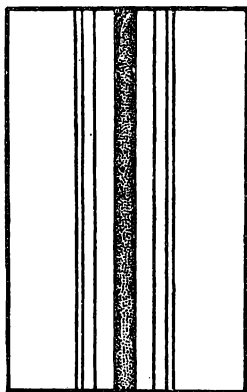


Рис. 276. Дифракционные явления от тонкой проволоки.

свет. *Огибание светом непрозрачных тел, выражающееся в отступлении от прямолинейного хода лучей, называется дифракцией* <sup>2)</sup>.

Если звук производится перед очень длинной и очень высокой стеной, то он отразится от стены и не будет слышен по другую сторону её. Но если размеры звукозадерживающего тела соизмеримы с размерами длины звуковых волн (лежащих в пределах от  $1$  до  $20 \text{ м}$ ), то звук огибает эти препятствия. Всем хорошо известно, что можно слышать разговор и за углом здания, куда

<sup>1)</sup> Явление происходит на границе любых тел.

<sup>2)</sup> Дифракция света открыта в 1665 г. Дифракционные явления можно видеть при рассматривании фонарей через стёкла, покрытые слоем влаги или инея, через прищуренные ресницы, через перья птиц и ткань.



непосредственно не доходит на направление. Подобное же при распространении волн по поверхности воды (рис. 277).

Таким образом, дифракция связана с волнообразным движением и может служить доказательством волнообразного движения.

**212. Измерение длины световой волны при помощи дифракции.** Измерение длины волны света можно произвести, пользуясь явлением дифракции света. Прибором для этого может служить стеклянная пластинка, на которой наносится резцом ряд параллельных, равноотстоящих, очень близких друг к другу линий, становящихся непрозрачными; промежутки между ними остаются прозрачными.



Рис. 278. Дифракционные полосы в однородном свете от решётки.

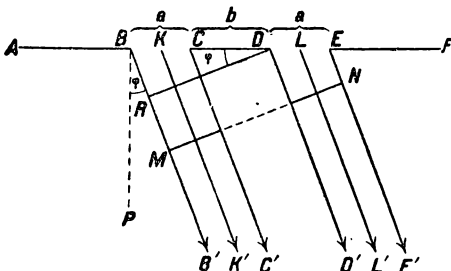


Рис. 279. Измерение длины волны по дифракционным полосам.

279) изображает ширину прозрачного промежутка, отрезок  $b$  — непрозрачного; тот и другой выражаются в очень малых

звуковой луч по прямолинейному огибанию препятствия происходит

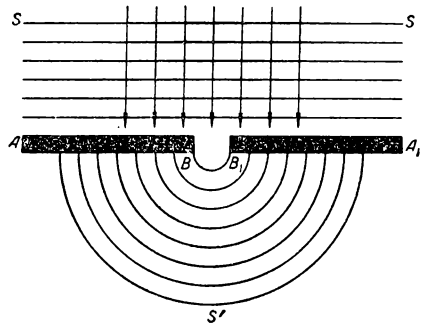


Рис. 277. Дифракция волн на поверхности воды.  $SS$  — плоская падающая волна;  $AB_1$  — узкое отверстие;  $S'$  — образовавшаяся в щели сферическая волна.

Если пропустить через эту пластинку параллельные лучи, например красные, перпендикулярные к пластинке, и собрать эти лучи линзой в фокусе на экране, то на экране получается яркая цветная полоска  $K$  на том месте, которое соответствует положению изображения, построенного прямыми лучами; затем по обе стороны средней яркой полосы располагается ряд цветных полос убывающей яркости, разделённых тёмными промежутками' (рис. 278).

Пусть отрезок  $a$  (рис.

долях миллиметра. Когда на пластинку падает плоская (так как лучи параллельные) волна, то по принципу Гюйгенса, каждая точка плоской волны может быть принята за центр новой волны. Поэтому точки  $B$  и  $D$  можно принять за центры новых элементарных волн. По направлению  $BP$  обе эти волны идут в одной фазе; по всякому же другому направлению фазы их разойдутся. Как видно на рисунке, волны, идущие из тех же точек, но по направлению, образующему угол  $\varphi$  с направлением  $BP$ , разойдутся на отрезок  $BR$ . Если на этом отрезке уложится половина длины волны, то обе волны, собранные линзой, придут к экрану в противоположных фазах и погасят друг друга. Если же на отрезке уложится целая длина волны, то обе волны придут в одной фазе, усилят друг друга и дадут на экране цветную полосу.

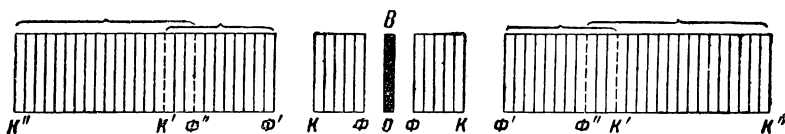


Рис. 280. Дифракционный спектр.

Для измерения длины волны достаточно измерить расстояние первой боковой цветной полосы от средней и вычислить отсюда угол  $\varphi$ ; длина отрезка  $a + b$  указывается при изготовлении пластинки. Измеряемая длина волны  $\lambda$  в этом случае равна отрезку  $BR$ .

Из  $\triangle BDR$  получаем:

$$BR = \lambda = (a + b) \sin \varphi.$$

Для различных спектральных цветов расстояние первой боковой полосы от средней различно, следовательно, различны длины их волн. При освещении пластинки белым светом по обе стороны средней белой полосы располагаются многократно полосы всех цветов спектра — от непрерывной фиолетовой до наружной красной.

Совокупность непрерывно следующих друг за другом цветных полос, полученных при освещении параллельными лучами белого света заштрихованной стеклянной пластинки и собранных в фокусе линзы, называется дифракционным спектром (рис. 280).

Зная длину волны для каждого цвета спектра, можно вычислить и соответствующее число колебаний по формуле  $\nu = \frac{c}{\lambda}$ , где  $c$  — скорость света в пустоте.

## ВОПРОСЫ ДЛЯ ПРОВЕРКИ УСВОЕНИЯ

1. В чём проявляется интерференция света?
2. Какой вывод можно сделать из интерференции относительно возникновения и распространения световых явлений?
3. Как объясняется интерференция света в тонких пластинках?
4. Что называется поляризацией света?
5. В чём проявляется поляризация света?
6. Какой луч называется поляризованным?
7. Какие способы поляризации света вы знаете?
8. Что называется анализатором?
9. Какой вывод относительно направления колебания в световой волне можно сделать из поляризации света?
10. В чём состоит принцип Гюйгенса и какое он имеет применение?
11. Как по волновой теории можно объяснить прямолинейное распространение света?
12. Как по волновой теории выводятся законы отражения и преломления света?
13. Как выражается показатель преломления вещества через скорости света в пустоте и веществе?
14. В чём состоит дифракция света?
15. Какие явления дифракции вы наблюдали?
16. Как при помощи дифракции измерить длину световой волны?
17. Что такое дифракционный спектр?

✓ 213. Дисперсия белого света на границе двух сред. Если на границу двух прозрачных сред падает белый свет, то во второй среде возникает ещё новое явление сравнительно с теми, которые наблюдались при падении на границу однородных цветных лучей. Чтобы отчётливее наблюдать явление, поместим в тёмной комнате источник белого света (электрическую лампочку с металличе-

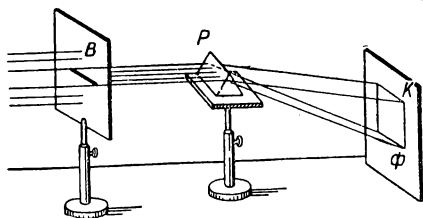


Рис. 281. Дисперсия белого света.

скаго волоском, керосиновую лампу и т. п.); загордим этот источник экраном с узкой горизонтальной щелью *В* (рис. 281); за щелью поставим призму *Р* так, чтобы рёбра её были параллельны щели, и пропустим через призму пучок белого света из щели; тогда: 1) изображение щели сместится в сторону основания призмы; 2) изображение расширится; 3) оно будет окрашено во множество цветов, постепенно и незаметно переходящих один в другой, начиная от наименее отклонённого — красного — и кончая наиболее отклонённым — фиолетовым; среди множества цветов и их оттенков наиболее отчётливо выделяются по

порядку — красный, оранжевый, жёлтый, зелёный, голубой, синий, фиолетовый.

Разложение белого света каким-либо веществом на составляющие его цветные лучи называется дисперсией света.

*Совокупность цветных лучей, расходящихся друг от друга, составляет спектр.*

Все цветные лучи, входящие в состав луча белого света, падают на призму под одним углом падения, выходят из призмы под разными углами. Следовательно, *показатели преломления стекла для всех цветных лучей различны. Наименьший показатель преломления для красных, наибольший — для фиолетовых лучей.*

Так как показатель преломления равен отношению скорости света в пустоте к скорости света в среде  $n = \frac{c_0}{c}$ , то из различия показателей преломления у различных цветных лучей следует, что скорости распространения волн различных цветов в веществе различны.

Вещество	A	D	F	H
Вода . . . . .	1,329	1,333	1,337	1,344
Стекло (крон)	1,510	1,515	1,521	1,531
Сероуглерод	1,610	1,629	1,654	1,702

Следующая таблица даёт показатели преломления отдельных цветных лучей для воды, стекла и сероуглерода, причём луч A лежит в красной части спектра, D — в жёлтой, F — в голубой, H — в фиолетовой.

Пока все цветные лучи идут по одному направлению, они вместе производят на глаз впечатление белого света. По выходе из призмы все они отклоняются на разные углы и вызывают в мозгу через зрительный нерв впечатление различных цветов. Глаз не способен разлагать самостоятельно сложный свет на его составные части. Понятно, что угловые расстояния, на которые расходятся различные лучи в призме, зависят от преломляющих свойств вещества призмы; в призмах из различных веществ размеры отдельных частей спектра получаются различными.

**214. Каждый спектральный луч — простой.** Если пропускать пучок любых цветных лучей через щель экрана, задерживающего остальные лучи, и бросать его на вторую призму, то отдельные цветные лучи спектра при прохождении через вторую призму уже не разлагаются на лучи других цветов, а только отклоняются к основанию призмы. На этом основании каждый

цветной луч спектра считается простым; свет такого луча называется однородным, или монохроматическим.

**215. Синтез белого света.** Если на пути цветных лучей, выходящих из призмы (§ 213), поставить большую собирающую линзу (рис. 282) или выпуклое цилиндрическое<sup>1)</sup> стекло так, чтобы образующие цилиндра были параллельны щели, стекло соберёт все цветные лучи в одно место экрана, на котором опять появляется белая полоска. Следовательно, от сложения всех спектральных цветов восстанавливается белый свет.

Образование белого света через сложение всех спектральных цветных лучей называется синтезом белого света.

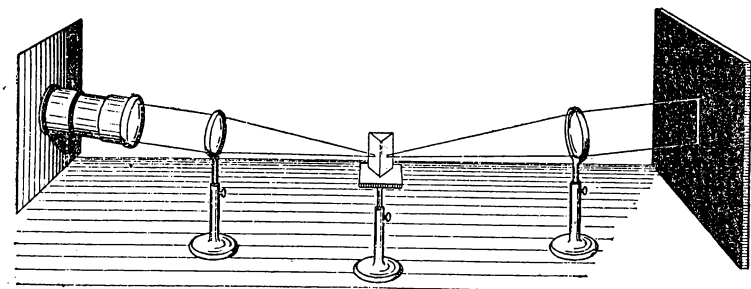


Рис. 282. Синтез белого света.

Помимо объективного сложения на экране, можно произвести синтез белого света через сложение цветных впечатлений в глазу посредством быстрого вращения круга, секторы которого раскрашены красками, соответствующими последовательным спектральным цветам (рис. 283).

Разложение луча белого света на цветные лучи, а также сложение спектральных цветных лучей в белый свет произвёл впервые Ньютон в 1666—1667 гг.

**216. Дополнительные цвета.** Загородим в предыдущей установке для синтеза белого света (рис. 282) пучок красных лучей узкой полоской чёрной бумаги — увидим на экране вместо белой полоски зелёно-голубую.

Отнимем заграждающую бумажку — и снова получим белый свет. Таким образом, красный и зелёно-голубой дают вместе белый свет.

<sup>1)</sup> Цилиндрическим стеклом называется стекло, две поверхности которого отшлифованы в виде цилиндрических поверхностей.

Два цвета, дающие при сложении белый свет, называются дополнительными цветами.

Загораживая по очереди каждый из спектральных цветов, можно по предыдущему получить на экране его дополнительный цвет. Результаты опытов представлены на диаграмме (рис. 284), в которой дополнительные цвета помещены на концах одного и того же диаметра.

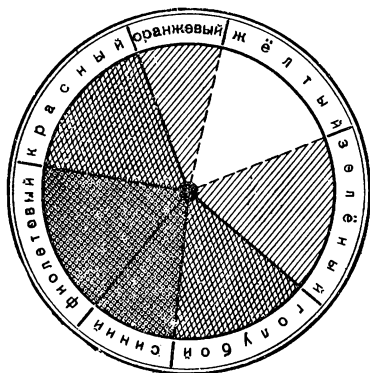


Рис. 283. Круг для субъективного сложения цветов при его вращении.



Рис. 284. Диаграмма дополнительных цветов.

**217. Составление спектральных цветов.** Опыты показывают также, что от сложения красного и зелёного цветов можно получить все промежуточные, например оранжевый, жёлтый, жёлто-зелёный и др., уменьшая количество красного цвета и увеличивая количество зелёного. Также от сложения зелёного и фиолетового цветов в разных пропорциях можно получить все цвета, лежащие между ними: зелёно-голубой, голубой, синий.

Простейшим способом убедиться в изложенном можно посредством следующего опыта. Надо окрасить один сектор круга, например, в красный цвет, остающийся сектор — в зелёный, насадить круг на ось центробежной машины и привести в быстрое вращение. Если выбрать хорошие однородные краски, то при взгляде на этот быстро вращающийся разно окрашенный круг глаз получит впечатление какого-либо промежуточного цвета. При быстром вращении не успевает исчезнуть в глазу ощущение от одного цвета, как возникает ощущение другого. Таким образом, смешение цветов получается в глазу. Меняя размеры секторов, можно получить различные промежуточные цвета.

## Упражнение 25.

1. Зачем в опыте разложения белого цвета берётся именно узкая щель?
2. Почему при рассматривании предметов через призму без щели виден только радужный ободок вокруг предмета, а не виден весь спектр?
3. Какой получится цвет, если быстро вращать круг, одна половина которого окрашена в красный и другая в зелёно-голубой цвет?
4. Какой получается цвет, если окрасить половины круга в дополнительные цвета и быстро вращать его? (Проделать этот опыт.)
5. Какой получится цвет, если быстро вращать круг, одна часть которого окрашена в зелёный цвет, другая в фиолетовый, причём размеры частей можно менять? (Проделать опыт.)

### ВОПРОСЫ ДЛЯ ПРОВЕРКИ УСВОЕНИЯ

1. Что называется дисперсией белого света?
2. Чем объясняется разложение белого света на цвета?
3. Из чего состоит белый свет?
4. Что такое спектр?
5. Как можно разложить белый свет на цвета?
6. Зачем пужна при разложении света призма?
7. Как должна быть поставлена призма по отношению к щели?
8. Каков порядок цветов в спектре?
9. Как изменятся показатели преломления лучей от одного края спектра к другому?
10. Что называется синтезом белого света?
11. Как произвести синтез белого света?
12. Какие цвета называются дополнительными?
13. Как можно найти пару дополнительных цветов?
14. Из скольких цветов можно составить все спектральные цвета?
15. Как составить из двух цветов различные промежуточные цвета?

### 218. Невидимые лучи, испускаемые раскалёнными телами.

Исследуя при помощи термометра нагревание, получаемое от цветных лучей спектра, английский физик Гершель в 1800 г. открыл, что нагревание продолжается и за пределами видимого спектра со стороны красных лучей. Это нагревание обнаружило существование в спектре лучей, глазом не воспринимаемых, не видимых, но также являющихся носителями энергии, как и лучи видимые. По своему положению за красными лучами они получили название инфракрасных.

В настоящее время инфракрасные лучи исследуются при помощи электрических термометров (болометров). Область инфракрасного излучения заключена от длины волны в 770 до 342 000 миллимикрон<sup>1)</sup> (0,3 мм). Числа колебаний этих волн лежат в пределах от  $390 \cdot 10^{12}$  до  $0,9 \cdot 10^{12}$  в секунду.

<sup>1)</sup> Микрон ( $\mu$ ) = 0,001 мм; миллимикрон ( $m\mu$ ) = 0,001  $\mu$ .

Если в опыте дисперсии принять спектр на экран, покрытый платино-синеродистым барием, то эта соль под действием синевioletовых лучей начинает светиться зеленоватым светом. Это свечение не ограничивается крайними видимыми фиолетовыми лучами, но продолжается далеко за ними.

Также и при фотографировании спектра фотографическая пластинка подвергается изменению далеко за пределами видимого фиолетового конца <sup>1)</sup>. Эти опыты обнаруживают, что источник белого света излучает ещё волны, длина которых меньше, чем у фиолетовых лучей.

Лучи, лежащие за фиолетовым краём видимого спектра, открыты Ритером в 1801 г. и названы ультрафиолетовыми.

В настоящее время ультрафиолетовые лучи исследованы при помощи фотографирования на протяжении длин волн от крайнего фиолетового луча с длиной в 393 миллимикрона до длины в 5 миллимикрон. Числа колебаний их лежат между  $763 \cdot 10^{12}$  и  $60\,000 \cdot 10^{12}$  в секунду.

Таблица длин волн и чисел колебаний.

Область спектра	Длина волны в миллимикронах	Число колебаний в секунду
Граница инфракрасной части . . . . .	342 000	$0,9 \cdot 10^{12}$
Граница красной части . . . . .	770	$390 \cdot 10^{12}$
Линия <i>A</i> в красной части <sup>2)</sup> . . . . .	759	$395 \cdot 10^{12}$
„ <i>C</i> „ оранжевой „ . . . . .	656	$457 \cdot 10^{12}$
„ <i>D</i> „ жёлтой „ . . . . .	589	$509 \cdot 10^{12}$
„ <i>E</i> „ зелёной „ . . . . .	527	$570 \cdot 10^{12}$
„ <i>F</i> „ голубой „ . . . . .	486	$617 \cdot 10^{12}$
„ <i>G</i> „ синей „ . . . . .	431	$697 \cdot 10^{12}$
„ <i>H</i> „ фиолетовой „ . . . . .	397	$756 \cdot 10^{12}$
Граница фиолетовой части . . . . .	393	$763 \cdot 10^{12}$
Граница ультрафиолетовой части . . . . .	10	$30\,000 \cdot 10^{12}$

Приведёнными границами не заканчивается область исследованных колебаний. Только другие виды колебаний возбуждаются иными способами, чем рассмотренные до сих пор.

§ 219. Типы спектров испускания. Подобно тому, как мы получили спектр от вольтовой дуги или от лампочки накаливания,

<sup>1)</sup> Для этого опыта надо брать призмы и линзы из кварца (§ 223) или получить дифракционный спектр.

<sup>2)</sup> Буквами *A, B, ...* отмечаются определённые спектральные линии. Положение этих линий выясняется в § 218.



можно получить спектр излучения любого раскалённого тела. Исследование спектров производится при помощи прибора, называемого спектроскопом.

Внешний вид спектроскопа изображён на рисунке 285; ход лучей в нём виден на рисунке 286.

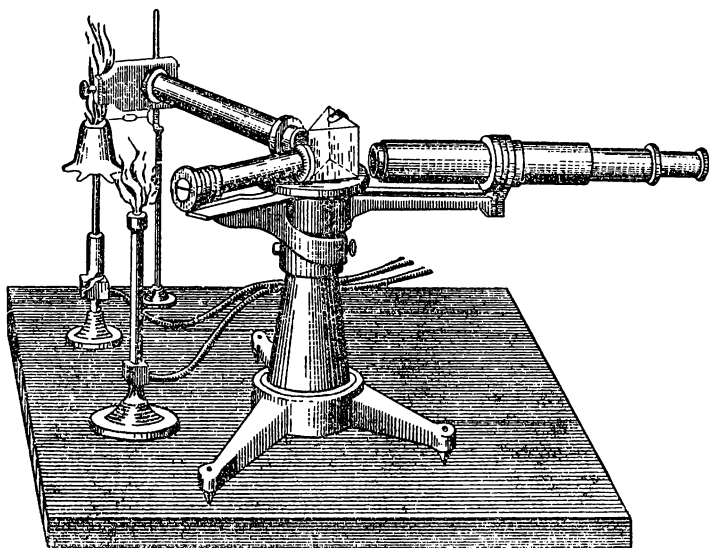


Рис. 285. Спектроскоп (внешний вид). Левая ближняя труба служит для проектирования шкалы.

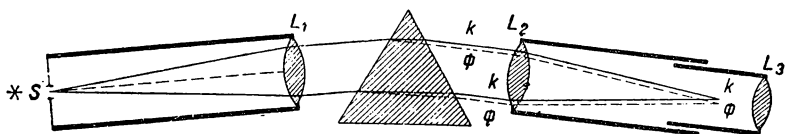


Рис. 286. Спектроскоп (ход лучей).

Основные части спектроскопа: две трубы с линзами и призма. Первая труба заключает линзу  $L_1$ , в главном фокусе которой помещена щель  $S$ .

Освещаемая исследуемым источником света щель  $S$  посылает на линзу  $L_1$  пучок расходящихся лучей, которые линза обращает в пучок параллельных лучей. Эти параллельные лучи преломляются в призме, распадаясь на пучки цветных лучей. Все красные лучи выйдут параллельными между собой, все зелёные — параллель-

ными друг другу и т. д. — однородные лучи пойдут параллельными пучками.

Вышедшие из призмы цветные лучи принимаются на линзу  $L_2$  второй трубы.

Выпуклая линза  $L_2$  соберёт каждый параллельный пучок цветных лучей в одну полоску в плоскости, проходящей через главный фокус. В этом месте получится действительный спектр малого размера. Этот спектр рассматривается через третью линзу  $L_3$ , вставленную в ту же трубу. Линза  $L_3$  помещается так, чтобы спектр лежал ближе её главного фокуса; тогда глаз видит мнимое увеличенное изображение спектра. Дополнительная труба на рисунке 285 служит для проектирования шкалы.

Спектр, получаемый от светящихся тел, называется спектром испускания. Исследования устанавливают следующие типы спектров испускания:

*1. Сплошной спектр состоит из всех цветных лучей, непрерывно следующих друг за другом.*

Сплошной спектр получается от раскалённых твёрдых и жидких <sup>1)</sup> тел; таковы раскалённые или расплавленные металлы, уголь.

Сплошной спектр одинаков для всех раскалённых твёрдых и жидких тел, независимо от их химического состава.

*2. Линейчатый спектр состоит из отдельных цветных линий, разделённых тёмными промежутками.*

Линейчатый спектр получается от раскалённых газов и паров при давлениях, не сильно превосходящих нормальное.

Для накаливания паров многих элементов достаточно помещать крупинки их солей в бесцветное пламя газовой или даже спиртовой горелки. При температуре пламени соль разлагается, металл испаряется, пары его накаливаются и дают линейчатый спектр на фоне слабого сплошного спектра пламени горелки. Для веществ, распадающихся при очень высокой температуре, можно получить раскалённые пары, помещая вещество на угли вольтовой дуги.

Газы приводятся в свечение путём пропускания через них электрического разряда в так называемых гейслеровых трубках, т. е. трубках, наполненных газами под низким давлением.

***Каждый химический элемент в состоянии раскалённых паров имеет свой собственный, ему одному лишь свойственный, линейчатый спектр.***

---

<sup>1)</sup> Сплошной спектр от пламени газа, свечи или лампы получается от раскалённых частиц угля, носящихся в пламени (копотю).

Линейчатые спектры разных элементов отличаются друг от друга цветом (местом), числом, интенсивностью своих линий как в видимой, так и в невидимой частях спектра.

Число линий может меняться от одной до нескольких сст (у паров железа) (см. таблицу спектров в конце книги).

**220. Зависимость излучения от температуры.** Для установления зависимости излучения от температуры лучистая энергия отдельных частей спектра поглощается тонкой зачернённой металлической лентой болометра (§ 63, 68) и в ней превращается в теплоту. Так как толщина ленты составляет 0,01 мм, то, помещая её узким ребром в различные части спектра, можно последовательно измерить энергию, приносимую колебаниями с непрерывно изменяющейся длиной волны.

Результаты измерения можно изобразить графически. На рисунке 287 абсциссы пропорциональны длинам волн. Ординаты пропорциональны величине энергии, приносимой лучами, соответствующими каждой длине волны.

Изображённые на рисунке данные относятся к излучению абсолютно чёрного тела.

*Абсолютно чёрным телом называется тело, поглощающее всю лучистую энергию, падающую на него извне.*

Практически можно осуществить абсолютно чёрное тело в виде полого, твёрдого тела с вычерненной внутренней поверхностью, имеющего малое отверстие. Лучистая энергия, вошедшая через малое отверстие, будет испытывать многократное отражение. При каждом отражении значительная часть энергии поглощается чёрным веществом. Поэтому практически лучистая энергия не выйдет наружу (пример абсолютно чёрного тела — сетчатая оболочка глаза, отверстие — зрачок).

Если изготовить абсолютно чёрное тело в виде длинного цилиндра из асбеста, в основании которого сделано малое отверстие, то, обмотав его проволокой, можно нагревать его электрическим током до разных температур. Исследования распределения энергии в спектрах, накалинных до разных температур абсолютно чёрных тел, привели к результатам, представленным на рисунке 287.

На рисунке даны пять кривых, соответствующих источникам различной температуры. Из разбора кривых следует: 1) общее количество<sup>1)</sup> энергии, излучаемой телом, возрастает с повышением температуры; 2) волны разных длин несут различные

---

<sup>1)</sup> Оно пропорционально площади, ограниченной кривой, осью абсцисс и крайними ординатами.

количества энергии; 3) максимум энергии, приносимой отдельной волной, с повышением температуры перемещается в сторону более коротких волн; 4) почти для всех земных источников максимум энергии приходится на инфракрасные лучи; только источник наиболее высокой температуры в  $4000^{\circ}$  — вольтова дуга — имеет максимум энергии, соответствующий красному свету <sup>1)</sup>.

Каждой температуре соответствует определённая длина волны, на долю которой падает преобладающая роль в излучении. Такое распределение энергии по длинам волн получается при излучении только абсолютно чёрного тела.

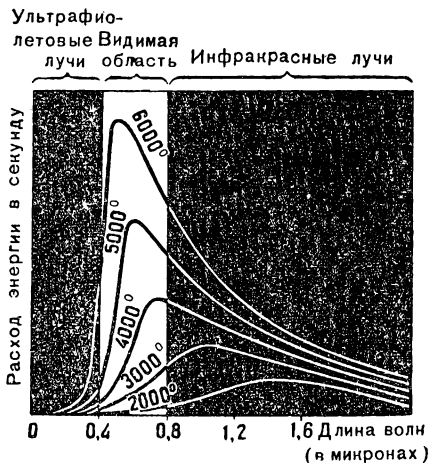


Рис. 287. Распределение энергии в спектрах абсолютно чёрного тела.

значительно; 4) понижения кривой как в видимой, так и в невидимой частях приходится на линии поглощения (§ 225).

*Количество энергии, доставляемой Солнцем в 1 минуту на площадку  $1 \text{ см}^2$ , помещённую перпендикулярно к солнечным лучам на границе земной атмосферы, называется солнечной постоянной и равняется  $1,94 \text{ кал}$ .*

До земной поверхности доходит около половины этого количества, в зависимости от состояния атмосферы.

<sup>1)</sup> Исключение представляет полученная Луммером в 1915 г. вольтова дуга под давлением около 20 атмосфер, в её спектре максимум приходится на голубые лучи; её температура равна  $7500^{\circ}$ ; такое же исключение представляет вольфрам, накалённый мгновенным, очень сильным током до температуры, достигающей  $28\,000^{\circ}$ . Эти источники света технически ещё не использованы.

По нахождению максимума солнечной энергии в жёлтых лучах можно вычислить (приблизённо) температуру поверхности фотосферы Солнца. Вычисления дают  $6000^{\circ}$  по абсолютной шкале.

**221. Изменение излучения с температурой.** На основании исследований по распределению энергии в спектре при разных температурах можно составить себе следующую картину излучения энергии телами.

Тела излучают энергию при всякой температуре. При низких температурах излучаются инфракрасные лучи, соответствующие

очень длинным волнам, и общее количество энергии мало. При повышении температуры прибавляются лучи, соответствующие более коротким волнам; общее количество энергии повышается, и *максимум энергии передвигается в сторону более корот-*



Рис. 288. Распределение энергии в спектре Солнца.

*ких волн.* Только при температуре немного выше  $500^{\circ}$ , при общем повышении количества излучаемой энергии, становятся настолько интенсивными первые видимые лучи — красные, что они начинают действовать на глаз. Наконец, при температуре свыше  $1000^{\circ}$  обнаруживаются фиолетовые лучи, появляется весь видимый спектр, наступает белое каление, а затем обнаруживаются и ультрафиолетовые лучи.

Тела обмениваются излучаемой энергией. Но тело с более высокой температурой излучает в единицу времени больше энергии, чем получает от других тел, его запас энергии уменьшается, и оно остывает; тело же с более низкой температурой поглощает больше, чем излучает, и нагревается.

Как видно из предыдущего разбора, световая энергия составляет только небольшую часть лучистой энергии, испускаемой светящимся телом.

Вообще наибольшее видимое световое излучение (почти  $40\%$ ) приходится на температуру в  $6700^{\circ}$  абс. При повышении

температуры сверх этого значительно увеличивается интенсивность ультрафиолетовых лучей, и доля светового излучения в общем излучении снова начинает падать.

**222. Распространение в средах невидимых излучений.** То обстоятельство, что невидимые лучи открыты в спектре дифракционном и призматическом, показывает, что волны невидимых излучений распространяются так же, как и световые, т. е. в однородной среде имеют прямолинейное направление; при встрече с препятствиями или отверстиями, по своей величине очень близкими к длинам их волн, они испытывают дифракцию, причём

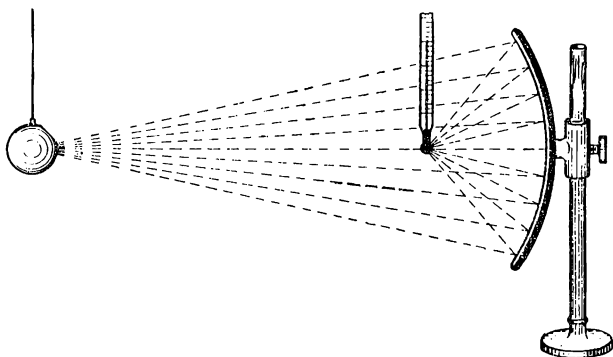


Рис. 289. Отражение невидимых лучей.

волны подвергаются интерференции; через границы двух различных тел волны проходят с преломлением.

Отражение невидимых лучей хорошо можно обнаружить зеркалами Пикте (рис. 289). Перед вогнутым металлическим зеркалом помещается нагретое тело, посылающее инфракрасные лучи. Если в сопряжённом фокусе зеркала поместить комочек пироксилиновой ваты или термометр, то вата вспыхивает, а термометр показывает повышение температуры.

Нагревание тел, помещённых в фокусе зеркала, показывает, что невидимые лучи отражаются и собираются зеркалом в его фокусе, где создают повышение температуры.

Вся совокупность приведённых данных опыта устанавливает то положение, что невидимые лучи температурного излучения подчиняются тем же законам распространения и прохождения через границы двух сред, что и видимые лучи.

**223. Прозрачность тел.** Лучи всякого рода, падающие на поверхности тел, отчасти отражаются, отчасти проникают внутрь тела. Если поверхность хорошо полирована, то она называется

зеркальной. Если поверхность шероховатая и если она рассеивает все цветные лучи падающего на неё белого света в одном и том же отношении, то такая поверхность называется белой.

Если поверхность отражает только часть разных цветных лучей падающего на неё белого света, а другую пропускает внутрь тела, то поверхность оказывается цветной, окрашенной. Её цвет соответствует смеси тех цветных лучей, которые поверхность отражает из всей совокупности лучей, входящих в состав падающего на неё белого света. Такова окраска цветов, животных, тел неорганической природы. От этого же зависит цвет окрашенных тканей и разных других цветных непрозрачных предметов.

Надо заметить, что цвет тел, отражающих лучи только с некоторыми длинами волн, зависит от того света, которым они освещаются. Полоска красного сукна кажется ярко окрашенной в красной части спектра, слабо окрашенной — в жёлтой, чёрной — в остальных частях спектра.

Тело, поглощающее все падающие на него лучи, называется абсолютно чёрным телом. Ближе всего к нему подходит сажа. Тело, пропускающее через себя падающие на него лучи, называется прозрачным. В обычное понятие прозрачности мы должны внести значительное ограничение. В быту называются прозрачными тела, пропускающие световые лучи. Вообще же тел совершенно прозрачных нет. Существует только прозрачность для определённых длин волн. Одно и то же тело может быть прозрачным для одних лучей и непрозрачным для других. С изменением длины волны изменяется и способность света проходить без поглощения или не проходить через данное вещество. Для определённой длины волны не существует абсолютной прозрачности: всякое тело в большей или меньшей степени поглощает пропускаемый им вид лучей.

Помещая на пути лучей, идущих от сильно накалённого источника излучения, различные вещества, исследуя получающийся дифракционный спектр и сравнивая его со сплошным спектром, можно заметить, какие длины волн поглощены данным веществом и для каких оно прозрачно.

Опыты подобного рода показывают, что прозрачными для видимых и непрозрачными для многих невидимых лучей являются вода, лёд, квасцы, стекло.

Прозрачны для световых и инфракрасных лучей, но не прозрачны для ультрафиолетовых лучей — каменная соль, сероуглерод, озон. Кварц прозрачен и для ультрафиолетовых лучей.

Раствор иода в сероуглероде и эбонит пропускают инфракрасные лучи, будучи не прозрачными для остальных.

На этом основании, если хотят получить невидимые лучи в призматическом спектре, то должны применять не стеклянные призмы. Колбы тех электрических лампочек (ртутных), от которых хотят получить ультрафиолетовые лучи, должны изготовляться из кварца.

Вещества могут быть различно прозрачными и для видимых лучей разных длин волн. От этого свойства зависит цвет веществ, рассматриваемых в проходящем свете, например цвет так называемых прозрачных жидкостей, различных сортов стекла, кристаллов и т. п.

Если поместить за щелью на пути белых лучей к призме хорошее красное стекло, то увидим, что на экране останется от спектра только красная полоска, все же остальные исчезнут.

При помещении зелёного стекла остаются средние цветные полоски — жёлтая, зелёная, зелёно-голубая. При помещении же фиолетового стекла пропадают все, кроме фиолетовой и узкой полоски красной.

Чтобы исследовать цвет жидкостей, их наливают в узкий сосуд с плоскими параллельными стенками и помещают его на пути белых лучей.

Раствор медного купороса (синий) пропускает синий край спектра: поглощение света является односторонним. Раствор хлористой меди (зелёный) пропускает среднюю часть спектра: поглощение двустороннее. Раствор хлорофилла поглощает полосами: смежные части красной и оранжевой полосы, ограниченную часть оранжево-жёлтой, отдельные пучки лучей — в конце жёлтой и в начале зелёной; ослабляется вся сине-фиолетовая часть.

Вывод из опытов: *цветные прозрачные тела поглощают одну часть падающего на них белого света, а другую пропускают; их цвет соответствует смеси пропущенных или цветных лучей.*

Спектры с тёмными полосами, полученные после прохождения белого света через тела, называются спектрами поглощения.

В тонких слоях воздух, вода, лёд, стекло, серный эфир и многие другие прозрачные вещества бесцветны. Но те же тела в толстых слоях проявляют избирательное поглощение и оказываются окрашенными. Вспомним голубоватый цвет ледяных глыб или цвет воды. Обратное, тело, непрозрачное в толстых слоях, оказывается прозрачным в очень тонких слоях. Так, даже металлы в виде тончайших листов пропускают лучи некоторых длин волн, в том числе и световые волны, например тонкий лист золота просвечивает зелёным цветом.



Светопрозрачное тело теряет часть своей прозрачности, когда в нём взвешены частицы других веществ с иными показателями преломления. Тогда на границе их происходят многочисленные отражения, и лучи света могут не пройти через толщу вещества. Так, воздух теряет часть своей прозрачности, когда в нём образовалось много водяных капель или носится много пыли. На войне для сокрытия от неприятеля движения колонн, судов или расположения артиллерии умышленно уменьшают прозрачность воздуха, устраивая так называемые „дымовые завесы“.

Прочитать об этом можно у В и н у к о в а „Физика и оборона страны“, часть 2-я, § 48.

**224. Смешение красок.** Предыдущий разбор даёт физическое основание для смешения красок, имеющего весьма большое техническое значение. Смешение красок отличается от смешения спектральных цветов. Для определения цвета смеси двух или нескольких красок в проходящем свете надо по предыдущему исследовать каждую из них. Если жёлтая краска пропускает оранжевые, жёлтые, зелёные лучи, а синяя краска пропускает зелёные, голубые, синие лучи, то через смесь обоих этих веществ пройдут без задержки только зелёные лучи, а остальные будут задержаны тем или другим телом. Цвет смеси получится зелёный.

Вообще *цвет смеси различных красок составитя из тех цветных лучей, которые одновременно пропускаются всеми входящими в смесь красками.*

Так же определяется цвет смеси и в случае отражения от красящих веществ, так как при отражении происходит поглощение не на геометрической поверхности, а в пределах тончайшего поверхностного слоя, внутри которого также происходит избирательное поглощение, т. е. поглощение отдельных видов лучей.

### **Упражнение 26.**

1. Какие лучи пропустят сложенные вместе красное и зелёное стёкла (см. § 223)? зелёное и фиолетовое? красное и фиолетовое?
2. Каким будет казаться раствор хлорной меди и медного купороса при освещении их через красное стекло? зелёно? фиолетовое?
3. Какого цвета будет красный платок при освещении его синим светом?
4. Одна краска пропускает жёлтые, зелёные, голубые лучи, другая — красные, жёлтые, зелёные лучи, третья — зелёные, голубые, синие. Какие лучи пройдут через смесь всех красок?
5. Если бы не было рассеяния света в атмосфере, в каком порядке были бы видны цветные лучи от Солнца в последнее мгновение заката или в первое мгновение восхода?
6. Отчего во время лунных затмений Луна кажется окрашенной в темновинный цвет?

**225. Спектр поглощения лучей раскалёнными парами.** Среди явлений поглощения лучей надо отдельно отметить случай поглощения лучей при пропускании белого света через раскалён-

ные пары или газы, дающие свой собственный линейчатый спектр испускания.

Если в установке § 223 поставить между источником белого света и щелью горелку с раскалёнными парами натрия, то из сплошного спектра на экране исчезнут те самые жёлтые линии, которые имеются в спектре испускания натрия. На их месте получатся тёмные линии.

Если поместить на то же место горелку с раскалёнными парами калия, то в сплошном спектре появятся тёмные линии на тех самых местах, где в спектре испускания паров калия находятся цветные линии. Точно так же при пропускании белого света через раскалённые пары железа в сплошном спектре образуются те сотни тёмных линий, которые будут соответствовать линиям спектра испускания паров железа.

*Сплошной спектр, пересечённый тёмными линиями или полосами и получаемый при прохождении белого света через раскалённые пары, называется спектром поглощения.*

Для каждого элемента его линейчатый спектр испускания и спектр поглощения обладают обратимостью: тёмные линии поглощения в точности соответствуют цветным линиям испускания (см. таблицу в конце книги).

Если два источника — источник белого света и раскалённые пары на пути белого света — испускают по одному и тому же направлению одинаковое количество света, то спектр остаётся сплошным. Если же сила света поглощающего источника больше, чем первого излучающего, то на фоне сплошного спектра выделяются более яркие цветные линии спектра испускания этих паров.

**226. Закон Кирхгофа для поглощения и испускания.** Возникновение спектра поглощения парами, обратного спектру испускания их, может быть объяснено только тем, что из всего потока падающего на них белого света раскалённые пары поглощают те самые цветные лучи, которые они сами испускают. В этом случае имеет место тот же резонанс, с которым мы встречались и при колебании маятников и в звуковых явлениях. Раскалённый излучающий пар поглощает энергию тех волн, которые он сам в данный момент испускает.

Исследуя эти и другие подобные им случаи, Кирхгоф в 1859 г. пришёл к следующему общему закону:

**Всякое тело поглощает те лучи, которые оно само при данных условиях испускает.**

Наиболее употребителен следующий способ измерения поглощательной способности: свет от постоянного источника бросается на металлический круг, поверхность которого покрыта испытуемым веществом. Зная повышение температуры круга за 1 сек., его массу и теплоёмкость, можно вычислить количество теплоты, поглощённой поверхностью круга в 1 сек. Обыкновенно измеряется не абсолютная поглощательная способность, а относительная — по отношению к саже, для которой эта способность принимается за 100.

Различные вещества могут быть расположены в ряд по их относительной поглощательной способности при освещении определённым источником, например: при освещении раскалённой платиной сажа имеет поглощательную способность, обозначаемую через 100; тушь 95; свинцовые белила 56; металлы 13.

В общем, чем белее цвет поверхности и лучше её полировка, тем меньше её поглощательная способность.

Измерения относительной испускающей способности веществ по отношению к саже вполне подтвердили закон Кирхгофа.

*При одинаковой температуре для одних и тех же лучей поглощательная и испускающая способности различных веществ находятся в одном и том же отношении.*

Таким образом, наименее испускающей должна быть белая блестящая (полированная) поверхность, наиболее — чёрная матовая.

Свойство каждого химического элемента давать в состоянии раскалённого пара особый линейчатый спектр позволило Кирхгофу и Бунзену разработать в 1859 г. приёмы спектрального анализа.

**227. Спектральный анализ.** Спектральным анализом называется определение химического состава тела по спектру. Для производства спектрального анализа вводят крупинку исследуемого вещества на платиновой петельке в пламя газовой горелки. Затем на пламя горелки, в которой накалились пары входящих в тело элементов, направляют щель спектроскопа и сравнивают полученный линейчатый спектр с таблицами спектров всех известных элементов.

Если, например, в исследуемом спектре имеются линии, число и места которых в точности соответствуют спектральным линиям паров кальция, то заключают, что в состав исследуемого тела входит кальций. Выделив линии найденного элемента, начинают сравнивать с таблицами остальные линии. Найдя в них, например, линии бария, заключают о нахождении в теле бария и т. д., пока не будут сравнены с табличными все спектральные линии.

Если же в исследуемом спектре окажутся линии, не совпадающие с линиями спектров известных химических элементов, то делают заключение о вхождении в тело нового неизвестного элемента, который потом пытаются выделить с помощью химических приёмов.

Так, в первые же годы применения спектрального анализа были открыты элементы: рубидий и цезий — в 1860 г., таллий — в 1862 г., гелий, найденный по солнечному спектру в 1868 г. и открытый на земле в 1895 г.



Кирхгоф <sup>1)</sup> (1824—1887).

Спектральный анализ можно производить как по спектру испускания, так и по спектру поглощения.

Особое значение спектрального анализа сравнительно с химическим анализом состоит в том, что во-первых, этот приём обладает исключительной чувствительностью: так, для спектрального анализа достаточно миллионной доли миллиграмма вещества; во-вторых, спектральным анализом можно определять состав светящихся тел, находящихся от нас на любых громадных расстояниях, например атмосферы Солнца, звёзд, комет, туманностей.

За последние десятилетия получил развитие количественный спектральный анализ. Его задачей является определение количественных соотношений между элементами, входящими в состав исследуемого вещества, по спектру этого вещества. Количественный спектральный анализ основан на том, что интенсивность различных линий в спектре элемента зависит от концентрации этого элемента в исследуемом веществе.

Если составить таблицу интенсивностей спектральных линий для определённых концентраций, то, получив спектр исследуемого вещества, можно сравнивать интенсивность его линий с табличными и вывести из этого сравнения заключение о количестве, в каком каждый из элементов входит в состав химического соединения.

---

<sup>1)</sup> Кирхгоф Густав родился в Кёнигсберге, с 1850 г. профессор в Бреславле, с 1874 г. — в Берлине.

Кирхгоф разработал метод спектрального анализа, открыл закон о соотношении испускательной и поглощательной способностей тел, разработал теорию разветвления тока, вывел формулу скорости звука в трубе.

**228. Спектр Солнца и других светил.** Спектр Солнца — сплошной спектр, пересечённый почти 20 000 линий поглощения, находящихся в видимой и невидимой частях его. Сплошной спектр получается от блестящей поверхности Солнца, называемой фотосферой. Её сплошной спектр указывает на то, что в фотосфере вещества находятся в раскалённом жидком или паробразном состоянии под громадным давлением. Два десятка тысяч линий поглощения объясняются тем, что белый свет фотосферы проходит через солнечную атмосферу, состоящую из раскалённых газов и паров, имеющих более низкую температуру, чем фотосфера. В толще солнечной атмосферы каждый газ и пар поглощает те лучи, которые он сам испускает (по закону Кирхгофа). Поэтому доходящий до нас *солнечный спектр является спектром поглощения.*

Производя по этому спектру поглощения спектральный анализ, можно установить химический состав солнечной атмосферы.

Из наиболее распространённых на Земле элементов в солнечной атмосфере найдены: водород, гелий, кислород, кальций, натрий, калий, железо, медь, никель, кобальт, стронций, магний, хром и др.

Линии поглощения в солнечном спектре впервые наблюдал в 1817 г. Фраунгофер, поэтому все линии поглощения получили по его имени название *фраунгоферовых*. Наблюдённые им наиболее отчётливые восемь линий отмечаются буквами (см. таблицу в § 218).

Планыеты и их спутники являются тёмными телами, они светят отражённым солнечным светом, имеют спектр, одинаковый с Солнцем; поэтому их состав по спектру узнать нельзя.

Звёзды — тела самосветящиеся и имеют собственные спектры.

По виду спектров звёзды могут быть сведены в следующие крупные три группы <sup>1)</sup>:

В состав первой группы входят звёзды, спектр которых — сплошной с линиями поглощения водорода и гелия. Атмосфера этих звёзд состоит из водорода и гелия. Они имеют белую или голубоватую окраску; температура их лежит между 12 000—20 000° <sup>2)</sup>.

Вторая группа имеет спектр, сходный с солнечным спектром, следовательно, имеет сходный с Солнцем состав атмосферы. Это — звёзды желтоватые с температурой от 5000 до 7000° <sup>3)</sup>.

Спектр третьей группы пересечён широкими полосами поглощения. Эти полосы указывают на образование в звёздной атмосфере сложных химических соединений. Они имеют красноватый цвет и темпера-

<sup>1)</sup> В астрономии принято более подробное подразделение.

<sup>2)</sup> Таковы Вега, Сириус, Альтаир.

<sup>3)</sup> Таковы Солнце, Капелла, Арктур, Альдебаран,

туру в 3000—3500°. К этой группе принадлежит большинство слабых звёзд.

Спектры туманностей показывают, что одни из туманностей состоят из газов, преимущественно водорода и гелия, другие туманности дают звёздный спектр.

Спектры кометных хвостов позволяют разделить кометные хвосты по их химическому составу на три типа: в первом типе хвост состоит из азота и окиси углерода; во-втором — из космической пыли, тяжёлых газов и паров металлов; в третьем — из более крупных частиц тяжёлых металлов.

**229. Рентгеновские лучи.** В 1895 г. немецкий физик Рентген открыл, что поток электронов, ударяясь о стекло кружковой трубки или о какое-либо другое препятствие и внезапно останавливаясь, даёт начало особому излучению.

Это излучение по его имени было названо рентгеновскими лучами.

Рентгеновские лучи обладают следующими свойствами:

1. Они *не отклоняются* ни в магнитном, ни в электрическом полях, следовательно, они не представляют собой потока заряженных частиц и являются лучами, *подобными световым*.

2. Они *ионизируют* газы, делая их электропроводными. Под их действием заряженный электроскоп разряжается.

3. Они вызывают *свечение* различных веществ. Свечение можно наблюдать на экранах, покрытых платино-синеродистым барием.

4. Они *действуют*, как ультрафиолетовые лучи, на *фотографическую пластинку*. Три последние свойства их служат средством их наблюдения и изучения.

5. Они лучше всех остальных ранее разобранных видов излучения *проходят* через толщу различных веществ, проникая на тем большую глубину, чем меньше в общем плотность вещества. Из металлов наиболее проникаемым является алюминий, наименее — свинец. Клетчатка, дерево, кости, ткани проникаемы в разной степени.

На этом свойстве основано громадное техническое и медицинское применение рентгеновских лучей. Вследствие различной степени проникаемости кожи, мускулов, костей оказалось возможным при помощи рентгеновских лучей получить на экране, светящемся под действием этих лучей, или на фотографической пластинке изображение скелета и внутренностей человеческого тела. Само собой понятно, что такое рассматривание внутренностей живого человека оказывает громадную помощь в медицине, позволяя наблюдать болезненные образования внутри организма,

и в особенности в хирургии, обнаруживая переломы, наросты или проникновение инородных тел, требующие хирургической операции.

Тем же свойством лучей пользуются при исследовании качества металлических отливок, обнаруживая при помощи лучей наличие внутри отливков пустот и других неправильностей.

6. Рентгеновские лучи могут быть *поляризованы*. Они испытывают *отражение* от зеркал, но только диффузное, рассеянное, не зеркальное, так как длины рентгеновских волн настолько малы, что как бы поверхность ни была хорошо полирована, она для таких малых волн оказывается шероховатой; рентгеновские лучи претерпевают *преломление* и полное внутреннее отражение. В 1912 г. открыта *дифракция* рентгеновских лучей, но только не от обыкновенных дифракционных решёток, которые слишком грубы для них, а от „пространственной решётки“ кристалла (ч. II).

Рисунок 290 показывает рентгенограмму, т. е. изображение, полученное на фотографической пластинке от тонкого пучка лучей, пропущенных через кристалл хлористого натрия. Центральное пятно получено от прямолинейного распространения лучей; остальные пятна вызваны лучами, испытавшими дифракцию.

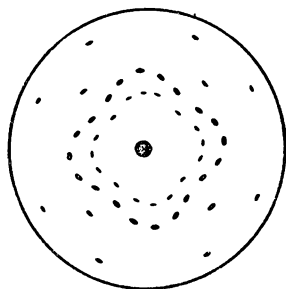


Рис. 290. Рентгенограмма кристалла хлористого натрия.

Снимки, получаемые при помощи рентгеновских лучей при прохождении их через пластинки различных кристаллов, позволили создать теорию строения кристаллов.

7. Далее рентгеновские лучи производят сильное *физиологическое* действие, разрушая клетки организмов. На этом свойстве основано их лечебное действие: направляя рентгеновские лучи на какое-либо болезненное образование в теле, можно вызвать разрушение болезнетворных клеток и излечение организма. Но то же физиологическое действие лучей при неумеренном пользовании ими оказывает вредное влияние на здоровые клетки.

**230. Устройство рентгеновой трубки.** Простейшая рентгенова трубка представляет стеклянный шар с впаянными электродами (рис. 291), из которого выкачан воздух.

Трубка включается в цепь вторичной обмотки катушки Румкорфа. Так как при разряде происходит распыление катода, т. е. от него вместе с электронами вылетают и частицы вещества

катода, то катод делают в рентгеновой трубке из наименее распыляемого вещества — алюминия. По пути катодных лучей под углом к ним помещается антикатод — платиновая пластинка,

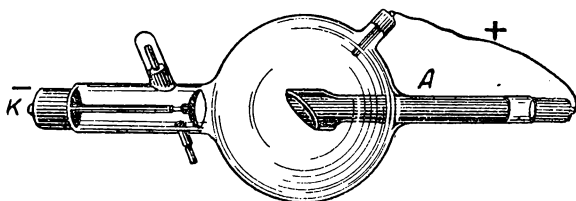


Рис. 291. Рентгенова трубка.

о которую ударяются электроны при своём полёте: на ней при внезапной остановке электронов возникает излучение рентгеновских лучей. Для нейтрализации электронов, попадающих на антикатод, он соединяется проводником с анодом. Антикатод сильно нагревается от ударов электронов; для охлаждения его внутри

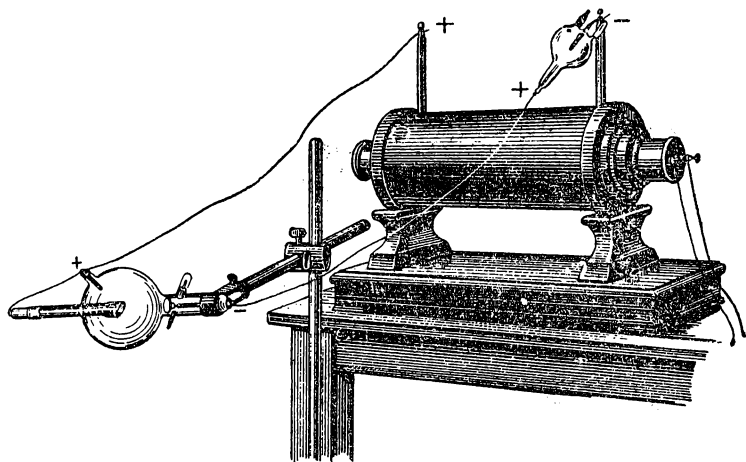


Рис. 292. Установка для рентгеновских снимков.

пропускается ток воды. Так как для рентгеновских снимков и наблюдений требуется всегда разряд в одном направлении, а индукционные токи катушки Румкорфа дают переменные токи, то в цепь рентгеновой трубки вставляется выпрямитель (рис. 292). Выпрямитель представляет собой подобную же трубку (без антикатода) с таким расстоянием электродов, чтобы через



газовый промежуток мог проходить разряд только от более значительной ЭДС индукции при размыкании катушки.

Рисунок 293 передаёт снимок, полученный при помощи рентгеновских лучей.

В настоящее время вышеописанная рентгенова трубка вытесняется трубкой Кулиджа. Эта трубка представляет собой стеклянный баллон, в котором создается разряжение до  $10^{-6}$  мм рт. ст. В него впаяна заключённая в металлический цилиндр вольфрамовая спираль, накаливаемая током от специального трансформатора. Так как она при накале испускает электроны, то она служит катодом. Анодом, который является в то же время и антикатодом, служит вольфрамовая или платиновая пластинка, впаянная в трубку.

В трубке Кулиджа происходит не самостоятельный разряд в разреженном газе. Поэтому она может работать при меньшем напряжении, чем трубки, в которых происходит самостоятельный разряд, как это выяснено в § 108.

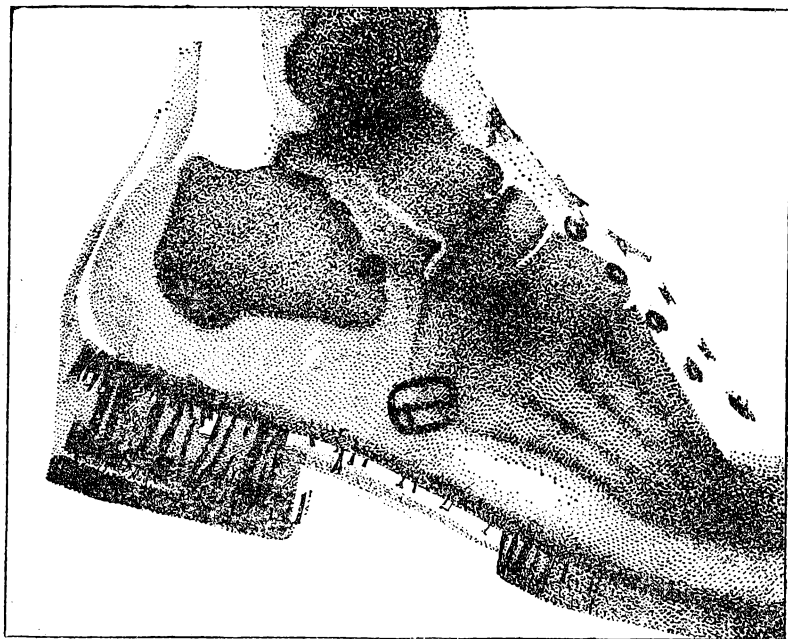


Рис. 293. Рентгеноснимок.

**Литература.** Вавилов С. И., акад., Глаз и солнце (о зрении и свете). Брегг Г., Мир света. Гумерман Л. А., Свет и его источники. Хаустен Р. А., Свет и цвета. Майзель С. Р., Свет и зрение.



П. Н. Лебедев (1866—1912).

Экспериментально оно было измерено знаменитым русским физиком П. Н. Лебедевым в 1900 г. для твёрдых тел и в 1910 г. для газов.

Опыты П. Н. Лебедева <sup>1)</sup> послужили одним из решающих доказательств правильности электромагнитной теории Максвелла и, таким

<sup>1)</sup> Лебедев Пётр Николаевич (1866—1912) — знаменитый русский физик, профессор Московского университета. Основной научной заслугой П. Н. Лебедева является экспериментальное измерение давления света на твёрдые тела и газы. Эти опыты П. Н. Лебедева отличались поразительной тонкостью и точностью. Они являются образцом экспериментального искусства в физике. Опыты П. Н. Лебедева произвели огромное впечатление на учёных всего мира. Благодаря этим опытам электромагнитная теория Максвелла нашла общее признание, и в науке окончательно утвердились современные представления об электричестве и магнетизме.

Измерения светового давления, произведённые П. Н. Лебедевым, послужили основой для разработки ряда важнейших вопросов астрономии, в частности теории комет.

П. Н. Лебедев осуществил ряд других экспериментальных работ по физике, в том числе по земному магнетизму и коротким электромагнитным волнам.

П. Н. Лебедев был замечательным организатором коллективной работы. Он создал первую большую школу русских физиков, из которой вышли многие современные советские физики.

По его проекту построен Физический институт Академии наук СССР, несущий его имя.

образом, легли в основу современных представлений об электромагнетизме и свете.

Опыты требовали исключительно высокого искусства, так как световое давление выражается весьма малыми величинами. Так, чёрная поверхность, освещённая перпендикулярными солнечными лучами, испытывает давление около  $0,26 \text{ мГ/м}^2$ .

Тем не менее световое давление оказывает громадное влияние на перемещение мельчайших частиц вещества в мировом пространстве.

Всякая частица вещества во вселенной находится под двойным действием со стороны ближайшего светила: во-первых, на неё действует сила притяжения светила; во-вторых, сила светового давления, отталкивающая частицу от светила.

Первая пропорциональна массе частицы, следовательно, пропорциональна её объёму, а при сферической форме частицы пропорциональна кубу радиуса. Вторая пропорциональна поверхности, следовательно, квадрату радиуса.

При уменьшении размера частицы притягательная сила уменьшается быстрее отталкивательной (так как куб числа убывает быстрее, чем квадрат его при уменьшении самого числа). При размельчении частицы всегда может получиться такой размер её, что на данном расстоянии от светила отталкивательная сила станет больше притягательной. Такая частица понесётся в пространстве в сторону от светила.

Солнце постоянно производит своим световым давлением отталкивательное действие на частицы, входящие в состав комет. При приближении к Солнцу кометы выбрасывают хвост — поток частиц, исходящий из тела кометы. Хвосты комет всегда направлены в сторону, противоположную Солнцу.

Закономерность образования кометных хвостов является подтверждением лабораторного опыта, произведённого П. Н. Лебедевым.

2. Наиболее общим результатом поглощения телом лучистой энергии является *возникновение теплоты — тела нагреваются*; так, Земля нагревается от Солнца.

3. Весьма часто происходит *превращение лучистой энергии в химическую*. Грандиозное превращение лучистой энергии в химическую совершается в растениях и состоит в преобразовании углекислого газа и воды в органические соединения, менее богатые кислородом. Так, растения превращают солнечную энергию в химическую энергию пищи и топлива.

Во многих случаях происходит обратный процесс — окисление: смолы меняют окраску, органические вещества обесцвечиваются (выцветание тканей, беление холста).

На свету смесь хлора и водорода соединяется в хлористый водород; перекись водорода разлагается на кислород и воду.

4. *Происходят молекулярные изменения под влиянием лучистой энергии*: белый фосфор при освещении переходит

в красный, аморфный селен — в кристаллический с изменением его электропроводности.

Галоидные соли серебра после освещения разлагаются, выделяя металлическое серебро при обработке их другими определёнными веществами. На этом свойстве солей серебра основана фотография (§ 185).

5. *Лучистая энергия вызывает люминесценцию*, т. е. свечение без повышения температуры. Так, при освещении пучком белого света керосин светится голубоватым светом; органическая краска флюоресцин — зелёным; спиртовой раствор хлорофилла — красным.

Сернистый кальций, так же как сернистые соли некоторых других металлов, светится по окончании предварительного освещения его солнечным или искусственным белым светом.

Свечение во время освещения иными лучами, чем освещающие, называется флюоресценцией; свечение после освещения — фосфоресценцией<sup>1)</sup>.

Во всех случаях люминесценции телом излучается энергия за счёт поглощённой лучистой энергии, причём излучаемые *при люминесценции волны большей частью имеют большую длину, чем поглощённые волны, возбуждающие люминесценцию*<sup>2)</sup>.

Так как флюоресценцию вызывают и ультрафиолетовые лучи, то ею можно пользоваться для обнаружения ультрафиолетовых лучей.

Нагревание фосфоресцирующего тела вызывает сначала усиление яркости свечения, но затем более быстрое исчезновение его; тот же запас энергии при нагревании расходуется быстрее.

Этим свойством пользуются для обнаружения инфракрасных лучей. На фосфоресцирующий экран бросается на некоторое время сплошной спектр. По удалении его наблюдается усиление свечения за пределом видимого спектра со стороны красных лучей. Если брошен солнечный спектр, то под линиями поглощения в инфракрасной части экран продолжает светиться и после того, как свечение прекращается на остальных местах.

Таким приёмом можно обнаружить линии поглощения в инфракрасной части спектра.

---

<sup>1)</sup> Флюоресценция — от минерала флюорита, или плавикового шпата, на котором это явление впервые было замечено.

Фосфоресценция — от фосфора, обладающего способностью светиться, хотя его свечение не является фосфоресценцией.

<sup>2)</sup> На применении люминесценции основано устройство ламп нового типа, разработанного группой советских физиков во главе с академиком С. И. Вавиловым. Эти лампы начинают вытеснять лампу накаливания. С их устройством можно познакомиться по литературе, названной в конце главы.

6. *Фотоэлектрическое действие.* Лучи света, падая на тело, выбивают из него электроны. Это явление носит название фотоэффекта. Число выбитых электронов зависит от количества падающей световой энергии на тело, а скорость их — от качества лучей (длина волны). Такому действию света подвергается каждое тело, независимо от химической природы и физического состояния.

Вследствие этого металлическая пластинка, заряженная отрицательным электричеством, разряжается при освещении, теряя свои электроны. Незаряженная пластинка, теряя при освещении электроны, заряжается положительно.

Фотоэффект положен в основу устройства фотоэлемента. Фотоэлементом называется прибор, превращающий световую энергию в электрическую. Принцип устройства его таков (рис. 294). В баллоне, из которого выкачан воздух, помещается пластинка металла *K* (преимущественно щелочного) и металлическая сетка *A*. Если соединить *A* и *K* цепью и осветить пластинку *K*, то она посылает свои электроны к сетке *A*, и в цепи устанавливается ток, отмечаемый гальванометром *g*. Сила тока зависит от освещённости катода.

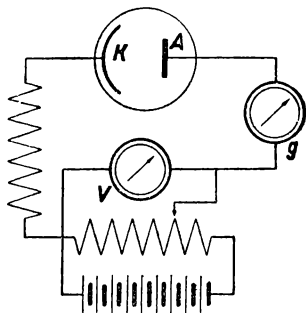


Рис. 294. Фотоэлемент с щелочным металлом.

Если разность потенциалов между электродами настолько велика, что получается ток насыщения, то при указанной на рисунке установке фототок прямо пропорционален величине светового потока, падающего на поверхность катода.

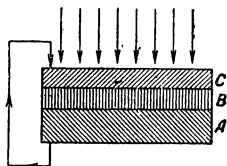


Рис. 295. Фотоэлемент с запирающим слоем.

Большое распространение получили так называемые купроксные элементы, или элементы с запирающим слоем. Такой элемент состоит из трёх наложенных друг на друга пластинок (рис. 295).

На пластинку меди *A* накладывается слой окиси меди *B*, а на него наносится тончайший слой меди, или золота, или платины *C*. При освещении слоя чистого металла ток идёт от промежуточной окисленной пластинки к наружной и без постороннего источника.

Фотоэлементы позволяют преобразовать световую энергию в электрическую. В соединении с электронными усилителями фотоэлементы входят в состав разнообразных чувствительных

автоматов, отзывающихся на изменение интенсивности излучения: включение и выключение освещения, управление световыми сигналами, анализ и сортировка примесей, влияющих на прозрачность тел.

Фотоэлементы применяются в передаче изображений на расстояние и в воспроизведении звука (звуковое кино).

Первый в мире фотоэлемент построен русским физиком А. Г. Столетовым.



А. Г. Столетов <sup>1)</sup> (1839—1896).

<sup>1)</sup> Столетов Александр Григорьевич (1839—1896) — знаменитый русский физик, профессор Московского университета. Его научная деятельность касалась многих разделов физики, но особенно выдающимися были его работы по фотоэффекту и намагничиванию ферромагнит-

ных материалов. В этих областях физики им не только установлены важнейшие факты и закономерности, но и созданы новые методы экспериментального физического исследования.

Изучая влияние света на электрические разряды в газах, А. Г. Столетов построил первый в мире фотоэлемент и установил законы разряда в газах, получившие название „закона Столетова“ и „константы Столетова“. А. Г. Столетовым открыт ток насыщения в электрическом разряде, происходящем под действием света. Это позволило исследовать микроскопический механизм явления разряда. А. Г. Столетов впервые применил гальванометр для изучения прохождения электрического тока через газ. В настоящее время метод Столетова широко используется во всех работах по изучению разряда в газах.

А. Г. Столетов экспериментально исследовал одну из важнейших величин, характеризующих магнитные свойства вещества, — магнитную восприимчивость. Он установил закон изменения магнитной восприимчивости железа с изменением намагничивающей силы. Он нашёл, что магнитная восприимчивость ферромагнитных материалов, постепенно увеличиваясь с возрастанием намагничивающей силы, достигает в определённый момент некоторого наибольшего значения, после чего начинает убывать. В этих работах А. Г. Столетов создал новый метод исследования магнитных свойств вещества с помощью так называемого баллистического гальванометра и тороида (замкнутого кольца).

Работы А. Г. Столетова по магнетизму легли в основу современной техники электрических машин, так как они дали возможность создать рациональную теорию расчёта электродвигателей и динамомашин.

А. Г. Столетов создал первую физическую лабораторию в Московском университете.

7. Наконец, надо отметить *физиологическое* действие лучей, главным образом ультрафиолетовых.

Эти лучи действуют разрушающим образом на клетки организма, вызывая те болезненные ожоги на коже, которые образуются от длительного действия солнечного света <sup>1)</sup>.

Производя разрушительное действие на клетки, ультрафиолетовые лучи умерщвляют бактерии и прекращают разные болезнетворные образования в организме. На этом основано их санитарное и лечебное значение.

### **Упражнение 27.**

1. Как можно узнать о существовании линий поглощения в невидимых частях спектра?

2. Что происходит с линиями поглощения солнечного спектра во время полного затмения, когда все лучи, идущие от фотосферы, задерживаются Луной, а Земли достигают только лучи от атмосферы Солнца?

3. Какие действия производит на Земле энергия солнечного излучения?

4. Скольким лошадиным силам равна мощность солнечной энергии, падающей на  $1 \text{ м}^2$  земной поверхности?

5. Сколько джоулей энергии доставляет Солнце  $1 \text{ м}^2$  земной поверхности в час при перпендикулярном падении лучей?

6. Какая примерно температура искусственного источника света должна быть наиболее выгодной?

7. Почему снег не тает при ярком солнечном освещении в зимний день?

8. Почему проявление фотографического снимка производится при красном освещении?

9. Могут ли красные лучи вызвать люминесценцию?

### **ВОПРОСЫ ДЛЯ ПРОВЕРКИ УСВОЕНИЯ**

1. Что называется инфракрасными лучами? По какому свойству они открыты? В каком месте спектра они получаются? Каковы их длины волн сравнительно с видимыми лучами?

2. Ответить на такие же вопросы для ультрафиолетовых лучей.

3. Какие известны типы спектров испускания?

4. Что называется сплошным спектром? Как он получается?

5. Что называется линейчатым спектром? Как он получается?

6. Как можно изучить распределение энергии в спектре?

7. Каково распределение энергии в солнечном спектре?

8. Каково распределение энергии в спектре искусственных источников света?

---

<sup>1)</sup> Человеческий организм защищается от них образованием под кожей бурого пигмента, поглощающего лучи в поверхностном слое, — загар у жителей умеренных поясов и темный цвет кожи у жителей жаркого пояса.

9. Как изменяется излучение с повышением температуры?
10. Как называется тело, поглощающее все падающие на него лучи?
11. Как называется тело, пропускающее падающие на него лучи?
12. Одинаковой ли прозрачностью обладает каждое вещество для разного рода лучей? Привести примеры различной прозрачности.
13. От чего зависит цвет прозрачных тел? Как это исследовать?
14. От чего зависит цвет непрозрачных тел? Как это исследовать?
15. От чего зависит цвет смеси нескольких красок?
16. Чем отличается смешение красок от смешения спектральных цветов?
17. Что называется спектром поглощения? Как он получается?
18. Какая связь существует между спектрами испускания и поглощения для одного и того же вещества?
19. Что называется спектральным анализом?
20. При помощи каких спектров можно производить спектральный анализ?
21. Какой прибор применяется для спектрального анализа?
22. Какие существенные части спектроскопа?
23. Какое значение имеет спектральный анализ?
24. В чём состоит закон Кирхгофа для поглощения и испускания?
25. Что представляет собой солнечный спектр?
26. Что называется фраунгоферовыми линиями?
27. Чем объясняются фраунгоферовы линии?
28. Что можно узнать по фраунгоферовым линиям?
29. Во что превращается поглощённая телом энергия?
30. Привести примеры превращения лучистой энергии в теплоту.
31. Указать примеры превращения лучистой энергии в химическую.
32. Привести примеры физиологического действия лучистой энергии.
33. В чём состоит люминесценция?
34. Какое соотношение существует между длинами волн, поглощённых и испускаемых при люминесценции?
35. Какие лучи солнечного света преимущественно производят тепловое действие? химическое? физиологическое?
36. В чём состоит фотоэффект и как он технически используется?
37. Какова величина светового давления и каково его значение в природе?

**Литература.** Вавилов С. И., акад., Холодный свет. Лёвшин В. Л., Холодный свет. Лёвшин В. Л., Светящиеся составы. Жиров Н. Ф., Люминофоры. Зворыкин В. К. и Вильсон Е. Д., Фотоэлементы и их применение. Ланге Б., Фотоэлементы в науке и технике. Симон Г. и Зурман Р., Фотоэлементы и их применение. Шипалов М. Г. и Налимов В. В., Фотоэлементы.

**232. Понятие о световом кванте.** Одним из крупных фактов, не объясняемых волновой теорией света, является упомянутый выше фотоэффект. Опыт устанавливает следующие законы фотоэффекта: 1) сила фототока, т. е. количество электронов, освобождающихся при облучении, прямо пропорцио-



нальна количеству поглощённой световой энергии для монохроматического света; 2) наибольшая скорость вылета освобождаемых электронов не зависит от силы света, а зависит исключительно от длины волны его.

Под влиянием ультрафиолетовых лучей из металла вылетают более быстрые электроны, чем под влиянием фиолетовых; под влиянием рентгеновых лучей вылетают ещё более быстрые электроны. Вообще скорость фотоэлектронов, освобождаемых при освещении, тем больше, чем меньше длина волны или чем больше частота действующих лучей.

Второй закон необъясним с точки зрения волновой теории; казалось бы, чем больше сила света, т. е. чем больше энергии посылает на освещаемую поверхность источник света, тем больше должна быть энергия выбитых электронов и, следовательно, их скорость.

Это непримиримое противоречие между теорией и опытными данными вызвало, как всегда происходит в науке, видоизменение теории.

Волновая теория распространения света приводит к учению о непрерывном испускании энергии излучающим источником. И вот такая непрерывность не может быть согласована с независимостью скорости электронов от силы света.

Новая теория вводит прерывность испускания энергии, испускание энергии отдельными порциями определённого размера.

То количество энергии, которое может излучать атом, испуская свет определённой длины волны, получило название кванта энергии.

Квант энергии различен для разных длин излучаемых волн. Основанные на опытах теоретические исследования показывают, что квант энергии для каждого вида волн прямо пропорционален частоте колебаний.

Если обозначить частоту колебаний через  $\nu$ , квант энергии для волн с этой частотой через  $\epsilon$  и множитель пропорциональности через  $h$ , то квант энергии для каждого вида волн выразится следующим образом через частоту:

$$\epsilon = h\nu.$$

Таким образом, квант энергии излучения, посылаемый возбудителем колебания, для красного цвета меньше, чем для фиолетового, для фиолетового меньше, чем для ультрафиолетового, для последнего меньше, чем для рентгеновых лучей. Если общая энергия температурного излучения для красного цвета больше,

чем для ультрафиолетового (§ 220), то это происходит потому, что общее число излучателей красного цвета значительно больше, чем излучателей фиолетового цвета.

Все кванты одной и той же частоты колебания одинаковы между собой.

Проф. Хвольсон приводит такое сравнение квантов различных длин волн: кванты красных лучей — это поток мелкой дроби; кванты фиолетовых лучей — поток ружейных пуль; кванты лучей Рентгена — поток пушечных ядер возрастающего калибра; кванты гамма-лучей — снаряды осадных орудий. С точки зрения квантовой теории второй закон фотоэффекта получает простое объяснение: энергия кванта зависит от длины волны, следовательно, в случае перехода энергии кванта в кинетическую энергию электрона скорость электрона также должна зависеть от длины волны.

Необходимость введения представления о квантах вызвана не только потребностью объяснения фотоэффекта.

Зависимость энергии излучения от температуры, разобранный выше в § 221, также не могла быть объяснена на основе волновых представлений. Все попытки дать формулу, согласованную с опытными данными, на основе непрерывности излучения энергии терпели неудачу.

В 1900 г. немецкий учёный Планк разрешил задачу, введя представление о квантах энергии.

Квантовая теория внесла коренное изменение в научное мировоззрение. В XIX в. было развито учение об эволюции, о постепенном изменении, о непрерывности протекания того или другого явления, например, испускания энергии.

В XX в. вводится идея о квантовании, о взрывчатости в ходе процесса, о скачкообразном изменении качеств.

Известный советский физик С. И. Вавилов разработал методику обнаружения действия отдельных квантов света на глаз. Это дало новое чрезвычайно убедительное доказательство существования квантов света.

**233. Обзор теорий света.** Заканчивая изложение учения о свете, бросим взгляд на смену световых теорий.

Древнегреческие философы учили, что свет исходит из глаза наблюдателя.

Со времени Ньютона и до 20-х годов XIX в. господствовала *теория истечения*.

По этой теории световые явления вызываются движением частиц особой невесомой материи. Мельчайшие частицы, или корпускулы, этой материи вылетают из светящегося тела прямо-

линейно по всем направлениям. Попадая на сетчатку глаза, эти частицы вызывают ощущение света.

Отражение на границе двух сред, подобное отражению упругих шаров, объяснялось отталкиванием, которое испытывали частицы при приближении к поверхности. Преломление приписывалось силам притяжения, которые действовали на световую частицу в тончайшем пограничном слое между средами. Приближение луча к перпендикуляру при переходе из среды с меньшей оптической плотностью в среду с большей плотностью объяснялось тем, что частицы в более плотной среде движутся с большей скоростью, чем в менее плотной среде.

Одновременно с теорией истечения возникла и существовала *волновая теория*, созданная современником Ньютона — Гюйгенсом.

Волновую теорию света поддерживал и разрабатывал М. В. Ломоносов. По теории Гюйгенса световые явления объясняются продольными колебаниями, волнообразно распространяющимися в особой упругой материи.

Меньшая разработанность этой теории и высокий научный авторитет Ньютона, с именем которого была связана теория истечения, отодвинули в сторону от широкого пути научной мысли волновую теорию света.

Но вновь получаемые экспериментальные данные не укладывались в рамки теории истечения.

Несмотря на яростную защиту её сторонников, она должна была пасть под натиском новых данных, из которых решительный удар нанесли два факта: простое объяснение Юнгом на основании волновой теории явления интерференции и измерение Фуко скорости света в воде, которая, в противоположность учению теории истечения, оказалась в  $\frac{4}{3}$  раза меньше, чем в вакууме.

Юнг и в особенности Френель возродили в изменённом виде волновую теорию и тщательно разработали на основании её объяснение явлений прямолинейного распространения, отражения, преломления, интерференции, дифракции и поляризации. По теории Френеля свет является поперечными колебаниями упругой среды — эфира, распространяющимися сферическими волнами от светящейся точки.

Но в представлении о свойствах упругой среды, носительницы световых явлений, заключалось внутреннее противоречие теории.

Чтобы объяснить громадное число колебаний в световой волне (например,  $675 \cdot 10^{12} \frac{\text{колебаний}}{\text{секунда}}$  для одной из волн фиолетового цвета), надо приписать светоносной среде упругость, превосходящую упругость стали. В то же время движение небесных светил в этой среде без изменения скорости, т. е. без сопротивления, заставляло считать ту же среду имеющей исчезающе малую плотность.

Сочетание чрезвычайно большой упругости с исчезающе малой плотностью является несовместимым для одного и того же вещества.

Это противоречие устранено было теорией Максвелла.

В 60-х годах прошлого века Максвелл теоретически доказал, что колебания напряжённости электрического и магнитного полей должны распространяться от вибратора со скоростью света. Электромагнитные волны по теории Максвелла должны отражаться, интерферировать, дифрагировать так же, как и световые волны. Через 20 слишком лет после создания теории Максвелла Герц и П. Н. Лебедев подтвердили на опыте его предсказания и доказали материальность электромагнитных волн.

Кроме того, Максвелл установил соотношение между показателем преломления и диэлектрической проницаемостью вещества.

Эти, а также и другие<sup>1)</sup> известные соотношения между электрическими, магнитными и световыми постоянными дали Максвеллу основание создать *электромагнитную теорию света*.

Световое колебание уже не рассматривается как механическое колебание какого-то упругого вещества.

*Световые явления вызываются изменением вектора напряжённости электрического поля, которое имеет колебательный характер и распространяется в пространстве волнообразно.*

Только в отличие от других электромагнитных колебаний, воспринимаемых специальными приборами, световые колебания происходят с чрезвычайно большими частотами в пределах от  $390 \cdot 10^{12}$  до  $793 \cdot 10^{12} \frac{\text{колебаний}}{\text{секунда}}$  и воспринимаются непосредственно особым органом человека — глазом.

---

<sup>1)</sup> Так, некоторые прозрачные вещества приобретают способность вращать на некоторый угол ту плоскость, в которой происходят поперечные световые колебания, в том случае, когда они находятся в магнитном поле. Такое же вращение плоскости колебаний происходит при отражении лучей света от поверхности намагниченного тела.

При помещении источника света в сильное магнитное поле спектральные линии дwoятся или троются, что указывает на изменение длины волн в пучке лучей, без магнитного поля являющимся однородным (явление, открытое Зееманом). При такой же установке электрическое поле разлагает спектральную линию на ряд линий (явление, открытое Штарком). С другой стороны, мы видели, что падение на металл потока световой энергии вызывает выделение им электронов.

Все эти данные указывают на тесную связь световых и электромагнитных явлений, подтверждая электромагнитную теорию света.

Наконец, явление фотоэффекта опять вызывает к жизни учение об испускании светящимся телом особых частиц — фотонов, т. е. приводит к созданию совместно с волновой и *квантовой теории* света.

Научная мысль по отношению к истолкованию явлений света прошла через интересный диалектический процесс. Когда теория истечения натолкнулась на явление интерференции или на тот факт, что скорость света в веществе меньше, чем в пустоте, чего она не могла объяснить, наступило её отрицание. Возникшее противоречие было разрешено созданием волновой теории. Данные, противоречащие волновой теории, приводят к её отрицанию, и это вторичное отрицание возвращает к теории испускания, но не в её первоначальном виде, а в переработанном, поднятом на высшую ступень. Так как квантовая теория не объясняет явлений интерференции, то теория света должна стать слиянием — синтезом — волновой и квантовой теорий.

**234. Обзор электромагнитных колебаний.** Из всего предыдущего получается общий вывод: *все виды лучистых колебаний являются разновидностями электромагнитных колебаний.*

Это научное открытие вскрывает великий принцип диалектического развития природы: единство движения материи в многообразии явлений. При этом количественное изменение длины волны неразрывно связано с приобретением нового качества: иного действия на тела.

Различные электромагнитные волны отличаются друг от друга по способу, каким они естественно или искусственно возбуждаются, а также по средствам, какими они проще всего обнаруживаются. Все изученные выше колебания могут быть распределены по длинам своих волн в ряд от самых длинных волн до самых коротких известных волн, составляя так называемую «шкалу» электромагнитных колебаний.

Выдержка из этой «шкалы» приводится в прилагаемой таблице, причём в неё включены для полноты и гамма-лучи.

Название областей «шкалы» волн	Длины волн	Частота в герцах
1. Низкочастотные волны . . .	$\infty$ — 15 км	0 — $2 \cdot 10^4$
2. Радиоволны . . . . .	15 км — 1 дм	$2 \cdot 10^4$ — $2 \cdot 10^9$
3. Ультрарадиоволны . . . . .	10 см — 0,1 мм	$3 \cdot 10^9$ — $3 \cdot 10^{12}$
4. Инфракрасные волны . . . . .	100 $\mu$ — 0,76 $\mu$	$3 \cdot 10^{12}$ — $400 \cdot 10^{12}$
5. Световые волны . . . . .	0,76 $\mu$ — 0,38 $\mu$	$4 \cdot 10^{14}$ — $8 \cdot 10^{14}$
6. Ультрафиолетовые волны . . . . .	0,38 $\mu$ — 5 м $\mu$	$8 \cdot 10^{14}$ — $6 \cdot 10^{16}$
7. Рентгеновские волны . . . . .	5 м $\mu$ — 0,004 м $\mu$	$6 \cdot 10^{16}$ — $7,5 \cdot 10^{19}$
8. Гамма-волны . . . . .	40X — 1 X <sup>1)</sup>	$7,5 \cdot 10^{19}$ — $3 \cdot 10^{21}$

**Литература.** Б р э г г В., О природе вещей. И о ф ф е А. Ф., акад., Электрический заряд (серия: Учёные — школьникам).

1) X — единица длины, равная десяти тысячной доле миллимикрона.

# СТРОЕНИЕ АТОМА.

---

**235. Обнаружение сложного строения атома.** До последних десятилетий XIX в. атом любого химического элемента считался неделимым на части, как показывает само его греческое название. Первым явлением, противоречащим такому понятию об атоме, было открытие катодных лучей (§ 106). Наблюдение отклонения этих лучей в магнитном и электрическом полях показало, что катодные „лучи“ состоят из мельчайших частиц вещества, проявляющих свойства отрицательного электричества и получивших название электронов.

Измерение отклонений электронов при движении их в электрическом и магнитном полях позволило вычислить скорость, с которой они двигались в полях, и определить отношение их заряда к их массе.

Впоследствии их заряд был измерен непосредственно и оказался равным  $4,8 \cdot 10^{-10}$  электростатических единиц количества электричества (CGSE). С помощью этого числа можно вычислить массу частицы  $m = 9 \cdot 10^{-28}$  г (округлённо). Эта масса оказалась в 1836 (округлённо в 1840) раз меньше массы самого лёгкого из атомов — атома водорода.

Найденный в «катодных лучах» электрон был обнаружен во многих других явлениях, из которых некоторые уже известны учащимся.

Наблюдаемые в таких же трубках так называемые «анодные лучи» (§ 107) представляют собой поток частиц, обнаруживающих свойства положительного электричества. Наблюдение за движением их в электрическом и магнитном полях позволило произвести измерение скоростей их движения и отношения величин заряда к их массе.

Так как катодные лучи могут быть получены в трубках независимо от вещества электродов, то единственное объяснение их возникновения может состоять в том, что электроны входят в состав атомов любого элемента.

Таким образом, атом стал рассматриваться как сложное тело.

С другой стороны многочисленные, как физические, так и химические исследования давали возможность утверждать, что и молекулы и атомы всех веществ в целом электрически нейтральны. Отсюда следовало, что составные части атома должны иметь равные по величине, но противоположные по знаку заряды.

Как по величине смещения траектории частицы в электрическом и магнитном полях можно вычислить скорость частицы и отношение заряда к массе?

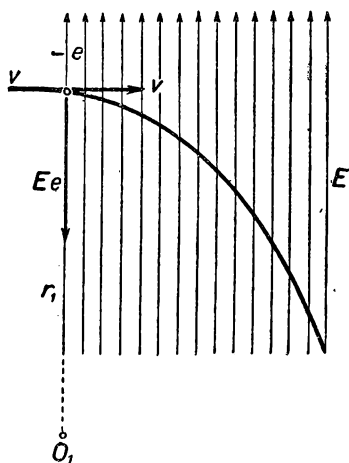


Рис. 296а. Траектория электрона в электрическом поле.

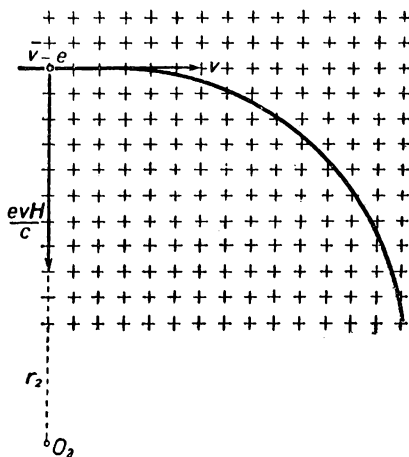


Рис. 296б. Траектория электрона в магнитном поле.

Предположим, что на пути частицы в пустотной трубке создано электрическое поле с напряжённостью  $E$ , направленной, как показано на рисунке 296а.

В это поле влетает слева направо частица с массой  $m$ , зарядом  $e$  и горизонтально направленной скоростью  $v$ . На неё действует сила поля  $Ee$ , перпендикулярная к скорости.

Если бы действовала только одна эта сила, то под действием её частица пришла бы в равномерно-ускоренное движение по направлению силы. Но одновременно частица сохраняет по инерции скорость, перпендикулярную к направлению силы. От сложения этих двух движений получается движение, траектория которого будет такая же, как и у горизонтально брошенного тела в поле тяготения, т. е. парабола.

Радиус кривизны параболы в начальной точке, т. е. радиус той окружности, которая имеет общий с параболой элемент дуги, обозначим через  $r_1$ . Он может быть вычислен по формуле параболы при помощи высшей математики.



В таком случае силу  $Ee$  можно рассматривать как центростремительную и выразить её по формуле центростремительной силы:

$$Ee = \frac{mv^2}{r_1}. \quad (1)$$

Представим себе, что на ту же частицу, летящую с той же скоростью  $v$  в горизонтальном направлении, действует магнитное поле с напряжённостью  $H$ . Направим векторы напряжённости одного и того же магнитного поля перпендикулярно к плоскости рисунка от читателя (рис. 296б).

Движущаяся частица электричества представляет собой элемент электрического тока силой  $ev$ . Магнитное поле отклоняет электрический ток по направлению, перпендикулярному к направлению тока и силовых линий поля. Так как движется заряд отрицательный, то его отклонение противоположно тому направлению, которое определяется по правилу Флеминга (§ 82).

Сила поля в каждой точке перпендикулярна к направлению тока. Поэтому траекторией электрона будет окружность, радиус которой  $r_2$  может быть измерен по фотографическому снимку.

По закону Ампера сила, с которой поле с напряжённостью  $H$  действует на элемент тока длины  $l$ , сила которого  $I$ , равна  $HIl$ . Только в этой формуле количество электричества измерено не в CGSE, а в другой единице, которая крупнее электростатической в  $3 \cdot 10^{10}$  раз. Чтобы можно было величину  $e$  подставить в эту формулу, надо её числовое значение уменьшить в  $3 \cdot 10^{10}$ . Обозначим эту величину буквой  $c$ .

Тогда сила поля выразится через  $H \frac{e}{c} v$ . Она направлена постоянно к центру, следовательно, является центростремительной силой:

$$H \frac{e}{c} v = \frac{mv^2}{r_2} \quad \text{или} \quad H \frac{e}{c} = \frac{mv}{r_2}. \quad (2)$$

Из уравнений 1 и 2 можно вычислить  $v$  и  $\frac{e}{m}$  по остальным измеренным величинам.

**236. Спигтарископ. Камера Вильсона.** Обнаружив сложное строение атома, физики приступили к исследованию того, как расположены в атоме его составные части.

Первые надёжные данные о строении атома были получены в 1919 г. Резерфордом.

Резерфорд подвергал различные вещества бомбардировке ионами гелия и наблюдал, как поток этих частиц рассеивался при прохождении его через вещества. Как известно из курса химии, эти ионы гелия вылетают с большой энергией из радиоактивных веществ и в этих случаях носят название  $\alpha$ -частиц (альфа-частиц, § 244).  $\alpha$ -частицы невидимы ни в какие оптические приборы, но могут быть наблюдаемы по производимым им действиям.

Для наблюдения  $\alpha$ -частиц применяются различные приборы, к их числу принадлежит спинтарископ и камера Вильсона.

а) **Спинтарископ.** Альфа-частицы, подобно частицам катодных и анодных потоков, вызывают флюоресценцию (§ 106, 107). Прибор спинтарископ состоит из короткой трубки, дно которой представляет экран, покрытый сернистым цинком — веществом флюоресцирующим под ударами альфа-частиц; в отверстие трубки вставлена лупа, через которую можно рассматривать экран (рис. 297). Близ экрана пропущена через стенку игла, на острие

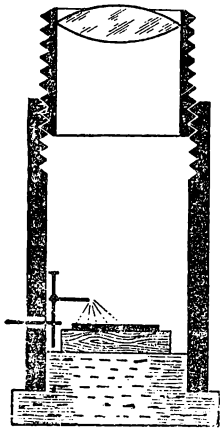


Рис. 297. Спинтарископ (схематическое изображение).

которой помещено совершенно ничтожное количество вещества, испускающего альфа-частицы. Наблюдатель, смотрящий при полной темноте через лупу на экран, видит в отдельных точках его вспышки, свечение (сцинтилляции). Поэтому и прибор называется „спинтарископ“ — от греческих слов: *спинтер* — и *скра*, *скопео* — смотрю.

Наблюдатель по вспышкам, происходящим на экране, может сосчитать число  $\alpha$ -частиц, выбрасываемых радиоактивным препаратом, и установить места их попадания на экран. Помещая между радиоактивным препаратом и экраном очень тонкие слои различных веществ, Резерфорд наблюдал, как поток  $\alpha$ -частиц рассеивался после прохождения его через вещество. Это рассеяние он объяснил взаимодействием  $\alpha$ -частиц с атомами вещества. Чем ближе к атому пролетала  $\alpha$ -частица, тем больше она отклонялась от первоначального направления своего движения. Резерфорд наблюдал, что большие отклонения  $\alpha$ -частиц встречаются очень редко, отсюда он заключал, что при прохождении потока  $\alpha$ -частиц через слой вещества только очень немногие из них проходят достаточно близко от положительно заряженных ядер атомов.

До работ Резерфорда, на основании кинетической теории газа, размеры атома оценивались величиной порядка  $10^{-8}$  см. Измерения Резерфорда дали для размеров ядра атома величину порядка  $10^{-13}$  см.

б) **Камера Вильсона** — прибор, действие которого основано на ионизации молекул альфа-частицами. Явление ионизации и различные ионизаторы рассмотрены выше (§§ 86, 100). Ионы сами по себе невидимы ни глазом, ни через оптические приборы так же, как и молекулы.

Но они в процессе конденсации насыщающих паров играют такую же роль, как и пылинки. Известно, что в совершенно чистом воздухе, лишённом пылинок и ионов, насыщенные пары могут сохраняться без обращения в жидкость при понижении температуры, т. е. при пересыщении. Если же в такой насыщенный парами воздух пустить пылинки или ионы, то каждый из них становится центром жидкого пузырька, совокупность которых образует туман.

Альфа-частица при своём движении в воздухе образует около 200 000 пар ионов, на каждом сантиметре пути по несколько десятков тысяч. Ион обволакивается водяной оболочкой (или

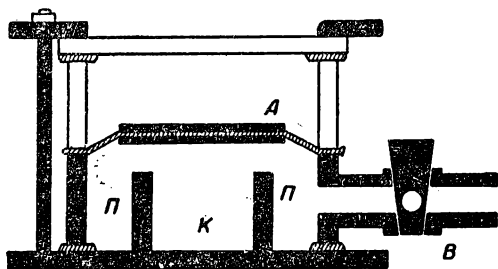


Рис. 298. Камера Вильсона.

Зачернённые части — латунь, светлые — стекло, заштрихованные — резина. Дно пространства наблюдения А — подвижное благодаря резиновой мембране. Нижняя часть камеры К соединяется с вакуумом через вентиль В. При этом подвижное дно верхней части камеры опускается до соприкосновения с опорами П.

оболочкой другой жидкости, чей пар насыщает пространство). Все эти пузырьки образуют туманную полосу, очерчивающую путь каждой альфа-частицы и называемую „трэком“.

Таким образом, можно проследить за движением каждой альфа-частицы, хотя она и остаётся невидимой.

Как же прибор обеспечивает пересыщение пространства паром? Устройство и действия камеры Вильсона можно понять из рассмотрения рисунка 298. Пространство над подвижным дном А наполняют воздухом, насыщенным водяным паром. При опускании дна А воздух, насыщенный паром, расширяется, при этом он охлаждается и наступает состояние пересыщения (ч. II, § 120). Пролетающие в это время в камере  $\alpha$ -частицы вызывают конденсацию паров на пути своего пробега, и, таким образом, обрисовываются трэки альфа-частиц, которые могут быть сфотографированы через верхнюю стеклянную крышку камеры.

**237. Открытие ядра атома.** В распоряжении учёных имеются десятки тысяч наблюдений и фотографий трёков альфа-частиц (рис. 299).

Прежде всего надо заметить, что по поведению альфа-частицы в магнитном и электрическом полях можно вычислить, что альфа-частица несёт положительный заряд в размере двойного заряда электрона, имеет массу  $m = 6,644 \cdot 10^{-24}$  г (почти в 4 раза больше атома водорода). Её скорость  $v = 20\,000$  км/сек. Энергия такого „снаряда“ составляет около 6 000 000 электрон-вольт.

Электрон-вольт — единица энергии, которая применяется в теории строения атома.

Электрон-вольт есть энергия, равная кинетической энергии, приобретаемой электроном в электрическом поле при прохождении им участка с разностью потенциалов в один вольт. Если электрон проходит участок с напряжением в 1000 вольт, то его энергия равна 1000 электрон-вольт. Обозначение этой единицы  $eV$ . Миллион электрон-вольт называется мегаэлектрон-вольт и обозначается  $MeV$ .

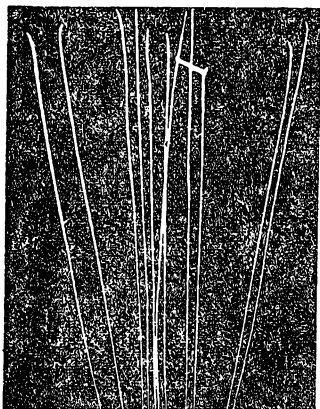


Рис. 299а. Следы альфа-частиц в конце пробега.



Рис. 299б. След альфа-частицы, испытывающей два столкновения.

Электрон-вольт значительно меньше единицы энергии в системе CGS, именно  $1eV = 1,6 \cdot 10^{-12}$  эрг.

Что же показывают те сотни тысяч трёков, которые запечатлены на фотографиях или отмечены в непосредственных наблюдениях? В огромном большинстве случаев трэки прямолинейны. В очень немногих случаях получают „вилки“ или отклонения от прямолинейности, как видно на рисунках 299а,б.

Для разных веществ наиболее часто встречающиеся углы отклонения различны, например для алюминия  $0,6^\circ$ , для золота  $2,1^\circ$ . Для одного и того же вещества различные углы отклонения встречаются неодинаково часто. Очень редки случаи, когда частица отбрасывается назад.

Какие выводы можно сделать из частоты повторения тех или других случаев отклонения?

Громадное число прямолинейных трэков указывает на то, что альфа-частицы, встречающие на своём пути десятки тысяч атомов, проходят через атомы насквозь, следовательно, масса атома не распределена по всему объёму атома.

Наблюдаемые отклонения путей положительно заряженной альфа-частицы могут быть вызваны взаимодействием только с другим, также положительным, зарядом по закону Кулона.

Следовательно, основная масса атома сосредоточена в очень малом объёме и несёт положительный заряд. Эта часть атома носит название ядра.

Обратное движение альфа-частицы и различные углы отклонения при приближении её к ядрам атомов в различных веществах объясняются тем, что альфа-частица пролетает на разных расстояниях от ядра и вследствие этого испытывает различные взаимодействия с ним, как это можно понять из рисунка (рис. 300).

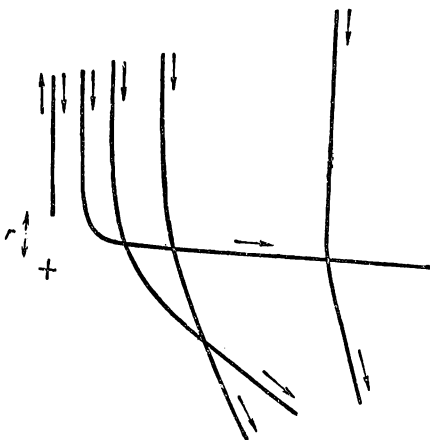


Рис. 300. Трактории альфа-частиц, пролетающих вблизи атомного ядра (примерный масштаб:  $10^{-12}$  см на чертеже изображается 2 мм).

Применяя математический анализ к исследованию трэков, нашли, что диаметр ядра имеет значение порядка  $10^{-13}$ — $10^{-12}$  см. В любом веществе действительный объём, занимаемый ядрами, составляет примерно стотысячную часть миллиардной доли от общего объёма атома.

Другой важный вывод из всей совокупности подобных опытов касается заряда ядра: он оказался кратным элементарному заряду в  $4,8 \cdot 10^{-10}$  CGSE и общее число элементарных зарядов ядра совпадает с порядковым номером элемента в системе Менделеева.

Таким образом, Менделеев в своей системе, созданной им задолго до описанных опытов, предвосхитил глубочайшую закономерность в строении элементов.

На основании огромного опытного материала была создана теория строения атома.

Ядро атома занимает ничтожный объём всего атомного объёма; в ядре сосредоточены весь положительный заряд атома и почти вся масса (кроме той, которая принадлежит электронам); число электронов, входящих в состав нейтрального атома, равно числу элементарных положительных зарядов ядра, следовательно, также равно порядковому номеру элементов в системе Менделеева.

**238. Строение линейчатых спектров.** Описанные в предыдущем параграфе опыты, устанавливая число электронов в атоме элемента, не давали указания о том, как они расположены в атоме относительно ядра.

Разъяснение этого вопроса может быть получено из анализа линейчатых спектров элементов (§ 218, 219). С закономерностью их познакомимся на спектре водорода. Ещё со времени открытия спектрального анализа были известны пять характерных цветных линий в этом спектре; к настоящему времени число обнаруженных линий в видимой и невидимой частях возросло до 30.

По длине волны была вычислена частота колебаний (§ 143).

Для понимания дальнейшего (не для заучивания) приведём значения частот, полученные из спектроскопических наблюдений (первый столбец таблицы).

Частота $\nu$	$k \left( \frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right)$	$n$
$456,996 \cdot 10^{12}$	$3,290364 \cdot 10^{15} \left( \frac{1}{2^2} - \frac{1}{3^2} \right)$	3
$616,943 \cdot 10^{12}$	” $\left( \frac{1}{2^2} - \frac{1}{4^2} \right)$	4
$690,975 \cdot 10^{12}$	” $\left( \frac{1}{2^2} - \frac{1}{5^2} \right)$	5
$731,193 \cdot 10^{12}$	” $\left( \frac{1}{2^2} - \frac{1}{6^2} \right)$	6
$755,441 \cdot 10^{12}$	” $\left( \frac{1}{2^2} - \frac{1}{7^2} \right)$	7
$814,361 \cdot 10^{12}$	” $\left( \frac{1}{2^2} - \frac{1}{20^2} \right)$	20

Ещё в 80-х годах XIX в. учитель гимназии в Швейцарии Бальмер заинтересовался вопросом, не существует ли какого-либо определённого соотношения между первыми пятью известными в его время частотами. Подвергая разнообразной обработке эти числа, он показал, что в них можно выделить общую часть, и

представил их в виде, выписанном во втором столбце (с большой степенью точности).

Такой характер чисел можно охватить одной формулой:

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

где  $K = 3,290364 \cdot 10^{15}$ , а  $n = 3, 4, 5, 6, 7 \dots$  (формула написана наверху второго столбца, в третьем столбце выписаны значения  $n$ ).

В дальнейшем были подвергнуты исследованию линии в ультрафиолетовой части спектра, частоты которых могут быть сведены к формуле:

$$\nu_{\text{УФ}} = K \left( \frac{1}{1^2} - \frac{1}{n^2} \right),$$

где  $n = 2, 3, 4 \dots$  (целые числа).

Для инфракрасной части:

$$\nu_{\text{ИК}} = K \left( \frac{1}{3^2} - \frac{1}{n^2} \right),$$

где  $n = 4, 5, 6 \dots$  (целые числа). Эти три формулы могут быть сведены в одну:

$$\nu = K \left( \frac{1}{n''^2} - \frac{1}{n'^2} \right).$$

$n'' = 1$  для ультрафиолетовой части.

$n'' = 2$  для видимой и  $n'' = 3$  для инфракрасной части спектра.

Так как для спектров и других элементов получены похожие формулы, то найденные закономерности не могли быть случайными, а должны вытекать из строения самих элементов.

**239. Электронная оболочка атома водорода.** Из совокупности всех данных, имеющихся в распоряжении учёных, установлено, что электроны — частицы с отрицательным зарядом — находятся вне ядра. Находясь вне ядра, электроны не могут быть в состоянии покоя относительно ядра, так как в таком случае они были бы притянуты к нему кулоновской силой взаимодействия разнородных зарядов. Следовательно, они находятся во вращении вокруг ядра. Число всех электронов равно числу элементарных зарядов ядра, так как они своими отрицательными зарядами нейтрализуют положительный заряд ядра.

Что касается расстояний электрона от ядра, то современная физика вычисляет только вероятность нахождения электрона при его вращении вокруг ядра на том или другом расстоянии. По этим вычислениям не все расстояния одинаково вероятны.

Применительно к атому водорода наибольшие вероятности имеются для расстояний:  $r_1 = 0,5305 \cdot 10^{-8}$  см, и для последующих расстояний, которые больше  $r_1$  в числа раз, равные квадратам последовательных целых чисел, т. е. в  $2^2, 3^2, 4^2, \dots$ .

Находясь на каждом из этих возможных расстояний относительно ядра, электрон обладает определённой энергией, слагающейся из его кинетической энергии и потенциальной энергии по отношению к ядру, которые могут быть вычислены через массу электрона, его заряд, скорость и расстояние от ядра.

Когда электрон перескакивает с одного из дальних возможных расстояний на одно из ближних вероятных расстояний, атом излучает квант энергии, равный разности количеств энергии, которыми обладал электрон на том расстоянии, с которого он перескакивает, и на новом расстоянии, на которое он перескочил. Зная же величину кванта энергии, можно вычислить длину излученной волны и частоту колебания (§ 232).

Вычисленные частоты излучаемых водородом волн совпали с большой степенью точности с наблюдаемыми.

Таким образом, орудием изучения электронной оболочки атомов были вначале и являются в дальнейшем линейчатые спектры испускания веществ.

Дальнейшее подробное изучение спектров позволяет уточнять строение электронной оболочки.

**240. Электронные оболочки атомов любых элементов.** На примере атома водорода показан метод изучения электронной оболочки атома.

Для других атомов расчёты и рассуждение усложняются, так как число электронов в оболочке увеличивается по мере увеличения порядкового номера элемента.

В них *электроны располагаются вокруг ядра слоями.*

Не входя в объяснение того, как было открыто такое расположение, ограничимся некоторыми примерами. Вокруг ядра водорода, называемого *протоном*, движется один электрон. Начиная с гелия, в ближайшем к ядру слое движутся два электрона.

В элементах, входящих во второй период системы элементов, электроны сверх первых двух составляют второй слой, причём элемент первой группы этого периода — литий — содержит в этом слое 1 электрон, элемент второй группы — бериллий — 2 электрона, третьей группы — бор — 3 и т. д. до элемента седьмой группы фтора — с 7 электронами. Элемент нулевой группы третьего периода — неон — имеет во внешнем слое 8 электронов. В остальных элементах третьего периода с числом электронов от 11 в первой группе (натрий) до 17 седьмой (хлор) электроны



располагаются в третьем слое от 1 до 7, а в аргоне — элемент нулевой группы четвёртого периода — третий слой образует снова устойчивый слой из 8 электронов. В группах четвёртого периода повторяется заполнение нового слоя от 1 до 7.

В элементах с большим порядковым номером распределение электронов по слоям становится сложнее.

Надо обратить внимание на то, что все инертные газы, входящие в нулевую группу, имеют в своём внешнем слое восьмёрку электронов. Атомы некоторых элементов сравнительно легко отделяют электроны, находящиеся во внешнем слое, превращаясь в положительные ионы. Так, например, натрий, калий и другие щелочные металлы (1-я группа), теряя единственный электрон внешнего слоя, превращаются в одновалентные ионы, причём предыдущий слой с 8 электронами становится внешним, чем обеспечивается устойчивость электронной оболочки. Элементы второй группы — кальций, барий и другие щелочно-земельные металлы, теряя по 2 внешних электрона, превращаются в двухвалентные положительные ионы и в этом виде вступают в химические соединения.

Наоборот, элементы седьмой группы — галоиды, фтор, хлор, бром, иод, — имеющие во внешнем слое 7 электронов, вступают жадно в химические реакции, захватывают внешние электроны от тех элементов, с которыми они вступают в реакцию, и превращаются в одновалентные отрицательные ионы.

Элементы с 8 электронами во внешнем слое потому и оказываются инертными, что имеют в этом слое наиболее устойчивую систему электронов.

Химические реакции вызываются поведением внешних электронов.

**241. Энергетические уровни атома.** При разборе строения атома водорода было показано, что электрон водородного атома может находиться не на любом расстоянии от ядра, а только на некоторых определённых, изменяющихся не непрерывно, а скачкообразно.

Каждому возможному расстоянию соответствует определённая энергия электрона. Значения энергии, которыми может обладать электрон, называются уровнями энергии и также изменяются скачками. Уровни энергии можно обозначить графически (рис. 301).

Некоторую горизонтальную линию принимают за уровень, соответствующий невозбуждённому, так называемому нормальному состоянию атома, т. е. нахождению электрона на ближайшем вероятном расстоянии его от ядра.

На вертикали откладывают в условном масштабе значения избытков последующих значений энергии над энергией нормального состояния и через концы отрезков проводят горизонтальные прямые, которые и представляют графические изображения уровней энергии.

Разность энергий двух уровней даёт значение того кванта энергии, который испускает атом, когда его электрон перескакивает с одного из возможных

дальних расстояний на одно из возможных ближних расстояний. Частота излучения будет тем больше, чем дальше отстоят друг от друга уровни энергии на графике.

Так, для водорода световые волны испускаются при переходе на 2-й уровень с 3-го ( $\lambda = 656,3 \text{ м}\mu$ ), с 4-го ( $\lambda = 486,1 \text{ м}\mu$ ) или с 5-го ( $\lambda = 434,0 \text{ м}\mu$ ); ультрафиолетовые волны испускаются при переходе на первый уровень со 2-го ( $\lambda = 121,6 \text{ м}\mu$ ), или с 3-го ( $\lambda = 102,6 \text{ м}\mu$ ), или с 4-го ( $\lambda = 97,2 \text{ м}\mu$ ), и, наконец, испускаются инфракрасные волны, при переходе на 3-й уровень с 4-го или с 5-го, а также с 5-го на 4-й. Таким образом, испускание энергии атомом всегда происходит квантами.

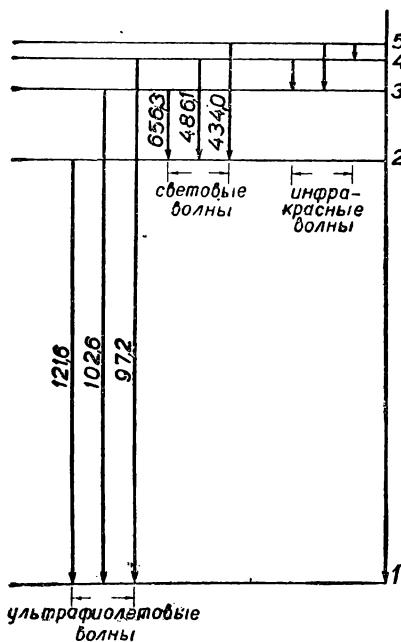


Рис. 301. Схема уровней энергии водородного атома.

Чтобы атом стал излучающим, он должен быть возбуждён, т. е. должен получить энергию от какого-либо источника энергии. Но возбуждение может быть вызвано не любым количеством энергии, а только таким, которое достаточно было бы, чтобы изменить запас энергии электрона, соответствующий одному из ближайших к ядру положений, на количество энергии, соответствующее одному из возможных дальнейших, т. е. переходу с нижнего уровня энергии на один из высших.

Значит, и поглощение энергии атомом происходит квантами.

Картина распределения уровней энергии, описанная для водорода, может в основном быть сохранена и для других атомов с большим, чем у водорода, числом электронов, но для них она значительно осложняется.

**242. Радиоактивность.** После выяснения основных свойств электронной оболочки возникает вопрос о составе атомного ядра. Самая постановка этого вопроса вызвана открытием „радиоактивности“ некоторых элементов. Остановимся очень кратко на первых ступенях открытия этого свойства.

Учащимся уже известно, что в 1895 г. Рентген открыл новый вид лучей, названных его именем, основные свойства которых изложены в § 229. Французский учёный Беккерель обратил внимание на то, что рентгеновские лучи выходят из того конца стеклянной трубки, который во время опыта светится желтовато-зелёным светом, сходным со светом некоторых флюоресцирующих веществ (§ 231, 5).

Беккерель поставил себе задачу исследовать, не испускаются ли рентгеновские лучи любыми флюоресцирующими веществами. В качестве вещества для исследования он выбрал двойную сернокислую соль урана. Метод исследования состоял в изучении действия куска урановой соли на фотографическую пластинку, завернутую в чёрную бумагу, совершенно не прозрачную для видимых лучей. К тому времени было уже известно, что рентгеновские лучи обладают большой проникающей способностью и действуют на фотографическую пластинку.

Положив в шкаф кусок урановой соли на обёрнутую чёрной бумагой фотографическую пластинку, Беккерель вследствие пасмурной погоды долго не мог выставить препарат на солнце, чтобы вызвать флюоресценцию.

Перед новым опытом выставления на солнечный свет он решил проверить пригодность пластинок, долго пролежавших в шкафу в темноте, и проявил одну из них. К своему удивлению он обнаружил очень интересный отпечаток на фотографической пластинке и без флюоресценции. Так в 1896 г. было открыто самопроизвольное испускание лучей, получившее вскоре название радиоактивности (от латинского слова *radius* — луч).

Вскоре за открытием Беккереля, Мария Складовская-Кюри открыла, что кроме урана обнаруживают радиоактивность элементы торий, полоний и радий, значительно превосходящий своей радиоактивностью все остальные радиоактивные элементы. К настоящему времени известно свыше 40 естественно-радиоактивных элементов.

Радиоактивные вещества обладают следующими свойствами, которые служат для их обнаружения:

- 1) действуют на фотографическую пластинку;
- 2) вызывают флюоресценцию;
- 3) разряжают заряженное тело, например электроскоп;
- 4) ионизируют воздух (§ 100);
- 5) повышают температуру окружающего вещества;
- 6) разрушают животные клетки, уничтожая болезнетворные и при длительном действии оказывая вредное влияние на здоровые.

Флюоресцирующим свойством радиоактивных веществ пользуются для получения составов, светящихся в темноте. Таким составом является смесь сернистого цинка с совершенно ничтожными долями радия. Им покрываются циферблаты часов, ружейные прицелы, чтобы можно было целиться в темноте. В настоящее время светящиеся составы применяются во многих отраслях техники и в военном деле.

Разрядением электроскопа пользуются как одним из самых удобных и чувствительных способов обнаружения радиоактивности и измерения степени её.

Воздействие радиоактивного излучения на живые клетки организма дало возможность использовать его в медицине. Лучами радия лечат раковые опухоли.

Препарат радия, заключённый в золотой футляр, помещают возможно ближе к месту опухоли и облучают его в течение времени, предписанного врачом. Лучи действуют на клетки опухоли разрушительнее, чем на здоровые ткани.

Помещая препарат радиоактивного вещества в калориметр со льдом, путём обычных калориметрических расчётов (ч. II, § 40, 103) определили энергию, непрерывно выделяемую радиоактивными веществами и проявляющуюся в тех действиях, которые перечислены выше. Измерения показали, что 1 г радия выделяет 140 калорий в час.

Всеобщность проявления закона сохранения и превращения энергии естественно поставила перед исследователями вопрос, за счёт чего происходит такое непрерывное выделение энергии. Для ответа на этот вопрос надо было изучить состав радиоактивного излучения.

**243. Состав радиоактивного излучения.** Для изучения состава радиоактивного излучения был применён приём, испытанный при изучении других излучений — катодного и анодного, именно действие на него магнитного или электрического поля. В тонкий канал, просверленный в свинцовой коробке, помещают частички радиоактивного вещества (рис. 302). Вокруг прибора создают

очень сильное магнитное поле. На рисунке силовые линии этого поля направлены перпендикулярно к плоскости рисунка и идут от читателя.

Опыты показали, что излучение радиоактивного вещества состоит из трёх частей: одна слабо отклоняется магнитным полем в сторону, соответствующую потоку положительно заряженных частиц (на рисунке — левая часть); другая сильно отклоняется в сторону противоположную, соответствующую потоку отрицательно заряженных частиц (на рисунке — правая часть); третья часть осталась не отклонённой.

Первая часть получила название альфа-лучи ( $\alpha$ -лучи); вторая — бета-лучи ( $\beta$ -лучи); третья — гамма-лучи ( $\gamma$ -лучи).

**244. Свойства альфа-лучей.** В § 236 было рассказано, в каких приборах и каким способом можно сосчитать число испускаемых частиц и пути их прохождения в воздухе и через различные вещества. По величине их отклонения в магнитном и электрическом поле можно рассчитать их скорости и отношение заряда к массе. Учитывая и другие наблюдения и расчёты, здесь не приведённые, можно перечислить следующие, добытые физикой, сведения об альфа-лучах.

1. Альфа-лучи — поток альфа-частиц ( $\alpha$ -частицы). Каждая  $\alpha$ -частица представляет собой двухвалентный ион гелия ( $m = 4$  атомным единицам массы<sup>1</sup>), заряд  $q = 2e$ ).

Помимо расчёта, это заключение основывается также и на том, что в трубке, в которую помещена крупинка соли радия, через некоторое время можно обнаружить наличие гелия. Во всех минералах, в которых находили радиоактивные вещества, испускающие  $\alpha$ -частицы, всегда содержался и гелий, тогда как в минералах, не содержащих радиоактивных веществ, гелия не находили. Вывод из этой закономерности мог быть только один: гелий образовался из альфа-частиц, испускаемых радиоактивными веществами.

2. Альфа-частицы вырываются из ядра атома.

3. Каждый атом испускает только одну альфа-частицу.

4. Испускание происходит неравномерно.

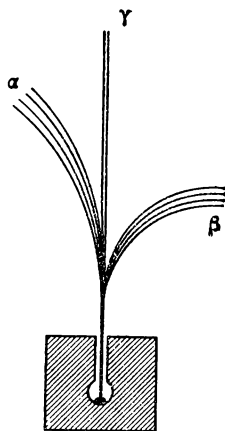


Рис. 302. Схема опыта по разделению радиоактивного излучения магнитным полем.

<sup>1</sup>) Атомная единица массы равна  $1/16$  массы атома кислорода.

5. Скорости альфа-частиц у разных элементов различны, но почти одинаковы для данного элемента, достигая величины порядка  $2 \cdot 10^9$  см/сек = 20 000 км/сек.

6. Для альфа-частиц любого радиоактивного элемента существует резко выраженная величина дальности действия, за пределами которой нельзя ни по каким признакам обнаружить наличия альфа-частицы. Дальность расстояния называется также пробегом альфа-частицы.

Например, пробег в воздухе альфа-частицы урана 2,7 см, радия 3,4 см, радия С 7 см; для некоторых других радиоактивных элементов пробеги лежат в пределах от 3 до 8,5 см. В телах твёрдых и жидких пробег альфа-частиц значительно короче.

7. Начальная энергия альфа-частицы при скорости в  $1,5 \cdot 10^9$  см/сек равна приблизительно  $10^{-5}$  эрга.

При такой энергии альфа-частица может образовать на своём пути в воздухе при атмосферном давлении и при 0° до 220 000 пар ионов. На образование одной пары ионов требуется энергия в 33 eV.

8. Чем тоньше слой радиовещества, тем большее действие обнаруживает  $\alpha$ -излучение сравнительно с другими видами излучения, так как в толстых слоях альфа-частицы, вылетающие из внутренних атомов, задерживаются в толще слоя. Это обстоятельство позволяет отделять альфа-частицы от других испускаемых частиц.

9. 1 г радия испускает в секунду  $3,7 \cdot 10^{10}$  альфа-частиц.

**245. Свойства бета-лучей.** 1. Бета-лучи ( $\beta$ -лучи) представляют собой поток электронов.

Отрицательный заряд бета-частиц установлен по направлению их отклонения в магнитном и электрическом полях. Величины отклонения позволили рассчитать скорости их движения, отношение заряда к массе, а в дальнейшем в отдельности заряд ( $e = 4,8 \cdot 10^{-10}$  CGSE) и массу ( $m = 9,035 \cdot 10^{-28}$  г).

2. Скорости бета-частиц значительно больше скоростей, наблюдаемых в катодных трубках, заключаясь между одной третьей скорости света и 0,998 её.

Скорости бета-частиц, испускаемых одним и тем же элементом, могут быть различными.

3. Бета-частицы образуются внутри ядра при происходящих в нём преобразованиях и им испускаются, но они не являются составной частью ядра (см. § 249). Каждый атом испускает одну бета-частицу.

4. Проникающая способность бета-частиц больше, чем альфа-частиц; для различных элементов она различна; также различна для разных частиц от одного и того же элемента.

Бета-лучи могут ещё в значительном количестве проходить через алюминиевую пластинку в несколько миллиметров толщиной. Поглощение их в отличие от поглощения альфа-частиц происходит постепенно.

5. Ионизирующая способность бета-частиц меньше, чем альфа-частиц.

**246. Свойства гамма-лучей.** 1. Гамма-лучи ( $\gamma$ -лучи) не отклоняются от своего прямолинейного пути ни в магнитном, ни в электрическом поле. Они представляют собой один из видов электромагнитных волн с длинами меньшими, чем у рентгеновских лучей, в пределах от  $40 \cdot 10^{-11}$  до  $10^{-11}$  см (возможно, и меньше).

2. Проникающая способность гамма-лучей в 10—100 раз больше проникающей способности бета-частиц и в 1000—10 000 раз больше, чем у альфа-частиц.

Так, они проходят через алюминиевую пластинку толщиной в несколько десятков сантиметров. Поглощение их происходит постепенно. Свинцовая пластинка в 1,3 см ослабляет гамма-лучи в 2 раза.

3. Гамма-лучи действуют на фотографическую пластинку. Благодаря им Беккерель мог открыть радиоактивность урана.

4. Излучение гамма-лучей никогда не происходит отдельно, самостоятельно, а всегда сопровождает испускание бета- или альфа-частиц.

**247. Период полураспада радиоактивных элементов.** Все наблюдения над естественными радиоактивными элементами приводят к заключениям: а) радиоактивность — самопроизвольное преобразование ядра; б) преобразование происходит не сразу во всех ядрах; в) в каждом элементе за одни и те же промежутки времени распадается одна и та же часть находящихся в наличии ядер.

Как убедиться в последнем свойстве? Берётся отмеренная масса какого-либо радиоактивного элемента, например полония. Зная его атомный вес (для полония 208) и зная массу в граммах каждой единицы атомного веса ( $1,66 \cdot 10^{-24}$  г), можно рассчитать число атомов во взятом образце. Поместив вещество в спинтарископ или камеру Вильсона, можно сосчитать по числу спинтиллиций число упавших на экран альфа-частиц или число распавшихся атомов за определённое время. Для полония оказалось, что из каждых 100 000 атомов за сутки распалось 495.

Продолжая наблюдение в течение вторых суток, нашли, что из каждых нераспавшихся к началу вторых суток 100 000 атомов вновь распалось то же число 495. В течение третьих суток из каждых вновь оставшихся в наличии 100 000 атомов снова распадается то же число атомов. Из всех наблюдений получается для всех радиоактивных элементов общий закон: количество распадающихся за определённое время атомов всегда составляет одну и ту же часть от находящихся в данное время в наличии атомов. Полное число распавшихся атомов, конечно, зависит от величины взятого образца. Отношение же числа распадающихся в единицу времени атомов к общему числу атомов не зависит от величины взятого образца и является характеристикой каждого радиоактивного элемента.

По этой характеристике нетрудно рассчитать, через сколько времени распадается половина взятого вещества.

Время, необходимое для распада половины атомов вещества, получило название периода полураспада.

Приведём для примера периоды полураспада упоминаемых выше элементов: для урана  $4,56 \cdot 10^9$  лет (4,56 миллиарда лет), для радия 1590 лет, для полония 140 дней.

**248. Превращения радиоактивных элементов.** Что же получается после естественного распада ядер начального или исходного вещества? Химический и спектроскопический анализы показывают, что атомы, получившиеся после выбрасывания альфа- или бета-частиц, образуют химическое вещество, отличное от начального с иными химическими свойствами.

Эти экспериментальные данные легко можно предсказать путём теоретических рассуждений.

Вспомним, что в таблице Менделеева все элементы расположены в порядке возрастания на единицу положительного заряда ядра, так что порядковый номер показывает число элементарных положительных зарядов ядра. В то же время место, занимаемое элементом, характеризует его химические свойства. Ядро, испустившее альфа-частицу, теряет два элементарных положительных заряда (с последующим отщеплением двух электронов внешней оболочки) и четыре атомные единицы массы.

Следовательно, у вновь образующегося элемента — продукта распада — порядковый номер будет на две единицы меньше номера исходного элемента. Поэтому он должен быть помещён на две группы влево от исходного элемента.

Но это новое положение в периоде и в группе системы Менделеева соответствует новым химическим свойствам.



Вылет из ядра бета-частицы влечёт за собой возрастание положительного заряда ядра на единицу и вследствие этого присоединение одного электрона к внешней оболочке; продукт распада переходит в системе Менделеева на одну группу вправо и обнаруживает те свойства, которые соответствуют его новому положению.

Эта закономерность, подтверждаемая экспериментом, носит название „правила смещения“.

Исследование продуктов распада показывает, что они оказываются также радиоактивными, т. е. дающими начало новым продуктам распада.

Поэтому различные радиоактивные вещества можно собрать в радиоактивные семейства, в которых происходят последовательные преобразования одних элементов в другие. Все естественные радиоактивные элементы составляют три семейства, родоначальники которых уран, актиний, торий.

Приведём для примера образец одного из семейств — семейство урана (рис. 303).

В таблице символ каждого продукта, образующегося в результате превращения, заключён в кружок. Верхнее число внутри кружка обозначает массовое число (атомный вес в целых единицах) образующегося атома; нижнее — порядковый номер в системе Менделеева, определяющий химические свойства элемента. Стрелки между кружками показывают направление превращения.

Греческие буквы  $\alpha$  или  $\beta$ , поставленные возле стрелок, показывают, произошло ли превращение путём испускания альфа-частицы или бета-частицы. Числа, стоящие возле стрелок, дают периоды полураспада в годах или днях, часах или минутах, или секундах.

Обратите внимание на то, что из радия (Ra 5-й по порядку кружок) получается радиоактивный газ, называемый „эманацией радия“ или „радоном“ (Rn). Семейство заканчивается нерадиоактивным веществом — свинцом.

**249. Строение атомного ядра.** Начало выяснения вопроса о строении атомного ядра положено опытами Резерфорда в 1919 г. Он направлял альфа-частицы одного из радиоактивных веществ (летащие со скоростью 19 200 км/сек) на некоторые вещества с малым атомным весом, начиная с азота. Наблюдения за путями альфа-частиц велись при помощи спинтарископа и камеры Вильсона так, как это описано выше в § 236.

Вслед за Резерфордом наблюдения производились и другими учёными, в руках которых накопилось свыше двадцати тысяч фотографий, содержащих до 400 000 трэков альфа-частиц.

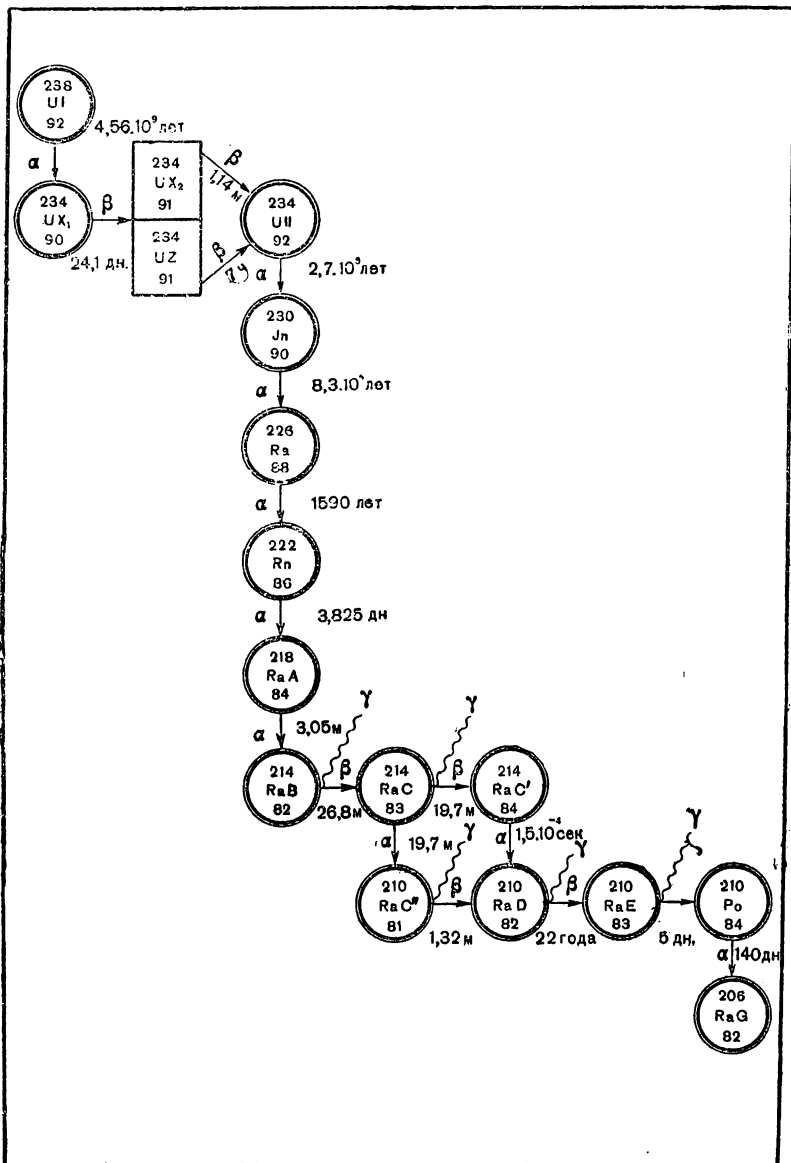


Рис. 303. Радиоактивное семейство урана.

Эти исследования привели к следующим результатам.

На некоторых снимках (рис. 304) были видны „вилки“ трэков, у которых одна ветвь была тонкой и длинной, другая — толстой („жирной“) и короткой. Ни та ни другая ветвь не подходили на трэк альфа-частицы. Измерения показали, что тонкая ветвь вызвана протоном, т. е. ядром водорода, масса которого может быть принята за единицу атомной массы (так как весьма мало отличается от неё), заряд которой равен единице положительного элементарного заряда.

Выбивание протонов было получено при бомбардировке и других ядер. Поэтому *протон можно считать составной частью ядра.*

Попутно с первым выводом получился и второй.

Жирный след принадлежит ядру, поглотившему альфа-частицу. Что получается в результате такого поглощения? Разберём это на примере азота.

Масса ядра азота равна 14, атомный номер, а следовательно, и заряд ядра, равен 7. Масса альфа-частицы равна 4 единицам и заряд равен 2. Если бы произошло только поглощение альфа-частицы ядром, то общая их масса увеличилась бы до 18 единиц и заряд до 9. Но выбитый протон унёс с собой единицу массы и единицу заряда. Остаток сохранил 17 единиц массы и 8 единиц заряда.

Атомы с 8 единицами заряда занимают восьмое место в таблице Менделеева и представляют собой атомы кислорода. Химические свойства элемента определяются его табличным номером. Вещество, полученное в результате преобразования атомов азота, является настоящим кислородом. Только его атомный вес равен 17 вместо обычного 16.

Вещества, отличающиеся атомными весами, но занимающие одно и то же место в системе Менделеева, называются *изотопами*<sup>1)</sup>.

Таким образом, опыты Резерфорда доказали превращаемость одних элементов в другие и разрушили существовавшее до тех пор представление о неизменности элементов.

Надо иметь в виду, что такой способ превращения не имеет практического значения для получения нового элемента в боль-

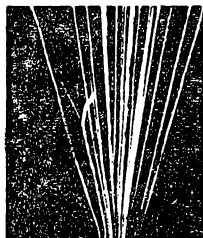


Рис. 304. Следы альфа-частиц в азоте.

Видна вилка, образованная альфа-частицей задолго до конца её пробега. Более тонкий след принадлежит протону. Более жирный — ядру, захватившему альфа-частицу.

<sup>1)</sup> От греческих слов *изос* — равный, *топос* — место.

ших количествах. Как показывают расчёты по фотографическим снимкам, только 1 альфа-частица из 50 000 проникает внутрь ядра азота.

Только ли протоны входят в состав ядер элементов? В 1930 г. при бомбардировке бериллия (4-й номер в системе Менделеева) альфа-лучами полония (не испускающего ни бета-частиц, ни  $\gamma$ -лучей) было отмечено новое излучение, превосходящее по своей проникающей способности альфа-частицы, бета-частицы, рентгеновские лучи, но сравнимое с  $\gamma$ -лучами. Например, при прохождении через слой свинца в 2 см интенсивность излучения уменьшалась только на 13%.

Произведя наблюдения в ионизационной камере (§ 101), Ирэн и Фредерик Жолио-Кюри обнаружили, что новое излучение сообщает при столкновении такую скорость ядрам лёгких элементов — водорода и гелия, — какую не могли бы придать  $\gamma$ -лучи.

Поэтому пришлось допустить существование новых частиц.

Их большая проникающая способность сравнительно с альфа- и бета-частицами свидетельствовала о том, что они испытывают меньшее взаимодействие с положительно заряженными ядрами. Такое меньшее взаимодействие могло быть только в том случае, если бы эти частицы не обладали электрическим зарядом, т. е. были нейтральными.

На этом основании им было дано название нейтронов.

Из столкновения нейтронов с ядрами атомов водорода и гелия и по сообщённым этим ядрам скоростям удалось определить массу нейтрона. Она оказалась близка к массе протона и может быть принята за единицу. Более точное её значение  $m = 1,00893$  единицы атомного веса.

Символическое обозначение нейтрона  ${}_0n^1$ ; для протона  ${}_1p^1$  (число внизу слева обозначает число элементарных положительных зарядов, число наверху справа — число атомных единиц).

Русский физик Д. Д. Иваненко обосновал теорию строения ядра, по которой *ядро построено только из нейтронов и протонов.*

Число протонов в ядре равно заряду ядра ( $Z$ ), т. е. порядковому номеру элемента в системе Менделеева.

Число нейтронов равно разности чисел, обозначающих число атомных единиц ( $A$ ) и число протонов, т. е. ( $A - Z$ ).

Так ядро углерода  ${}_6C^{12}$  содержит 6 протонов и 6 нейтронов; ядро натрия  ${}_{11}Na^{23}$  11 протонов и 12 нейтронов.

Как же при таком составе ядра может происходить выбрасывание ядром электронов?

Протоны и нейтроны обладают тем свойством, что, будучи элементарными частицами, могут превращаться друг в друга. При этих превращениях создаются частицы, которых до этого не было в ядре. Если нейтрон превращается в протон с зарядом  $+e$ , то при этом возникает электрон с зарядом  $-e$ , который как бы „отщепляется“ от нейтрона. Если же протон превращается в нейтрон, то при этом от него отщепляется позитрон — частица с массой, равной массе электрона и с зарядом  $+e$ .

При этих преобразованиях соблюдается закон сохранения энергии-массы.

**250. Искусственная радиоактивность.** Продолжая изучать действие альфа-частиц на ядра разных веществ, Фредерик Жолио и Ирэн Кюри поместили бомбардируемый алюминий в камеру Вильсона и наблюдали появлявшиеся трэки. Среди них были отмечены тонкие линии, похожие на трэки электронов. Но под действием магнитного поля тонкие трэки изогнулись в сторону, противоположную той, в которую должны бы были изогнуться трэки электронов. Это обстоятельство указывало на то, что частицы, образующие такие трэки, были позитронами.

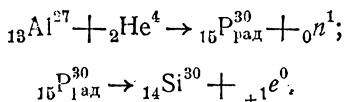
Дальнейшее наблюдение обнаружило совершенно новое явление: испускание позитронов продолжалось и после того, как была прекращена бомбардировка алюминия альфа-частицами. Через каждые  $3\frac{1}{4}$  минуты число позитронов, возникающих в одну секунду, уменьшалось вдвое. Явление вполне походило на явление радиоактивного распада. Только в результате распада получалось испускание не альфа-частиц и не электронов, а позитронов.

Явление получило название искусственной радиоактивности.

Позднейшие исследования показали, что искусственная радиоактивность, выражающаяся в испускании быстрых электронов, позитронов или протонов, может быть вызвана бомбардировкой альфа-частицами, протонами, нейтронами и ядрами так называемого тяжёлого водорода — дейтронами ( ${}^2_1D$ ).

Из 60 исследованных элементов 40 дали при бомбардировке радиоактивные вещества. Из одного и того же элемента в разных случаях можно получить различные искусственные радиоактивные вещества. Общее число полученных таким образом радиоактивных элементов доходит до 270. Некоторые из искусственно полученных радиоактивных элементов химически подобны не радиоактивным элементам и в отличие от них носят те же названия с прибавкой слова „радио“: радиоазот, радиокремний, радиофосфор и т. п.

Пример одной из ядерных реакций, приводящей к образованию радиофосфора:



### 251. Применение искусственно-радиоактивных веществ.

Примесь самых ничтожных количеств искусственных радиоэлементов к такому же нерадиоактивному элементу нисколько не изменяет его химических свойств, но позволяет открыть его присутствие при помощи приборов, обнаруживающих частицы.



Рис. 305. Радиоавтограф помидорного листа.

Отпечаток образовался при наложении листа на фотографическую пластинку. Растение питалось радиофосфором, скопления которого отмечены светлыми местами.

Если в исток какого-либо ручья пустить раствор любой соли с примесью следов соли того же радиоактивного элемента, то можно проследить за всеми разветвлениями этого потока.

Подобным образом изучалась скорость всасывания желудком солей натрия, иода, брома, хлора. Экспериментатор зажимал в руке счётчик излучаемых частиц и принимал исследуемую соль с примесью искусственно-радиоактивного вещества. Показание счётчика указывало на скорость всасывания соли.

Лист помидора, питаемого радиофосфором, положенный на фотографическую пластинку, дал как бы „автопортрет“, т. е. распределение фосфора в листе (рис. 305).

М. И. Корсунский в своей книге „Атомное ядро“ рисует такую перспективу использования радиоактивных веществ в

борьбе с заболеванием раком (стр. 219).

„Если учесть, что в нашем распоряжении большой выбор радиоактивных изотопов и что с использованием этих изотопов могут быть синтезированы различные сложные вещества, которые будут избирательно поглощаться в различных частях организма, то не трудно понять, что возможно будет подобрать такие вещества, которые будут избирательно поглощаться тканью злокачественных опухолей. Поскольку радиоактивные вещества действуют разрушающим образом на раковую опухоль, поглоще-

ние таких веществ может явиться эффективным средством борьбы против рака“.

**252. Энергия атомного ядра.** Элементарные частицы, составляющие ядро атома, занимают очень малый объём, в котором они расположены чрезвычайно тесно. Так самое большое ядро — ядро урана — имеет радиус  $\sim 10^{-12}$  см и объём  $\sim 3,4 \cdot 10^{-36}$  см<sup>3</sup>. В этом объёме сосредоточено 92 протона и 146 нейтронов.

Протоны, находясь в ядре на таких ничтожно малых расстояниях, должны испытывать громадные силы отталкивания соответственно закону Кулона для взаимодействия одноимённых зарядов. Но они не разлетаются, и ядро сохраняет устойчивость.

Опыты показали, что на *очень малых расстояниях между всеми частицами*, образующими ядро, *в том числе и между протонами, появляются и силы притяжения*. В пределах ядра силы притяжения преобладают над силами отталкивания.

Эти ядерные силы не являются ни силами тяготения, ни электростатическими силами; их природа не может считаться выясненной.

Энергия, необходимая для того, чтобы преодолеть силы, связывающие частицы в ядро и разделить его на составляющие части, называется энергией связи.

Энергия связи в то же время показывает величину той энергии, которая выделяется, когда частица присоединяется к ядру.

Как показывают вычисления, на каждую ядерную частицу энергия связи равна  $8\frac{1}{2}$  MeV для всех почти ядер, кроме самых массивных, для которых она уменьшается до 7 MeV.

Легко подсчитать энергию связи для альфа-частицы (2 протона + 2 нейтрона; 34 MeV) или для ядра урана (238 частиц;  $7 \cdot 238 = 1666$  MeV).

**253. Освобождение атомной энергии.** Из предыдущих рассуждений и расчётов видно, что в ядре сосредоточены громадные количества энергии.

Частично атомная энергия извлекается из тел при помощи химических реакций, происходящих в электронных оболочках атома. Сравнительно с запасами ядерной энергии выходы энергии при химических реакциях очень малы.

Так, 1 г угля при сгорании даёт 8 ккал, 1 моль углерода (12 г) 96 ккал, при окислении моля водорода 58 ккал.

Как же высвободить хотя бы частично ядерную энергию? Надо вызвать ядерную реакцию.

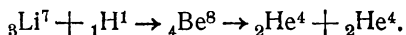
Ядерная реакция вызывается проникновением в ядро внешней частицы.

Что при этом происходит с ядром? Происходит возбуждение ядра, т. е. приобретение ядром излишней энергии.

Такое возбуждённое ядро может: а) или испустить избыток энергии в виде гамма-кванта, б) или выбросить какую-либо другую частицу, превратившись в новое ядро.

В качестве примера рассмотрим одну из первых осуществлённых ядерных реакций: при обстреле лития с массой 7 протонами его ядро распадается на два ядра гелия.

Уравнение ядерной реакции в условных обозначениях:



При расчёте атомных масс получается слева:

$$7,01818 + 1,00813 = 8,02631;$$

справа:

$$4,00389 + 4,00389 = 8,00778.$$

Правая сумма меньше левой на 0,01853 атомных единиц массы.

Это изменение массы связано с выделением энергии при протекании данной ядерной реакции.

Связь между изменениями массы и энергии устанавливается формулой Эйнштейна:

$$\Delta E = \Delta mc^2,$$

где  $c$  есть скорость света. По этой формуле мы можем рассчитать энергию, выделенную при рассматриваемой ядерной реакции. Ядерная (атомная) единица массы составляет  $1,66 \cdot 10^{-24}$  г.  $0,01853$  ядерных единицы  $= 0,0307598 \cdot 10^{-24}$  г. По формуле Эйнштейна будем иметь:

$$\begin{aligned} 0,0307598 \cdot 10^{-24} (3 \cdot 10^{10} \text{ см/сек})^2 &= 0,2768382 \cdot 10^{-4} \text{ эрга} = \\ &= 17500000eV = 17,5MeV. \end{aligned}$$

Но эта принципиально возможная добыча ядерной энергии практически не имеет значения по двум причинам.

Во-первых, вероятность этой реакции очень мала. Ядра представляют очень маленькие мишени (линейный размер порядка  $10^{-13}$  —  $10^{-12}$  см); они находятся друг от друга на расстояниях, в 10 000 раз превышающих их размеры. Поэтому из десяти миллионов бомбардирующих протонов только один попадает в ядро лития.

При бомбардировке других элементов получают подобные же соотношения.



Во-вторых, чтобы частица была захвачена ядром, надо, чтобы она очень близко подошла к нему. Но положительно заряженная частица испытывает от положительно заряженного ядра отталкивательное действие тем большее, чем больше порядковый номер вещества. Для преодоления этого отталкивания частица должна налетать на ядро с очень большой энергией разгона.

Естественные радиоактивные вещества выбрасывают альфа-частицы со средней энергией в  $5-7\text{ MeV}$ .

Изучение ядерных реакций для различных веществ могло продвинуться вперёд, когда были изобретены приборы циклотроны, позволяющие разгонять бомбардирующие частицы с очень большими скоростями и доводить их энергию до  $100\text{ MeV}$ .

Но сообщение такой энергии частице также требует затраты большой энергии, почему выделение энергии при таком ядерном распаде не является практически выгодным.

**254. Деление ядра урана.** Излучая ядерные реакции, многие учёные производили бомбардировку урана нейтронами.

Эти исследования показали, что ядро урана делится на две сравнительно крупные части и выделяет при этом  $2-3$  нейтрона.

В некоторых опытах ядро урана (порядковый номер 92) делилось на два осколка: ядро бария (порядковый номер 56, атомное число 138) и ядро криптона (порядковый номер 36, атомное число 86).

В различных опытах были обнаружены другие продукты деления, например бром, иод, стронций, рубидий.

При делении урана освобождается около  $200\text{ MeV}$  энергии на каждый распавшийся атом урана.

Распад килограмма урана дал бы почти в  $2\,000\,000$  раз больше энергии, чем сгорание  $1\text{ кг}$  самого лучшего угля (теплотворная способность  $8\,000\text{ ккал/кг}$ ).

**255. Цепная реакция при делении урана.** В предыдущем параграфе было отмечено, что, по исследованиям многих учёных, деление урана при его бомбардировке нейтронами сопровождается выбрасыванием новых, вторичных, нейтронов. Числа вторичных нейтронов составляют от  $1$  до  $3$  на каждый попадающий в ядро нейтрон.

Почему происходит выбрасывание нейтронов при делении?

В ядрах лёгких элементов (стоящих в начале и в середине таблицы Менделеева) и тяжёлых элементов (стоящих в конце её) имеет место неодинаковое соотношение между числами протонов и нейтронов в ядре.

Так, в ядре кислорода на 16 тех и других частиц приходится 8 протонов и 8 нейтронов, в сере из 32 частиц на каждый вид приходится по 16, но в железе из 56 частиц 26 протонов (на 1 протон 1,15 нейтрона), в криптоне из 84 частиц 36 протонов (на 1 протон 1,33 нейтрона), в барии из 138 частиц 56 протонов (на 1 протон 1,46 нейтрона) и в уране из 238 частиц 92 протона (на 1 протон 1,58 нейтрона).

Из этих соотношений можно заключить, что при распаде самого массивного ядра урана на два средних по массивности ядра в каждом из осколков окажется сперва избыток нейтронов сверх нормального для этих элементов соотношения между протонами и нейтронами.

Часть этого избытка выбрасывается в виде вторичных свободных нейтронов (остальные могут испытывать различные преобразования).

Какие действия могли бы произвести эти вторичные нейтроны при наиболее благоприятных идеализированных условиях? Предположим, что из трёх выброшенных нейтронов два попадут в ядра урана. Каждый из них вызовет деление ядра урана на два осколка и выбрасывание новых нейтронов. В предположенном нами идеальном случае каждый нейтрон вызовет образование двух вторичных нейтронов, которых теперь окажется уже 4. Эти четыре нейтрона вызовут деление 4 ядер урана и освобождение 8 вторичных нейтронов. Так непрерывно будет возникать вдвое увеличивающееся количество разделённых ядер урана и вдвое увеличивающееся количество вторичных нейтронов.

Происходящий подобным образом процесс называется цепной реакцией.

При цепной реакции процесс сам собой непрерывно ускоряется, и количество выделяемой энергии непрерывно увеличивается.

**256. Причины, препятствующие цепной реакции.** При изучении деления урана надо иметь в виду, что добываемый из недр земли уран представляет смесь трёх изотопов, т. е. элементов, имеющих один и тот же заряд ядра в 92 элементарные единицы, но различное число ядерных частиц, именно 238, 235, 234. Изотоп 235 составляет  $\frac{1}{140}$  (или 0,7%) общего числа атомов рудного урана, изотоп 234 представлен в совершенно ничтожных количествах, основную массу урана образует изотоп 238.

Отношение изотопов 238 и 235 к попадающим в их ядра нейтронам различно.

Одной из причин, препятствующих развитию цепной реакции, является поглощение ураном 238 медленных нейтронов без деления.

Русские физики Г. Н. Флёрв и К. А. Петржак выяснили, что деление урана 238 могут вызвать только те нейтроны, энергия которых больше одного миллиона вольт.

Что происходит с нейтронами, поглощёнными ядром без деления, рассмотрим в следующем параграфе. Заметим, что ядра изотопов 235 могут делиться под действием как быстрых, так и медленных нейтронов.

Обратимся к выяснению других причин, препятствующих развитию цепной реакции.

Второй причиной является вылет нейтронов через поверхность куска (блока) урана. Не всякий возникший при делении урана нейтрон будет захвачен другим ядром урана. Нейтрон может проходить значительные слои вещества, прежде чем он будет захвачен ядром. Вероятность захвата тем меньше, чем больше энергия и, следовательно, скорость нейтрона.

Поэтому слои облучаемого урана не должны быть тонкими. Для каждого куска урана существует определённый минимальный „критический“ объём, при котором начинает устраняться возможность потери нейтронов благодаря вылету их из куска. Кроме того, куски урана надо окружать веществами, отражающими нейтроны. В качестве такого вещества чаще всего используют графит. При наличии графитовых стенок часть нейтронов, отразившись от них, вернётся в уран.

Третьей причиной является наличие примесей к урану посторонних веществ. Примеси могут вызывать поглощение нейтронов. Такие поглощённые примесями вторичные нейтроны пропадают для производства цепной реакции. Поэтому для получения цепной реакции необходима очень тщательная химическая очистка урана.

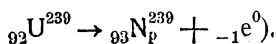
**257. Получение новых элементов.** В § 256 был поставлен вопрос, что происходит с нейтроном, поглощённым ядром урана  ${}_{92}\text{U}^{238}$  без деления. Добавочный нейтрон, не увеличивая величины заряда ядра, прибавляет единицу атомной массы.

Уран  ${}_{92}\text{U}^{238}$  превращается в  ${}_{92}\text{U}^{239}$  ( ${}_{92}\text{U}^{238} + {}_0\text{n}^1 \rightarrow {}_{92}\text{U}^{239}$ ).

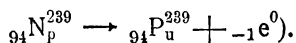
Этот изотоп урана оказывается радиоактивным, испускающим бета-частицы с периодом полураспада в 23 минуты.

Вылет бета-частицы повышает положительный заряд вновь образующегося элемента на 1; следовательно, этот элемент займёт в таблице Менделеева 93-е место.

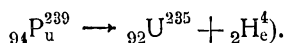
Так полученный искусственный элемент был назван нептунием; его химический знак  $\text{Np}$  (ядерная реакция:



Нептуний радиоактивен, испускает бета-частицы и превращается с периодом полураспада в 2,3 дня в новый искусственный элемент с зарядом в 94 и атомной массой в 239. Он назван плутонием, его химический знак  $P_u$  (ядерная реакция:



Плутоний радиоактивен, испускает альфа-частицы и превращается с периодом полураспада в 24 000 лет в уран 235 (ядерная реакция:



Нептуний и плутоний в природе не обнаружены. Они называются трансурановыми (заурановыми) элементами, так как занимают 93-е и 94-е места за 92-м местом урана<sup>1)</sup>.

Как показали исследования, плутоний так же легко, как и уран 235, подвергается делению, обеспечивающему цепную реакцию.

**258. Ядерный взрыв.** Мы видели (§ 254), что распад ядра урана или плутония происходит с выделением 200 *MeV*. Распад грамм-атома вещества (235 г  $U^{235}$  или 239 г  $Pu^{239}$ ) дал бы энергию в количестве 4,6 миллиарда *ккал*, или 5 400 000 *квт-ч*.

Если бы распад, даже неполный, произошёл в доли секунды, то была бы развита громадная мощность. Например, при распаде тысячной доли ядер за 0,01 секунды мощность составила бы  $2 \cdot 10^9$  *квт*. Такое выделение энергии представляет собой взрыв.

Температура распадающегося вещества поднимается до миллионов градусов. Внезапное грандиозное повышение температуры вызывает в воздухе сильнейшую волну сгущения. Эта волна несёт разрушения и пожар.

Приспособление для ядерного взрыва получило название „атомной бомбы“.

В момент взрыва вещества, составляющие „атомную бомбу“, обращаются от развития теплоты в газ, который испускает ослепительный свет.

Губительное действие атомной бомбы не ограничивается временем взрыва. Продукты деления радиоактивны. Место, где произошёл взрыв, некоторое время<sup>2)</sup> будет насыщено огромным

<sup>1)</sup> Теперь искусственно получены два новых элемента: америций на 95-м и кюрий на 96-м месте.

<sup>2)</sup> Практически можно считать, что радиоактивное вещество перестаёт заметно излучать, как бы „вырождается“, в течение времени, равного двадцатикратному периоду полураспада.

количеством радиоактивных веществ, дающих проникающее излучение невиданной мощности. Такое излучение вредно действует на организм.

В настоящее время два государства имеют атомные бомбы: СССР и США.

Так как в воздухе постоянно носятся отдельные нейтроны, как следы распадов, то как предотвратить возникновение взрыва бомбы в момент её изготовления от случайно проникшего в неё случайно блуждающего нейтрона?

В книге Бертелло<sup>1)</sup> описан принцип устройства бомбы из плутония (или из урана 235).

Чтобы не произошло взрыва в момент изготовления, берётся вещество в объёме, меньшем критического (§ 256).

Считается, что для плутония критическим объёмом является объём шара с радиусом в 10 см.

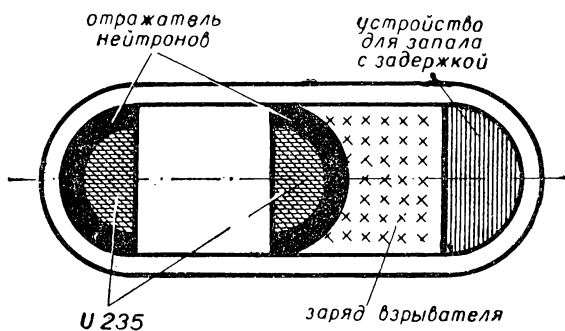


Рис. 306. Схематическое изображение атомной бомбы.

Если изготовить из плутония два полушария такого размера, чтобы объём каждого из них был меньше критического, то они порознь будут устойчивыми.

Если эти полушария будут сомкнуты, общий объём станет больше критического, и в этот момент возникнет взрыв.

В оболочке бомбы оба полушария разделены (рис. 306).

Со стороны одного полушария помещается заряд какого-либо взрывчатого вещества. Приёмом, обычным для взрывчатых снарядов, производится в назначенный момент взрыв запала, полушария смыкаются, и происходит взрыв бомбы.

1) „От атома к атомной энергии“, 1948, стр. 206.

**259. Урановый котёл.** Установки для использования энергии деления атомных ядер получили название котлов.

Котёл состоит<sup>1)</sup> из замедлителя быстрых нейтронов, весом в несколько тонн, обыкновенно в форме почти шаровой. В качестве замедлителя большей частью применяется графит.

Через замедлитель пропускаются в определённом порядке стержни металлического урана. Если в какой-либо точке случайный блуждающий нейтрон проникнет в ядро урана стержня, то при делении ядра вылетят три нейтрона. Проникая в замедлитель, эти нейтроны движутся по сложной траектории, теряя последовательно свою энергию в результате случайных столкновений с ядрами атомов.

Какова возможная судьба этих замедленных нейтронов? Так как объём котла больше критического, то по крайней мере один из этих нейтронов проникнет в какой-либо урановый стержень, будет захвачен ядром изотопа урана 235 и произведёт новое деление.

Далее возможно, что один из остальных нейтронов получит в замедлителе такую скорость, что будет захвачен изотопом урана 238 и после двух бета-излучений даст начало ядру плутония.

В таком котле освобождается энергия распада, от которой происходит быстрое повышение температуры котла.

Для продолжения его работы необходимо его охлаждение обтекающей водой. Один из первых котлов устройства 1944 г. отдавал воде мощность в 1800 квт. Это число показывает, что в каждую секунду в котле происходило деление:

$$11,2 \cdot 10^{18} \text{ MeV} : 200 \text{ MeV} = 6 \cdot 10^{16} \text{ делений}^2).$$

Если допустить, что один нейтрон при захвате ядром урана вызывает образование одного атома плутония, то в описанном выше котле образовывалось в секунду  $6 \cdot 10^{16}$  атомов плутония, примерно 24 микрограмма<sup>3)</sup>, что за сутки давало около 2 г.

Позднейшие более мощные котлы повышали выход плутония до 1 кг, а может быть и более.

Время от времени урановые стержни извлекаются из котла и подвергаются химической обработке, которая и даёт плутоний вместе с другими элементами, образовавшимися при делении.

---

<sup>1)</sup> Описание заимствовано из вышеназванной книги Бертело.

<sup>2)</sup>  $1800000 \cdot 10^7 \text{ эрг} : 1,6 \cdot 10^{-12} = 11,2 \cdot 10^{24} \text{ eV} = 11,2 \cdot 10^{18} \text{ MeV}$ .

<sup>3)</sup> Одна атомная единица массы соответствует  $1,66 \cdot 10^{-24}$ ;  $1,66 \cdot 10^{-24} \cdot 239 \cdot 6 \cdot 10^{16} = 24 \cdot 10^{-6} \text{ г} = 24 \text{ микрограмма}$ .

Не распавшийся уран после химической обработки снова может быть изготовлен в виде стержней, вновь вставляемых в котёл и используемых для дальнейшего деления.

Вынимаемые из котла урановые стержни являются источником интенсивного радиоактивного излучения.

Обработка их может производиться только при управлении на расстоянии. Обслуживающий персонал должен быть защищён толстыми экранами, непрозрачными для радиоактивного излучения.

Также все операции в котле производятся автоматически или при управлении на расстоянии.

**260. Практическое использование атомной энергии.** Выше было показано, какое громадное количество энергии выделяется в ходе ядерного деления. Если замедлять ход такого деления, то можно лишить его взрывного характера и использовать для технических целей.

Прежде всего атомная энергия выделяется в форме теплоты. Эта теплота может быть использована для работы теплоэлектростанций.

Как известно, коэффициент полезного действия тепловой установки зависит от разности температур нагревателя и холодильника (ч. II, § 136). Урановый котёл даёт возможность получения высоких температур; следовательно, возможно значительно повышать температуру нагревателя и тем самым повышать к. п. д. установки.

Кроме того, громадное преимущество теплоцентрали, использующей атомную энергию, перед существующими теплоцентралями состоит в чрезвычайно малом использовании исходного вещества: чтобы получить от сжигания угля ту энергию, которую даёт 1 г урана, именно 22 000 *квт-ч*, надо было бы сжечь 2,5 *т* угля.

Неудобство в устройстве таких теплостанций состоит пока в том, что они должны быть снабжены громоздкими средствами защиты от радиоактивных излучений и должны быть соединены с заводами для химической обработки урановых стержней.

Во всяком случае решение вопроса об использовании атомной энергии раскрывает перед наукой и техникой блестящие перспективы, и теперь трудно предвидеть, каких высот может достигнуть в этом отношении научно-техническая мысль.

Но применение атомной энергии для беспредельного развития техники и для облегчения человеческого труда возможно только в социалистических странах, в которых царит свободный труд и руководящим началом которых является благо всего населения.

В капиталистических странах, где правящая клика капиталистов-монополистов стремится лишь к дальнейшему собственному обогащению за счёт ограбления трудового народа, атомная энергия нашла своё применение прежде всего в создании оружия массового истребления — атомной бомбы, с помощью которого империалисты надеются запугать свободолюбивые народы мира и поставить их на службу себе. Но расчёты капиталистов на мировое господство, опирающиеся на монопольное владение смертоносным оружием, оказались иллюзорными.

Учёные Советского Союза, выполняя указания вождя всего трудового народа товарища Сталина, положили конец монопольному владению секретом атомного оружия. Советский Союз, создав своё атомное оружие, продолжает стоять неизменно: стражем мира во всём мире и попрежнему придерживается своей позиции безусловного запрещения применения атомного оружия.

**261. Природные запасы элементов, подвергающихся делению.** Основным элементом, у которого происходит деление ядер в цепном процессе, является уран. О его количестве на Земле можно составить представление по наличию радиоактивных веществ его семейства. Из таблицы рисунка 303 видно, что в этом семействе на седьмом месте стоит радон, продукт распада радия, газ, переходящий при распаде радия в атмосферу.

Его количество в атмосфере легко можно вычислить по его электрическим действиям.

Определив количество радона, можно вычислить, из какого количества исходного элемента — радия — оно образовалось. Это вычисление даёт, как минимальное число, 100 000 кг радия.

Подобным же приёмом можно произвести расчёт для урана. Его запас на Земле выражается приблизительно в количестве 300 млн. т.

Исследования, кроме того, показали, что способностью делиться под действием нейтронов обладают кроме урана два предпоследних элемента периодической системы: № 90-й торий, № 91-й протактиний. При делении тория ценная реакция не устанавливается. Она легко возникает при делении протактиния.

Но количество на Земле этого элемента ещё меньше, а химический способ его получения очень сложный и более дорогой, чем радия.

Русские учёные Флёров и Петржак установили, что деление урана происходит самопроизвольно, без облучения нейтронами. Но процесс самопроизвольного деления крайне медленный.



Теория в этом вопросе опережает практику и предсказывает возможность деления с освобождением внутриатомной энергии ядер других элементов, масса которых превышает атомное число 110, примерно начиная с олова.

Наше время — заря новой эпохи в жизни человечества, эпохи открытия нового неисчерпаемого источника используемой человеком энергии, который устраняет опасения за истощение существующих источников её и вселяет радужные надежды, что жизнь будущих поколений будет ещё радостней.

**Литература.** Аглинцев К. К., проф., Очерки по физике атомного ядра.

Гинзбург В. Л., Атомное ядро и его энергия.

Зайдель А. Н., Загадка атома.

Корсунский М. И., Атомное ядро, Огиз. Гос. изд. тех.-теор. лит., 1949, 308 стр., 50 рис., XXVII илл.

Бертело Андре, От атомной энергии. Перевод с французского. Гос. изд. иностр. лит., 1948, 206 стр., 33 рис., 22 фото.

---

## ОГЛАВЛЕНИЕ.

### ЭЛЕКТРИЧЕСТВО.

Введение . . . . .	3
<b>I. Электрическое поле.</b>	
1. Электризация трением . . . . .	3
2. Одновременная электризация обоих натираемых тел . . . . .	4
3. Электризация через прикосновение к заряженному телу . . . . .	5
4. Электропроводность . . . . .	—
5. Взаимодействие наэлектризованных тел. Электроскоп . . . . .	6
6. Закон Кулона для взаимодействия наэлектризованных тел . . . . .	8
7. Электростатическая единица количества электричества в системе CGS . . . . .	9
8. Электронная теория и объяснение электризации при трении . . . . .	10
9. Распределение электричества на непроводнике и изолированном проводнике . . . . .	11
10. Электрическая плотность . . . . .	12
11. Электрическое поле. Напряжённость. Силовые линии . . . . .	13
12. Потенциал . . . . .	16
13. Единицы разности потенциалов . . . . .	19
14. Поверхности равного потенциала в поле, образованном точечным зарядом . . . . .	—
15. Работа перемещения заряда между эквипотенциальными поверхностями . . . . .	20
16. Эквипотенциальные поверхности в поле любых зарядов . . . . .	—
17. Электрометр . . . . .	21
18. Поверхность нулевого потенциала . . . . .	22
19. Переход электричества с одного проводника на другой зависит от их потенциалов . . . . .	23
20. Электростатическая индукция . . . . .	24
21. Следствия из явления индукции . . . . .	28
22. Электрофор . . . . .	30
23. Электрическая машина . . . . .	31
23а. Пьезоэлектричество. Пироэлектричество . . . . .	33
24. Электроёмкость . . . . .	34
25. Единица электроёмкости . . . . .	—
26. Зависимость электроёмкости проводника от соседства других проводников . . . . .	35
27. Конденсатор . . . . .	36
28. Батарея конденсаторов . . . . .	38
29. Градуирование электрометра . . . . .	40
<b>II. Законы электрического тока.</b>	
30. Понятие об электрическом токе . . . . .	42
31. Химический способ электризации . . . . .	44
32. Химические источники тока . . . . .	46
33. Электрическая цепь и направление тока . . . . .	49
34. Сила тока . . . . .	50
35. Единица силы тока . . . . .	—
36. Постоянство силы тока во всех сечениях цепи . . . . .	—
37. Сопротивление проводника . . . . .	51
38. Закон сопротивления проводника . . . . .	52
39. Удельное сопротивление вещества . . . . .	53

49. Формула сопротивления проводника . . . . .	53
41. Сверхпроводимость . . . . .	55
42. Связь электропроводности с теплопроводностью . . . . .	—
43. Внутреннее сопротивление источника тока . . . . .	56
44. Реостаты . . . . .	—
45. Закон Ома . . . . .	59
46. Распределение напряжения по разным участкам цепи . . . . .	62
47. Последовательное соединение проводников . . . . .	66
48. Параллельное соединение проводников . . . . .	67
49. Распределение тока между параллельными проводниками . . . . .	69
50. Ламповый реостат . . . . .	70
51. Батарея . . . . .	72
52. Внутреннее сопротивление батареи . . . . .	—
53. ЭДС батареи . . . . .	73
54. Наивыгоднейшее соединение элементов в батарее . . . . .	74
55. Определение сопротивления мостиком Уитстона . . . . .	75
56. Энергия и мощность тока . . . . .	78
57. Превращение электрической энергии в тепловую . . . . .	79
58. Лабораторная работа № 1. Вывод из опыта закона теплового действия тока . . . . .	—
59. Закон Джоуля-Ленца для теплового действия тока . . . . .	81
60. Лабораторная работа № 2. Определение теплового эквивалента электрической энергии . . . . .	83
61. Тепловые ампер-вольтметры . . . . .	85
62. Термоэлектричество . . . . .	—
63. Термоэлектрический термометр . . . . .	86
64. Вольтова дуга . . . . .	87
65. Электрические печи . . . . .	90
66. Дуговые печи . . . . .	91
67. Электрическая сварка . . . . .	92
68. Электрические термометры сопротивления . . . . .	93

### III. Магнитное поле.

69. Магнитное действие тока . . . . .	95
70. Основные свойства постоянных магнитов . . . . .	96
71. Закон Кулона для взаимодействия полюсов . . . . .	98
72. Единица магнитной массы . . . . .	99
73. Магнитное поле. Напряжённость поля . . . . .	—
74. Силовые линии магнитного поля . . . . .	100
75. Магнитная индукция . . . . .	103
76. Сравнение силовых линий магнитного и электрического полей . . . . .	106
77. Земной магнетизм . . . . .	107
78. Магнитные аномалии . . . . .	108
79. Опыт Эрстеда . . . . .	110
80. Магнитное поле тока . . . . .	111
81. Электромагнит . . . . .	115
81а. Микрофон и телефон . . . . .	—
82. Действие магнитного поля на подвижной ток. Правило Флемминга . . . . .	117
83. Взаимодействие токов . . . . .	119
84. Гипотеза Ампера о происхождении магнетизма . . . . .	121
84а. Тела парамагнитные, диамагнитные и ферромагнитные . . . . .	122
85. Электрические измерительные приборы . . . . .	125

#### IV. Электрический ток через жидкости и газы.

86. Электрический ток через жидкости . . . . .	128
87. Вторичные реакции при электролизе . . . . .	131
88. Лабораторная работа № 3. Изучение законов электролиза . . . . .	133
89. Законы Фарадея для электролиза . . . . .	134
90. Числовое значение заряда электрона в кулонах . . . . .	136
91. Поляризация элементов . . . . .	139
92. неполяризующиеся элементы . . . . .	—
93. Поляризация электродов . . . . .	142
94. Аккумуляторы . . . . .	143
95. Емкость аккумулятора . . . . .	144
96. Коэффициент полезного действия аккумулятора . . . . .	145
97. Применение аккумуляторов . . . . .	—
98. Техническое применение электролиза . . . . .	147
99. Электрометаллургия . . . . .	148
99а. Коррозия металлов . . . . .	151
100. Электропроводность газа . . . . .	—
101. Зависимость между силой тока в газе и разностью потенциалов . . . . .	153
102. Ионизация толчком . . . . .	155
103. Разряд в газах при атмосферном движении . . . . .	156
104. Молнии . . . . .	158
105. Разряд в разреженных газах . . . . .	—
106. Катодные лучи . . . . .	159
107. Анодные лучи . . . . .	161
108. Термоэлектрический ток . . . . .	162

#### V. Электромагнитная индукция.

109. Условие возникновения и величина ЭДС индукции . . . . .	164
109а. Индукция тока током . . . . .	169
110. Правило Флемминга для направления индукционного тока . . . . .	170
111. Лабораторная работа № 4. Вывод законов индукции токов . . . . .	—
112. Правило Ленца для электромагнитной индукции . . . . .	172
113. Индукция в сплошных телах . . . . .	175
114. Самоиндукция . . . . .	176
115. Индукционный генератор . . . . .	181
116. Лабораторная работа № 5. Наблюдение индукционных токов в витках проволоки, вращающейся в однородном магнитном поле . . . . .	—
117. Индукция тока в якоре . . . . .	182
118. Якорь . . . . .	183
119. Генераторы переменного тока . . . . .	185
120. Машина постоянного тока . . . . .	—
121. Динамомашины . . . . .	187
122. Коэффициент полезного действия динамомашин . . . . .	188
123. Многополюсные машины . . . . .	190
124. Магнето . . . . .	191
125. Электромоторы . . . . .	193
126. Электромотор постоянного тока . . . . .	—
127. Изменение направления вращения якоря мотора . . . . .	195
128. Коэффициент полезного действия электромоторов . . . . .	—

## VI. Переменный электрический ток.

129. Синусоидальное измерение ЭДС при вращении витка в однородном магнитном поле . . . . .	196
130. Передача электрической энергии на расстояние . . . . .	198
131. Трансформатор переменного тока . . . . .	199
132. Электрификация страны . . . . .	201
133. Днепровская гидростанция . . . . .	209
134. Индукционная катушка Румкорфа . . . . .	211

## VII. Электромагнитные колебания.

135. Токи высокой частоты . . . . .	213
136. Искровой разряд как источник токов высокой частоты . . . . .	214
137. Получение колебаний от батарей высокого напряжения . . . . .	—
138. Катодный осциллограф . . . . .	216
139. Колебательный контур . . . . .	217
140. Период колебаний . . . . .	219
141. Затухающие и незатухающие колебания . . . . .	221
142. Излучение . . . . .	222
143. Электромагнитные волны . . . . .	223
144. Радиостанция . . . . .	226
145. Резонанс . . . . .	227
146. Радиоприёмник . . . . .	228
147. Детектор . . . . .	231
148. Радиотелефон . . . . .	233
149. Простейший радиопередатчик . . . . .	234
150. Лабораторная работа № 5а. Сборка и настройка радиоприёмника . . . . .	236
151. Электронная лампа . . . . .	237
152. Трёхэлектродная электронная лампа (триод) . . . . .	238
153. Электронная лампа как усилитель колебаний . . . . .	—
154. Простейший одноламповый приёмник . . . . .	240
155. Электронная лампа как генератор . . . . .	241
156. Короткие волны . . . . .	242
157. Применение радиоволн . . . . .	244

## ОПТИКА.

Введение . . . . .	251
--------------------	-----

### I. Распространение света.

158. Распространение света в однородной среде . . . . .	252
159. Свтовое явление на границе двух сред . . . . .	—
160. Изображение в плоском зеркале . . . . .	254
161. Лабораторная работа № 6. Исследование законов преломления света . . . . .	255
162. Законы преломления света . . . . .	256
163. Полное внутреннее отражение . . . . .	258
164. Ход луча через пластинку с параллельными гранями . . . . .	260
165. Ход луча через призму . . . . .	261
166. Скорость света . . . . .	262
167. Источники света . . . . .	265
168. Международная свеча. Люмен . . . . .	266

169.	Освещённость . . . . .	267
170.	Единица освещённости и формула освещённости . . . . .	269
171.	Измерение силы света источника . . . . .	272
172.	Фотометр . . . . .	—
173.	Лабораторная работа № 7. Сравнение сил света двух источников . . . . .	273
174.	Управление ходом световых лучей . . . . .	274
175.	Формула сферического зеркала . . . . .	—
176.	Построение изображения в сферическом зеркале . . . . .	276
177.	Сферические стёкла . . . . .	279
178.	Формула линзы . . . . .	280
179.	Увеличение изображения . . . . .	282
180.	Изображение в линзе при различных расстояниях предмета от неё . . . . .	—
181.	Лабораторная работа № 8. Изучение на опыте свойства линз . . . . .	285
182.	Оптическая сила линз . . . . .	286
183.	Проекционный фонарь . . . . .	287
184.	Фотографический аппарат . . . . .	289
185.	Получение снимка . . . . .	290
186.	Кинематограф . . . . .	291
187.	Сферическая аберрация . . . . .	292
188.	Хроматическая аберрация . . . . .	—
189.	Глаз как оптический аппарат . . . . .	294
190.	Близорукость и дальнозоркость . . . . .	296
191.	Условия отчётливого видения. Угол зрения . . . . .	297
192.	Зрение двумя глазами . . . . .	298
193.	Суждение о величине и удалённости предметов . . . . .	300
194.	Продолжительность зрительного впечатления . . . . .	—
195.	Утомление глаза . . . . .	—
196.	Восприятие цветов . . . . .	—
197.	Чувствительность глаза к различным цветам . . . . .	301
198.	Цветовое утомление . . . . .	—
199.	Иррадиация . . . . .	—
200.	Назначение оптических приборов . . . . .	—
201.	Микроскоп . . . . .	302
202.	Телескоп . . . . .	303

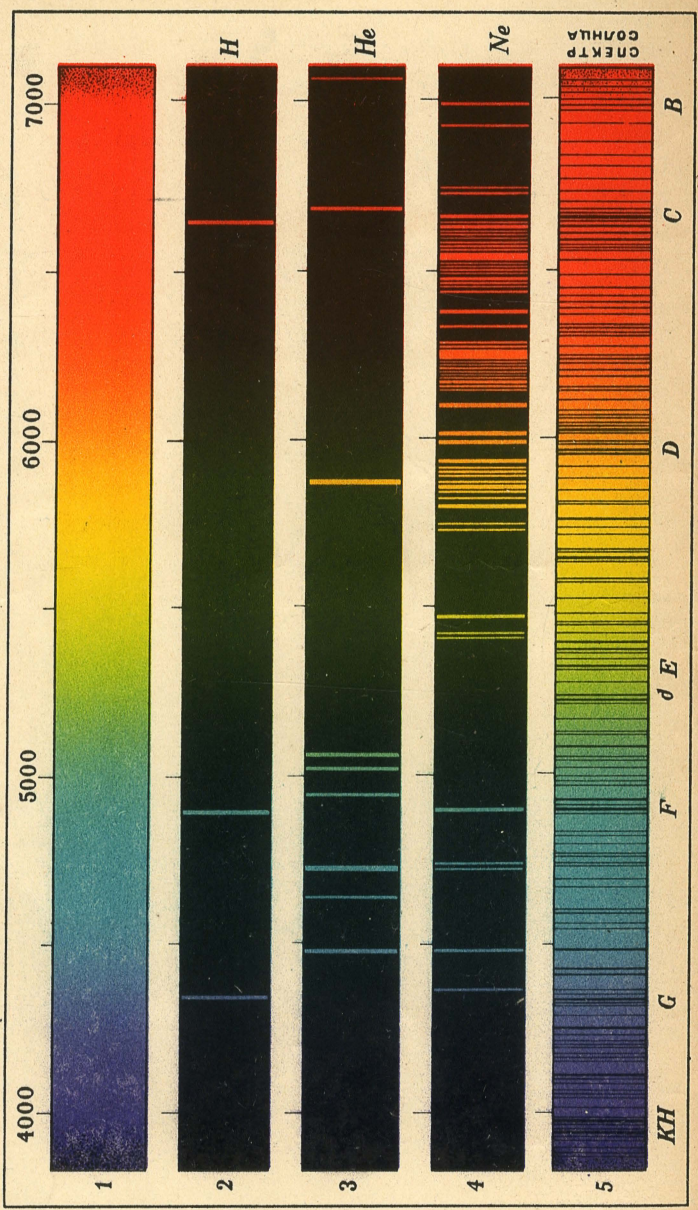
## II. Природа света.

203.	Интерференция света . . . . .	309
204.	Световая волна. Луч . . . . .	310
205.	Объяснение интерференции света . . . . .	311
206.	Поляризация света . . . . .	313
207.	Поляризация света при преломлении . . . . .	314
208.	Принцип Гюйгенса . . . . .	315
209.	Объяснение отражения и преломления света волновой теорией . . . . .	316
210.	Объяснение прямолинейного распространения света по волновой теории . . . . .	318
211.	Дифракция света . . . . .	319
212.	Измерение длины световой волны при помощи дифракции . . . . .	321
213.	Дисперсия белого света на границе двух сред . . . . .	323
214.	Каждый спектральный луч — простой . . . . .	324
215.	Синтез белого света . . . . .	325

216.	Дополнительные цвета . . . . .	325
217.	Составление спектральных цветов . . . . .	326
218.	Невидимые лучи, испускаемые раскалёнными телами . . . . .	327
219.	Типы спектров испускания . . . . .	328
220.	Зависимость излучения от температуры . . . . .	331
221.	Изменение излучения с температурой . . . . .	3:3
222.	Распространение в средах невидимых излучений . . . . .	334
223.	Прозрачность тел . . . . .	—
224.	Смешение красок . . . . .	337
225.	Спектр поглощения лучей раскалёнными парами . . . . .	—
226.	Закон Кирхгофа для поглощения и испускания . . . . .	338
227.	Спектральный анализ . . . . .	339
228.	Спектр Солнца и других светил . . . . .	341
229.	Рентгеновские лучи . . . . .	342
230.	Устройство рентгеновой трубки . . . . .	343
231.	Превращение лучистой энергии в другие формы . . . . .	346
232.	Понятие о световом кванте . . . . .	352
233.	Обзор теорий света . . . . .	354
234.	Обзор электромагнитных колебаний . . . . .	357

### СТРОЕНИЕ АТОМА.

235.	Обнаружение сложного строения атома . . . . .	359
236.	Спинтарископ. Камера Вильсона . . . . .	361
237.	Открытие ядра атома . . . . .	364
238.	Строение линейчатых спектров . . . . .	366
239.	Электронная оболочка атома водорода . . . . .	367
240.	Электронная оболочка атомов любых элементов . . . . .	368
241.	Энергетические уровни атома . . . . .	369
242.	Радиоактивность . . . . .	371
243.	Состав радиоактивного излучения . . . . .	372
244.	Свойства альфа-лучей . . . . .	373
245.	Свойства бета-лучей . . . . .	374
246.	Свойства гамма-лучей . . . . .	375
247.	Период полураспада радиоактивных элементов . . . . .	—
248.	Превращения радиоактивных элементов . . . . .	376
249.	Строение атомного ядра . . . . .	377
250.	Искусственная радиоактивность . . . . .	381
251.	Применение искусственно-радиоактивных веществ . . . . .	382
252.	Энергия атомного ядра . . . . .	383
253.	Освобождение атомной энергии . . . . .	—
254.	Деление ядра урана . . . . .	385
255.	Цепная реакция при делении урана . . . . .	—
256.	Причины, препятствующие цепной реакции . . . . .	386
257.	Получение новых элементов . . . . .	387
258.	Ядерный взрыв . . . . .	388
259.	Урановый котёл . . . . .	390
260.	Практическое использование атомной энергии . . . . .	391
261.	Природные запасы элементов, подвергающихся делению . . . . .	392





Редактор *Г. В. Басов*  
Техн. редактор *Н. Н. Махова*

---

Подписано к печати 13/1 1953 г. А-00719.  
Тираж 700 тыс. экз. Бумага  $84 \times 108/_{32}$ .  
Бумажных листов 6,25 + вкл. 0,031. Печатных  
листов 20,5 + 0,1 вклейка. Учётно-издат. л.  
26,36 + 0,05 вкл. Заказ 4008. Цена без пере-  
плёта 3 руб. 45 к. Переплёт 75 коп.

---

4-я типография им. Евг. Соколовой Главполиграфиздата  
при Совете Министров СССР.  
Ленинград, Измайловский пр., 29.

Цена 3 р. 45 к.