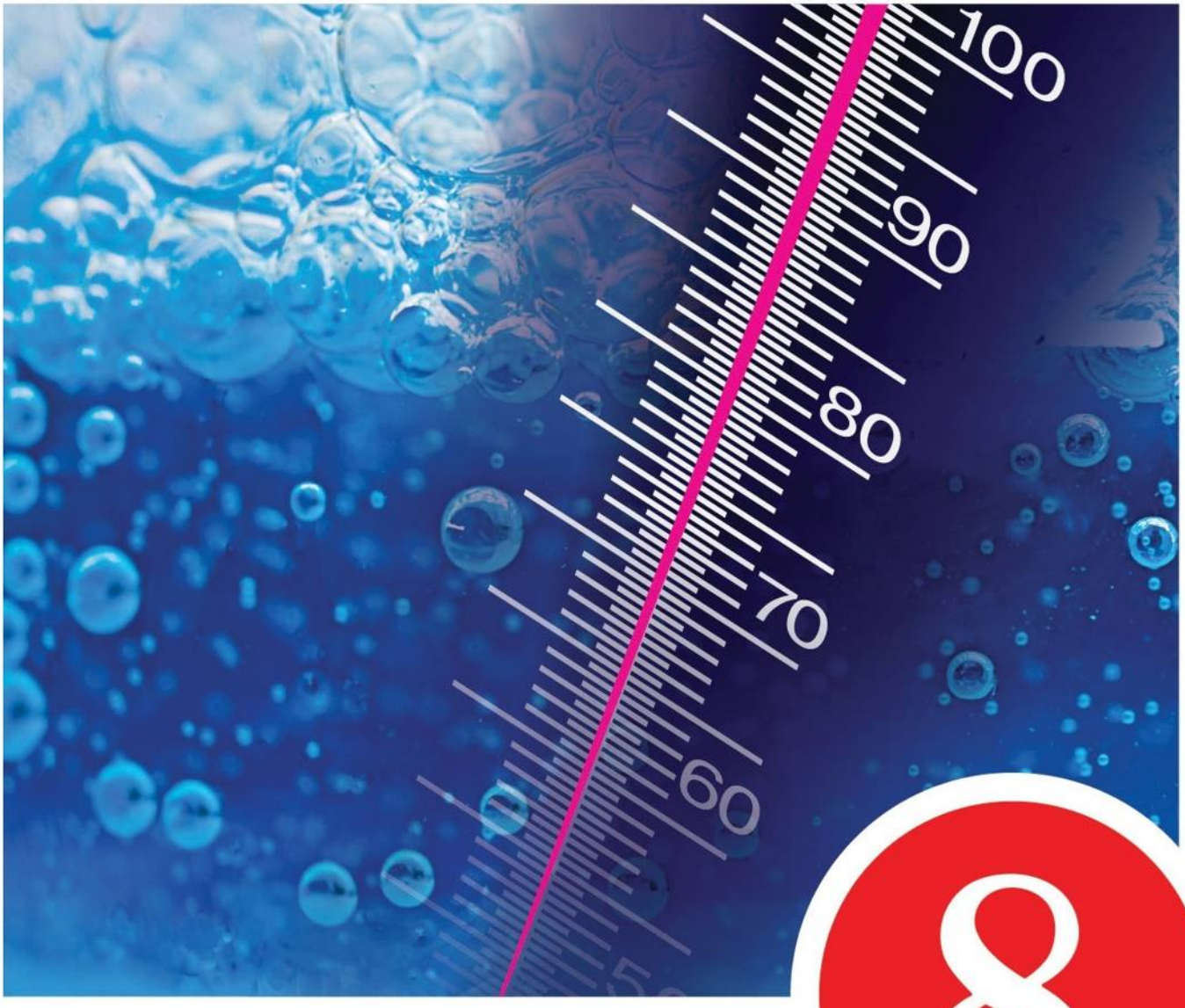
И. М. Перышкин, А. И. Иванов

ФИЗИКА



8

БАЗОВЫЙ
УРОВЕНЬ

И. М. Перышкин, А. И. Иванов

ФИЗИКА

8 класс

БАЗОВЫЙ УРОВЕНЬ

УЧЕБНИК

Допущено
Министерством просвещения
Российской Федерации

3-е издание, переработанное

Москва
«Просвещение»
2023



Глава 1 ТЕПЛОВЫЕ ЯВЛЕНИЯ

§ 1 ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ МОЛЕКУЛЯРНО-КИНЕТИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ СТРОЕНИЯ ВЕЩЕСТВА

Представление о том, что все тела состоят из мельчайших частиц, зародилось две с половиной тысячи лет назад. Однако лишь во второй половине XIX в. получило развитие и впоследствии было опытным путём доказано современное учение о молекулярном строении вещества. Это учение, называемое *молекулярно-кинетической теорией* (МКТ), позволило объяснить свойства различных веществ и целый класс физических явлений. В основе молекулярно-кинетической теории лежат три известных вам положения.

1. Все вещества состоят из частиц (молекул, атомов), между которыми существуют промежутки.

2. Все частицы вещества находятся в непрерывном хаотическом (беспорядочном) движении.

3. Частицы вещества взаимодействуют друг с другом силами притяжения и отталкивания.

Вспомним опытные факты, подтверждающие основные положения МКТ.

Молекулы очень малы. Они не видны не только невооружённым глазом, но и в оптический микроскоп. Поэтому долгое время существование мельчайших частиц вещества учёные могли подтвердить только косвенно. Так, например, в пользу первого положения МКТ

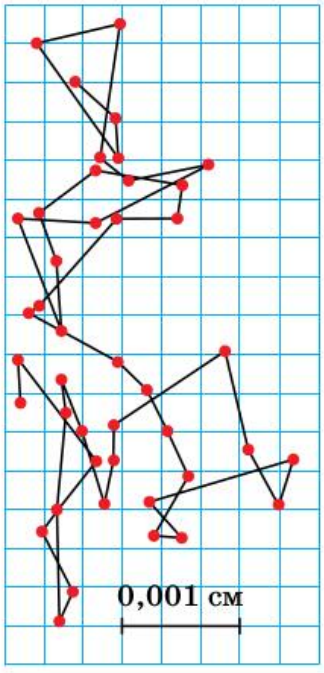


Рис. 1. Положения броуновской частицы, отмеченные через каждые 30 с

свидетельствует явление теплового расширения тел.

Экспериментальными подтверждениями движения молекул (второго положения МКТ) являются диффузия и броуновское движение. Действительно, самопроизвольное проникновение веществ друг в друга (диффузия) существует благодаря непрерывному хаотическому движению молекул этих веществ. А движение броуновской частицы (рис. 1) объясняется ударами хаотически движущихся молекул жидкости или газа, в которых она находится.

Диффузия также подтверждает и то, что между молекулами существуют промежутки (первое положение МКТ), поскольку именно их наличие позволяет частицам одного вещества продвигаться вглубь другого.

О справедливости третьего положения МКТ свидетельствуют упругие свойства тел: восстановление формы и размера тела после прекращения внешнего воздействия на него. Возникновение сил упругости при деформации тел объясняется силами межмолекулярного взаимодействия. Между молекулами действуют силы притяжения и отталкивания. При сближении молекул, в частности во время сжатия твёрдого тела, начинают преобладать силы отталкивания. При увеличении расстояний между молекулами (при растяжении тела) — силы притяжения.

Напомним, что молекулы состоят из атомов. Молекулы различных веществ состоят из разного числа различных атомов. Учёные-химики, наблюдая превращения веществ, сумели выяснить, что различные атомы обладают разными массами. Ко второй половине XIX в. они научились узнавать, во сколько раз различаются массы атомов. Однако массу атома им определить не удавалось.



ЖАН БАТИСТ ПЕРРЕН

1870—1942

Французский учёный, лауреат Нобелевской премии по физике. Известен трудами в области строения вещества

Ситуация изменилась в начале XX в., когда французский физик ***Жан Перрен*** смог вычислить массу самого лёгкого атома — водорода. Она оказалась равна $1{,}6 \cdot 10^{-27}$ кг. Так как к этому времени уже были известны относительные массы других атомов, открытие Перрена позволило вычислить массы известных атомов, а значит, и массы молекул. Так как массы атомов и молекул ничтожно малы по сравнению с массами окружающих нас тел, то становится понятным, что даже небольшая пылинка состоит из огромного количества молекул.

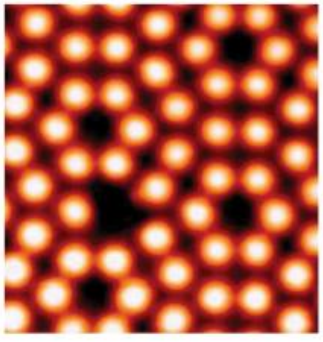


Рис. 2. Изображение атомов кремния, полученное на туннельном микроскопе (увеличение 15 миллионов)[1]

В настоящее время существование молекул и атомов не вызывает сомнений. Современные приборы позволяют получать изображения отдельных атомов (рис. 2) и измерять их размеры. Размеры атомов очень малы — порядка 10^{-10} м.

Простые молекулы имеют размеры, сравнимые с размерами атомов. Сложные молекулы, состоящие из большого количества атомов, могут быть существенно бóльших размеров (например, молекула ДНК человека).

1. Сформулируйте основные положения МКТ. **2.** Какие наблюдения и опыты подтверждают первое положение МКТ? **3.** Приведите экспериментальные доказательства второго положения МКТ. **4.** Какие наблюдения и опыты подтверждают третье положение МКТ? **5.** Что вы можете сказать о размере и массе атомов и молекул?

1. При образовании воды отношение масс прореагировавших газов водорода и кислорода всегда равно 1 : 8. Свидетельствует ли этот факт в пользу существования атомов и молекул? Аргументируйте свою точку зрения.

2. Определите, сколько молекул воды содержится в капле объёмом 50 мм^3. Масса атома кислорода в 16 раз больше массы атома водорода.

[1] Изображение предоставлено Б. А. Логиновым (ПРОТОН—МИЭТ, Зеленоград).

§ 2 АГРЕГАТНЫЕ СОСТОЯНИЯ ВЕЩЕСТВА

Как вы знаете, одно и то же вещество в зависимости от внешних условий может находиться в одном из *агрегатных состояний*: жидком, твёрдом или газообразном.

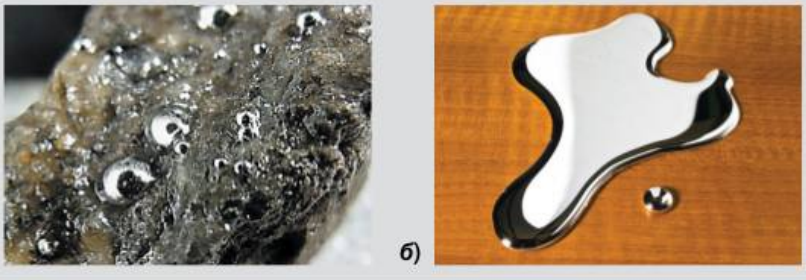
Как определить, что находится в стакане: вода или прозрачный лёд? Для этого необходимо использовать информацию о свойствах вещества в различных агрегатных состояниях.

Вы же помните, что жидкости сохраняют объём, но не форму — они текучи и приобретают форму того сосуда, в который их переливают. Особенностью твёрдых тел является наличие собственного объёма и формы. Газы не обладают ни собственной формой, ни собственным объёмом. Они занимают весь предоставленный им объём, принимая форму сосуда. Газы легко сжать.

Во всех трёх агрегатных состояниях вещество, например вода, образовано одинаковыми молекулами — молекулами воды. Почему же одно и то же вещество может быть и жидкостью, и твёрдым телом, и газом?

Как вам известно, молекулы вещества взаимодействуют друг с другом, а также совершают непрерывное хаотическое движение. Можно предположить, что существование различных агрегатных состояний связано с особенностями взаимодействия и движения молекул вещества.

Представим, что молекулы только беспорядочно движутся и при этом не взаимодействуют. Тогда они разлетались бы по всем на-



а) б)

Агрегатные состояния ртути: *а* — твёрдое; *б* — жидкое

правлениям, и вещество занимало бы весь предоставленный объём. Значит, единственно возможным состоянием вещества было бы газообразное состояние.

А к чему приводит наличие взаимодействия между молекулами? Вы знаете, что молекулы взаимодействуют друг с другом силами притяжения и отталкивания, причём проявляется это взаимодействие на малых расстояниях. Так, если молекулы находятся на расстояниях, превышающих их размеры в несколько раз, то силы взаимодействия между ними уже почти не сказываются. Продемонстрируем взаимодействие молекул на следующей модели.

Возьмём две тележки с прикреплёнными к ним пружинами. Установим на каждой по магниту так, чтобы они могли притягиваться. Взаимодействие магнитов будет имитировать притяжение молекул, а взаимодействие пружин — отталкивание. Чем ближе тележки друг к другу, тем сильнее притяжение магнитов (рис. 3, *а*). В какой-то момент пружины соприкоснутся, начнут сжиматься — возникнет сила упругости, стремящаяся вернуть их в исходное состояние. Таким образом, когда пружины коснутся друг друга, помимо притяжения появится отталкивание, которое также будет возрастать с уменьшением расстояния между тележками. В некотором положении (положение равновесия) силы отталкивания будут равны силам притяжения (рис. 3, *б*), а при ещё боль-

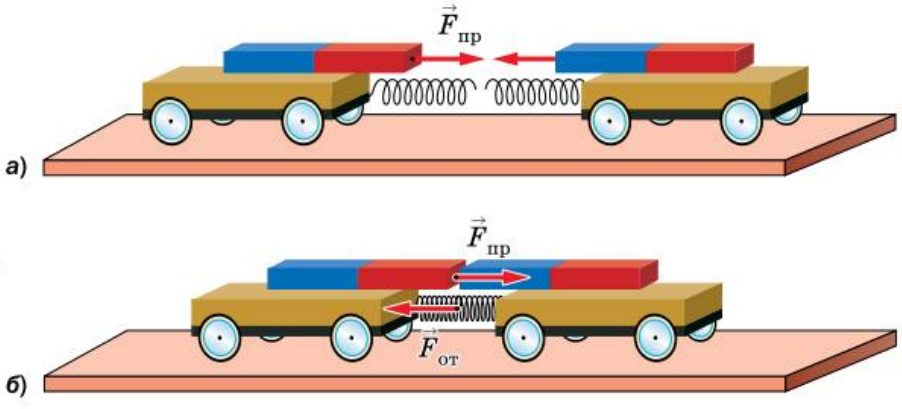


Рис. 3. Взаимодействие тележек с магнитами как модель взаимодействия молекул

шем сближении тележек начнут превышать силы притяжения. Обратим внимание, что наша наглядная модель демонстрирует только качественную картину взаимодействия молекул.

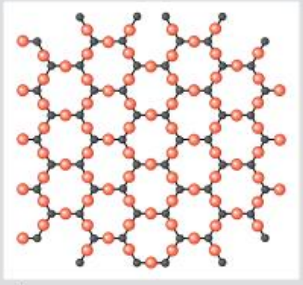
Итак, существует некоторое равновесное расстояние между молекулами данного вещества, на котором силы отталкивания равны силам притяжения. Если расстояние между молекулами больше равновесного, то преобладают силы притяжения, если меньше — силы отталкивания.

Представим, что хаотическое движение молекул отсутствует. Тогда все молекулы располагались бы в положениях равновесия и единственно возможным состоянием вещества было бы твёрдое состояние. Но молекулы взаимодействуют и движутся одновременно. Силы притяжения стремятся сблизить их, а хаотическое движение препятствует этому. Быть ли телу газообразным, жидким или твёрдым, зависит от соотношения этих факторов. В газах молекулы быстро движутся и почти не взаимодействуют, в твёрдых телах, наоборот, взаимодействие молекул велико, а движутся они медленно. Промежуточный случай соответствует жидкости.

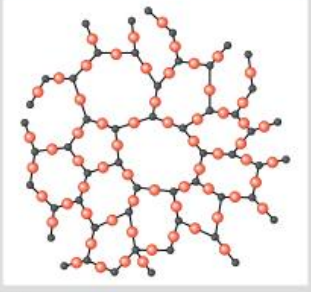
Опишем агрегатные состояния с молекулярной точки зрения более подробно и дадим объяснение их свойствам.

В газах среднее расстояние между молекулами значительно больше их размеров. На таких расстояниях силы взаимодействия молекул почти отсутствуют. Поэтому вещество в газообразном состоянии не сохраняет ни форму, ни объём. Бóльшую часть времени каждая молекула движется прямолинейно, затем меняет направление движения в результате столкновения с другой молекулой.

В отличие от газов в жидкостях молекулы находятся близко друг к другу. Взаимодействие между молекулами достаточно велико для того, чтобы объём жидкости оставался постоянным, но не достаточно велико для сохране-



а)



б)

Структура кварца:
а — кристаллическое состояние;
б — аморфное состояние

ния жидкостью формы. Положения молекул жидкости относительно друг друга не фиксированы. Совершив несколько десятков—сотен колебаний около некоторого положения равновесия, молекула скачком меняет его на новое и колеблется рядом с новыми соседями.

В твёрдых телах молекулы находятся друг от друга на расстояниях, близких к размерам молекул, и колеблются около положений равновесия. В случае попытки увеличить или уменьшить расстояние между молекулами возникают значительные силы их притяжения или отталкивания. Этим объясняется, что твёрдые тела сохраняют форму и объём.

Молекулы и атомы большинства веществ в твёрдом состоянии расположены в строго определённом порядке, образующем повторяющуюся структуру — *кристаллическую решётку*. Такое состояние вещества называют ***кристаллическим***. Места нахождения атомов называют *узлами кристаллической решётки*. Бывают решётки, «составленные» из кубиков, параллелепипедов и т. п. Кристаллическое строение имеют поваренная соль, лёд, алмаз, железо и т. д.

Существует твёрдое состояние вещества, для которого характерно отсутствие кристаллической решётки и в целом беспорядочное расположение молекул (атомов). Это ***аморфное*** состояние. У вещества в аморфном состоянии порядок во взаимном расположении атомов наблюдается только в небольшой области вблизи каждого атома и с увеличением расстояния исчезает. В природе в аморфном состоянии могут находиться опал, янтарь, смолы и т. д. Вещества в аморфном состоянии, как и жидкости, текучи, только текут они очень медленно.

1. Опишите, как меняется взаимодействие между молекулами вещества с изменением расстояния между ними. **2.** Охарактеризуйте движение частиц вещества в различных агрегатных состояниях. **3.** Объясните свойства веществ в различных агрегатных состояниях на основе МКТ.

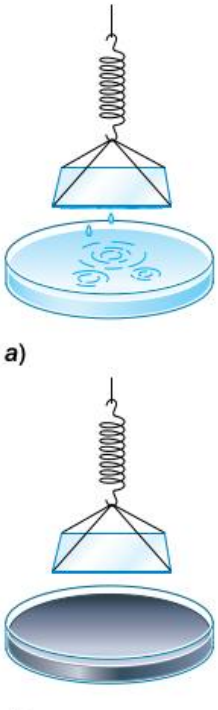
ЗАДАНИЕ 1

- Налейте в пластиковую бутылку немного холодной воды и поместите её в морозильную камеру на несколько часов, чтобы образовался лёд. Затем, вынув бутылку со льдом, добавьте в неё воды. Внутри будет находиться вода одновременно в трёх состояниях. Какие это состояния? Какие изменения происходят при медленном нагревании сосуда воздухом помещения?

§ 3 СМАЧИВАНИЕ И НЕСМАЧИВАНИЕ. КАПИЛЛЯРНЫЕ ЯВЛЕНИЯ

В предыдущем параграфе, говоря об агрегатных состояниях, мы рассматривали взаимодействие молекул одного и того же вещества. Однако взаимодействуют и молекулы разных веществ.

Так, если на поверхность воды положить стеклянную пластину и тянуть за прикреплённую к ней пружину, то оторванная от воды пластина будет покрыта водой (рис. 4, *а*). Это означает, что разрыв происходит между слоями воды, а не между водой и стеклом. Получается, что *притяжение между молекулами воды меньше, чем притяжение между молекулами воды и молекулами стекла*.



а)

б)

Рис. 4. Стекло смачивается водой (*а*), но не смачивается ртутью (*б*)

Если бы вместо воды мы взяли ртуть, то стекло осталось бы чистым (рис. 4, *б*). Это показывает, что *притяжение между молекулами ртути больше, чем притяжение между молекулами ртути и стекла*. Говорят, что вода *смачивает* стекло, а ртуть его *не смачивает*. Ртуть ведёт себя таким образом по отношению почти ко всем твёрдым телам: не смачивает кожу, дерево, пластмассы и др. Тогда как вода смачивает и эти вещества, и многие другие.

Некоторые вещества вода может и не смачивать. Из собственного опыта вам известно, что она не смачивает жирные поверхности. Перья водоплавающих птиц смазаны тонкой плёнкой жира, поэтому птицы выходят из воды сухими.





Явление несмачивания перьев водоплавающих птиц

Нефть смачивает перья птиц, и слой пуха, находящийся под ними, намокает. Птицы теряют способность летать, а мокрые перья не могут их согреть. Вот почему для водоплавающих птиц опасны аварии танкеров, перевозящих нефть.

Вода не смачивает поверхности, покрытые воском. Например, воскообразный налёт на листьях некоторых растений не даёт воде заливать так называемые устьица (крошечные отверстия в листьях), в противном случае нарушилось бы дыхание растений.

Итак, *если притяжение между молекулами поверхности твёрдого тела и молекулами жидкости, находящейся на этой поверхности, больше, чем притяжение молекул жидкости между собой, то жидкость смачивает поверхность*. Это выражается в растекании жидкости по поверхности твёрдого тела. Такое явление называют ***смачиванием***.

Благодаря смачиванию вы можете вытереть руки полотенцем, написать ручкой решение задачи в тетради, постирать одежду и т. д. В технологии красильного производства тоже используют способность жидкостей смачивать ткани.

Если притяжение между молекулами поверхности твёрдого тела и молекулами жидкости, находящейся на этой поверхности, меньше, чем притяжение молекул жидкости между собой, то жидкость не смачивает поверхность. В этом случае жидкость имеет форму немного сплюснутой капли. Вы не раз это могли наблюдать на траве рано утром.

Форма поверхности жидкости вблизи стенок сосуда, в который она налита, зависит от того, смачивает ли жидкость стенки сосуда или нет. Если жидкость смачивает стенки сосуда, то её поверхность у стенок имеет вогнутую форму (рис. 5, *а*). Это объясняется тем, что в данном случае силы взаимодействия между молекулами жидкости и молекулами стенки больше, чем между молекулами самой жидкости. Жидкость притягивается к стенке, пытаясь растечься по ней. Если же жидкость не смачивает

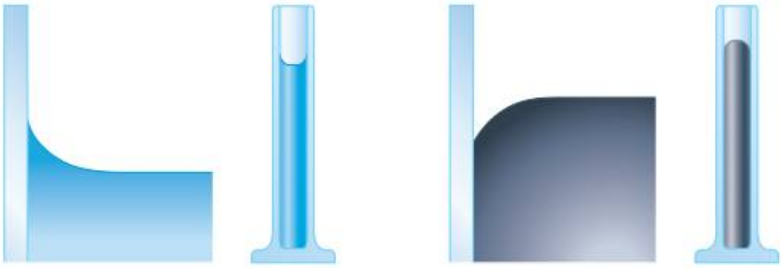


Рис. 5. Искривление поверхности жидкости вблизи стенок сосуда: *а* — смачивание; *б* — несмачивание

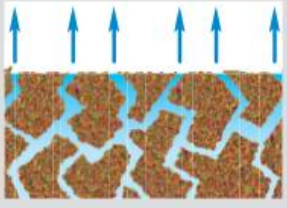
стенки сосуда, то её поверхность вблизи стенок имеет выпуклую форму (рис. 5, *б*).

В случае, когда сосуд представляет собой узкую трубку, искривлённой оказывается вся свободная поверхность жидкости. Такую узкую трубку называют ***капилляром***.

Искривление поверхности жидкости в капилляре сказывается на поведении всего объёма жидкости. В узких трубках смачивающие жидкости поднимаются выше того уровня, который они занимают в широких трубках (рис. 6, *а*). Несмачивающие жидкости, наоборот, в узких трубках расположены на более низком уровне, чем в широких (рис. 6, *б*). Явления подъёма или опускания жидкости в узких трубках называют ***капиллярными явлениями***.

Высота подъёма жидкости в капилляре зависит от рода жидкости и радиуса капилляра.

Капиллярные явления играют очень важную роль в нашей жизни. Благодаря движению жидкости по капиллярам растения получают питание и воду из почвы. Это следует учитывать при обработке почвы. Например, для умень-



Находящаяся в почве вода поднимается по капиллярам и интенсивно испаряется

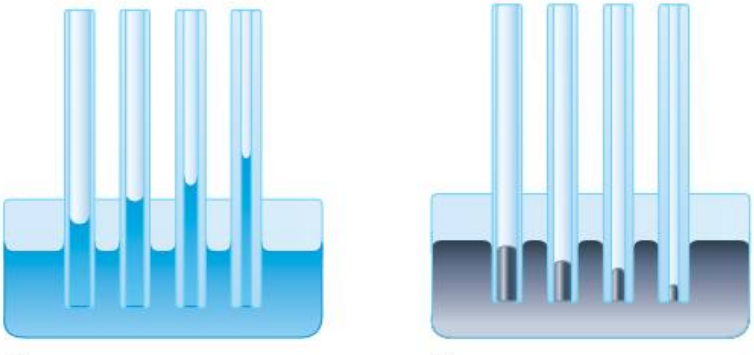


Рис. 6. Подъём воды (*а*) и опускание ртути (*б*) в капиллярах

шения испарения влаги почву необходимо разрыхлять для разрушения капилляров. Материалы, имеющие пористое строение, такие как бумага, дерево, ткани, строительные материалы, могут впитывать влагу. Поэтому для защиты их от влаги используют гидроизоляционные материалы и грунтовки.

1. Что называют смачиванием? **2.** Приведите примеры смачивания и несмачивания водой различных поверхностей. Объясните явления на основе МКТ. **3.** Какие явления называют капиллярными? **4.** От чего зависит высота подъёма жидкости в капилляре?

1. Что нужно сделать, чтобы можно было носить воду в решете?

2. Для того чтобы обувь дольше носилась, рекомендуют обрабатывать её различными специальными кремами и спреями. Объясните, что при этом происходит.

УПРАЖНЕНИЕ 1

1. Перед покраской поверхность металла тщательно обезжиривают. Для чего это делают?
2. Если ткань пропитана маслом, то она перестаёт пропускать воду. С чем это связано?
3. Объясните смысл поговорки «Как с гуся вода». Какое физическое явление лежит в её основе?
4. На сыром грунте следы от шагов намокают. Почему это происходит?

ЗАДАНИЕ 2

1. Возьмите две небольшие прямоугольные стеклянные пластины. Вымойте их и хорошо вытрите. Плотно прижмите пластины друг к другу. Разъедините их.
Теперь проделайте опыт с влажными пластинами. В каком случае разъединить пластины было легче? Почему?

2. Возьмите полоску плотной бумаги шириной 2—3 см. Сделайте на ней подсолнечным маслом простой рисунок, например квадрат, круг, треугольник. Опустите бумагу с рисунком в воду, окрашенную гуашью или акварельной краской.
Выньте бумагу с рисунком из раствора, встряхните её и посмотрите на получившийся рисунок. Можно ли наблюдаемое явление использовать? Для чего?

3. Небольшой участок тыльной стороны кисти руки смажьте вазелином или жирным кремом. С помощью пипетки капните на руку по одной капле воды на смазанную поверхность и на несмазанную. Рассмотрите форму капель и сделайте вывод.

§ 4 ТЕМПЕРАТУРА

В повседневной жизни *температура* для нас — это величина, характеризующая, *насколько нагреты* те или иные тела. Каждый из вас может отличить тёплое от холодного, горячее от тёплого. Явления, важной характеристикой которых является температура, называют ***тепловыми***. К таким явлениям относятся, например, нагревание и охлаждение воды, образование льда, плавление парафина.



а)



б)

Примеры тепловых явлений:
а — таяние льда;
б — замерзание воды

Проведём опыт. Опустим одну руку в сосуд с горячей водой, а другую в сосуд с холодной водой и подержим их там в течение некоторого времени. Затем перенесём обе руки в сосуд с тёплой водой. Каковы будут наши ощущения? Одна рука почувствует холод, другая — тепло. Однако через некоторое время обе руки начнут испытывать одинаковые ощущения, соответствующие температуре воды в третьем сосуде.

Перед погружением в третий сосуд руки имели разные температуры, отличающиеся от температуры воды в сосуде. Однако по прошествии времени температуры всех тел стали одинаковыми.

Рассмотренный опыт иллюстрирует важную особенность температуры: *если несколько тел различной температуры привести в соприкосновение друг с другом, то через некоторое время температура всех тел станет одинаковой*. В таком случае говорят, что в системе тел установилось *тепловое равновесие*. На достижении теплового равновесия основана процедура измерения температуры.



Плавление парафина

Температуру измеряют с помощью термометра. Вспомните, как вы измеряете температуру собственного тела медицинским термометром (в быту его называют градусником) — зажимаете его под мышкой. Вначале термометр холодит тело, затем ощущение холода исчезает. Через 10 мин вы вынимаете термометр и смотрите, какую температуру он показывает.



Максимальный термометр

Температуру чего показывает термометр? Ответ вам кажется очевидным: температуру вашего тела. Но не торопитесь. Он показывает собственную температуру. Мы помещаем термометр под мышку для того, чтобы привести его в плотное соприкосновение с телом, тогда температура термометра через небольшой промежуток времени станет равной температуре нашего тела. Между телом и термометром устанавливается тепловое равновесие.

Термометр содержит рабочее вещество, свойства которого изменяются при изменении температуры. Так, принцип действия жидкостного термометра основан на расширении жидкостей при нагревании. Приходя в тепловое равновесие с телом, температура которого измеряется, жидкость изменяет свой объём. О температуре тела судят по длине столбика жидкости.

Как только вы достали из-под руки термометр, его температура должна понизиться, приближаясь к температуре окружающего воздуха. Но показания термометра не меняются, потому что в его капилляре сделано специальное сужение, которое разрывает столб ртути, не давая ей опускаться. Таким образом, медицинский термометр фиксирует максимальную температуру, поэтому его называют максимальным. Другие термометры, не имеющие такого сужения, до снятия показаний нельзя вынимать из среды, температуру которой они измеряют.

Чтобы по длине столбика жидкости можно было определять температуру, термометр должен иметь шкалу. Одной из наиболее распространённых в практике температурных шкал является *шкала Цельсия*, названная в честь шведского учёного ***Андерса Цельсия*** (1701—1744), предложившего её в 1742 г. Шкала Цельсия основана на двух фиксированных значениях температуры — таяния льда и кипения воды при нормальном атмосферном давлении. Температура по шкале Цельсия обозначается буквой t и измеряется в *градусах Цельсия* (°C).

Чтобы получить шкалу термометра, опустим его в тающий лёд и, дождавшись, когда столбик жидкости прекратит движение, обозначим его положение отметкой 0 °С. Затем погрузим термометр в кипящую воду и сделаем отметку 100 °С. Разделив промежуток между этими двумя отметками на 100 одинаковых частей, получим термометр, проградуированный по шкале Цельсия. Перемещение столбика жидкости на одно деление соответствует изменению температуры на 1 °С.

Прообраз термометра (термоскоп) был изобретён уже к началу XVII в. К середине XVIII в. термоскопы стали термометрами — они были снабжены шкалами, и учёные получили возможность определять числовое значение температуры. Но что же характеризует температура? Правильный ответ на этот вопрос появился только в середине XIX в.

Как вы знаете, с ростом температуры жидкости броуновские частицы начинают двигаться быстрее. Значит, при повышении температуры быстрее движутся молекулы жидкости, толкающие броуновские частицы. Именно поэтому беспорядочное движение молекул называют ***тепловым***.

Отличие механического движения от теплового заключается в том, что механическое движение совершает отдельная частица и для любого момента времени можно определить её положение и скорость. В тепловом же движении участвует огромное число молекул, и зафиксировать информацию о положении и скорости каждой из них просто невозможно. Изучая тепловое движение, вводят характеристики, относящиеся не к отдельным частицам, а к совокупностям большого числа частиц.

В процессе установления теплового равновесия горячие тела остывают, холодные нагреваются и в результате их температуры выравниваются. А что это означает с молекулярной точки зрения? Молекулы тел при столкновениях обмениваются между собой энергией. За счёт бесчисленных столкновений средние кинетиче-

ские энергии молекул соприкасающихся тел выравниваются. Итак, когда тела приходят в тепловое равновесие и принимают одинаковую температуру, средние кинетические энергии их молекул становятся одинаковыми.

Таким образом, *температура характеризует среднюю кинетическую энергию теплового движения молекул*.

Подчеркнём, что температура характеризует тело в целом, среднюю кинетическую энергию огромного числа молекул[1], а не отдельную молекулу. Молекулы тела совершают беспорядочное движение, их скорости и кинетические энергии изменяются. Средняя же кинетическая энергия молекул при данной температуре остаётся неизменной.

Увеличение средней кинетической энергии молекул воспринимается нами как повышение температуры тела, а уменьшение — как её понижение. Если бы молекулы перестали двигаться, то кинетическая энергия каждой молекулы, а значит, и средняя кинетическая энергия были бы равны нулю. Температуру, при которой в теле прекратилось бы тепловое движение, называют *абсолютным нулём*. Меньшей температуры в природе не существует. По шкале Цельсия абсолютный нуль равен –273,15 °С.



Рис. 7. Соответствие температур по разным шкалам

Абсолютный нуль служит началом отсчёта температурной шкалы Кельвина (рис. 7), названной по имени британского физика ***Томсона Уильяма Кельвина*** (1824—1907). Эту шкалу используют в научных исследованиях. Температура по шкале Кельвина обозначается буквой T. Единицей температуры по этой шкале является *кельвин* (**К**). Для разности температур один кельвин равен одному градусу Цельсия: 1 К = 1 °С. Поскольку по шкале

[1] Эта величина получится, если сумму кинетических энергий молекул разделить на их общее число.

Цельсия абсолютному нулю соответствует температура −273,15 °С (при вычислениях округляют до −273 °С), то связь температур по шкале Кельвина и по шкале Цельсия выражается соотношением:

$$T = t + 273.$$

1. Приведите примеры тепловых явлений. **2.** Что такое тепловое равновесие? **3.** Почему обычный термометр, в отличие от максимального, нельзя вынимать из среды, температуру которой измеряют? **4.** Чем отличается тепловое движение от механического? **5.** Что характеризует температура? Каковы её единицы? **6.** Как связана температура тела со скоростью теплового движения его молекул? Какие явления это доказывают? **7.** Что такое абсолютный нуль температуры? **8.** Каким соотношением выражается связь температур по шкале Кельвина и шкале Цельсия?

УПРАЖНЕНИЕ 2

1. Температура тела изменилась от 25 до 27 °С. На сколько градусов оно нагрелось: а) по шкале Цельсия; б) по шкале Кельвина?
2. Переведите значения температуры: а) в градусы Цельсия: 300 К, 220 К, 273 К, 673 К; б) в кельвины: 127 °С, −27 °С, 36,6 °С.
3. Расположите значения температуры в каждом случае в порядке возрастания: а) 273 К, 10 °С; б) 27 °С, 290 К; в) 0 °С, 0 К.

ЗАДАНИЕ 3

1. Измерьте температуру воздуха в тени на улице. Внесите термометр в комнату. Как меняется его показание? В какой момент вы можете сказать, чему равна температура воздуха в комнате?

   Постройте график зависимости показаний термометра t от времени τ. Интервал времени возьмите равным 30 с.
2. Найдите информацию о температурной шкале Фаренгейта. Представьте её одноклассникам в виде презентации.
3. Перед вами стоит задача выяснить, как зависит давление газа от его объёма и температуры. Придумайте, как это можно сделать, используя воздушный шарик и резиновый мячик.

Это любопытно...

Особенность расширения воды

Как правило, твёрдые тела, жидкости и газы при нагревании расширяются, а при охлаждении сжимаются.

Вода обладает особым свойством, отличающим её от большинства веществ, — при нагревании от 0 до 4 °С её объём не увеличивается, а умень-

шается. Только начиная с 4 °С объём воды начинает при нагревании возрастать. Это означает, что при температуре 4 °С плотность воды максимальна.

Отмеченное особое свойство воды приводит к тому, что в глубоких водоёмах даже при очень низкой температуре воздуха вода имеет температуру около 4 °С. При охлаждении воды плотность её верхних слоёв увеличивается, и они опускаются вниз. После достижения воздухом температуры 4 °С дальнейшее охлаждение уменьшает плотность воды, в результате чего холодные слои остаются на поверхности.



Из параграфа вы узнали, что на расширении жидкостей при нагревании основан принцип действия жидкостного термометра. Жидкостью, залитой в термометр, обычно является спирт или ртуть. А что будет, если использовать воду?

Причина теплового расширения твёрдых тел

Тепловое расширение твёрдых тел было продемонстрировано в 7 классе на опыте с металлическим шаром и кольцом. В ненагретом состоянии шар легко проходил сквозь кольцо, а после нагревания застревал в нём. Можете ли вы объяснить это на основе молекулярно-кинетической теории? Сделать это не так просто, как кажется на первый взгляд. Попробуем разобраться.

С увеличением температуры увеличиваются скорости молекул и в результате увеличивается размах их колебаний около положений равновесия. Рассмотрим две соседние молекулы. Предположим для простоты, что молекула *1* неподвижна, а молекула *2* колеблется около точки *O* (рис. 8, *а*). Чем выше температура тела, тем больше размах *AB* колебаний молекулы *2* (рис. 8, *б*). Однако среднее расстояние между молекулами *1* и *2* при этом не меняется. Значит, и размер тела должен оставаться неизменным. Как же тогда объяснить тепловое расширение?

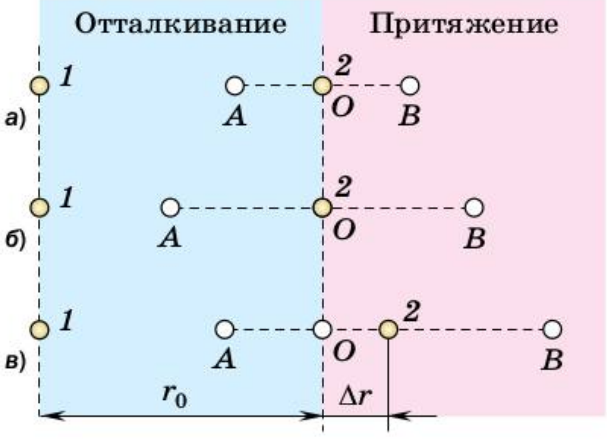


Рис. 8. Объяснение теплового расширения твёрдых тел на основе МКТ

В нашем рассуждении мы предполагали, что максимальные отклонения молекулы *2* влево и вправо одинаковы (*AO* = *OB*). Оказывается, это не так. Дело в том, что сила отталкивания, действую-

щая на молекулу *2* при её движении от положения равновесия влево, возрастает с расстоянием быстрее, чем сила притяжения, действующая при движении вправо. Это приводит к тому, что максимальное отклонение молекулы *2* влево оказывается меньше максимального отклонения вправо: $AO < OB$. В результате среднее положение молекулы *2* не совпадает с положением равновесия, а смещено вправо на расстояние $\Delta r = \frac{OB - AO}{2}$ (рис. 8, *в*).

Чем больше энергия молекулы *2*, тем больше смещение Δr её среднего положения и тем больше среднее расстояние между молекулами *1* и *2*. Таким образом, нагревание приводит к тому, что среднее расстояние между молекулами увеличивается.

§ 5 ВНУТРЕННЯЯ ЭНЕРГИЯ

Вам известны два вида механической энергии: ***потенциальная*** и ***кинетическая***. Потенциальная энергия — это энергия взаимодействия тел или частей одного тела, кинетическая — это энергия движущихся тел.

В любом веществе, независимо от его агрегатного состояния (твёрдого, жидкого, газообразного), молекулы находятся в тепловом движении. Следовательно, даже если само тело покоится, его молекулы обладают кинетической энергией. Молекулы тела взаимодействуют между собой, поэтому обладают потенциальной энергией.



а)



б)

Тела, обладающие потенциальной энергией:
а — деформированная пружина;
б — камень, поднятый над землёй

Сумму кинетической энергии теплового движения всех молекул тела и потенциальной энергии их взаимодействия между собой называют внутренней энергией тела.

Внутреннюю энергию обозначают буквой U и измеряют в *джоулях* (**Дж**).

Кинетическая и потенциальная энергия одной молекулы — очень маленькая величина. Но суммарная энергия всех молекул, которые содержатся в теле, велика.



а)



б)

Движущиеся тела обладают кинетической энергией:
а — парящая птица;
б — движущийся поезд

В различных процессах, происходящих с телами, их механическая энергия (кинетическая и потенциальная энергия) и внутренняя энергия могут переходить друг в друга.

Чтобы убедиться в том, что механическая энергия может перейти во внутреннюю, проведём следующий опыт. Возьмём свинцовый шар, поднимем его над свинцовой плитой (рис. 9, *а*) и отпустим. При падении высота шара над плитой уменьшается, а его скорость увеличивается (рис. 9, *б*). Поэтому потенциальная энергия шара уменьшается, а кинетическая — возрастает. После падения на плиту он остановится. И кинетическая, и потенциальная энергия шара станут равными нулю. Но это не значит, что энергия исчезла.

Внимательно осмотрев шар, обнаружим, что он деформировался. Значит, расстояния между его молекулами изменились, а поэтому изменилась и потенциальная энергия их взаимодействия. Если же измерить температуру шара сразу после удара, обнаружится, что он нагрелся. Значит, увеличилась средняя кинетическая энергия его молекул, а поэтому и суммарная кинетическая энергия молекул.

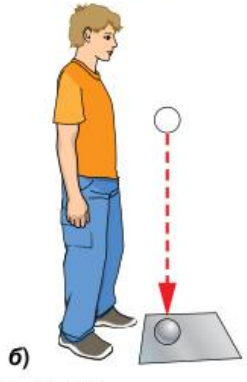
Итак, внутренняя энергия шара изменилась. Плита в результате взаимодействия с шаром тоже деформировалась и нагрелась. Таким образом, механическая энергия шара перешла во внутреннюю энергию шара и плиты.

Приведём другие примеры перехода механической энергии тела в его внутреннюю энергию. При движении тела в присутствии трения нагревание соприкасающихся поверхностей может быть очень сильным. Так, при торможении поезда тормозные колодки значительно нагреваются. Следовательно, увеличивается внутренняя энергия тормозных колодок (части поезда), а кинетическая энергия поезда уменьшается.

Трение увеличивает и внутреннюю энергию возвращающегося с орбиты космического аппарата перед посадкой на Землю. Поэтому на



а)



б)

Рис. 9. Механическая энергия свинцового шара после удара перешла во внутреннюю энергию шара и плиты

нём приходится устанавливать специальную тепловую защиту и уменьшать скорость его спуска. При этом механическая энергия самого аппарата уменьшается.

Внутренняя энергия тела не зависит от его механического движения и положения относительно других тел. Так, внутренняя энергия шара не изменится, если его положить на стол, а затем поднять над столом.

Внутренняя энергия определяется внутренним состоянием тела (характером движения и взаимным расположением молекул).

Кроме нагревания, тела могут испытывать и другие изменения состояния. Например, они могут плавиться, испаряться и т. д. Во всех случаях изменяется состояние тел, а значит, и внутренняя энергия.

Рассмотрим пример. Пусть имеется 1 г твёрдой ртути при температуре –40 °С и 1 г паров ртути при температуре 400 °С. Сравним их внутренние энергии. Поскольку температура паров выше, то больше средняя кинетическая энергия молекул, а значит, и суммарная кинетическая энергия молекул. Но во внутреннюю энергию входит ещё и потенциальная энергия взаимодействия всех молекул. Различаются ли потенциальные энергии взаимодействия молекул в разных агрегатных состояниях?

Потенциальную энергию системы можно рассматривать как работу, которую система способна совершить, а определяется эта энергия взаимным расположением тел. Обратимся ещё раз к аналогии с тележками (см. рис. 3). Пусть система находится в положении равновесия, т. е. тележки расположены на таком расстоянии друг от друга, что силы притяжения и отталкивания взаимно уравновешены. Тележки покоятся, и работу система совершить не может. Будем увеличивать расстояние между тележками. При этом мы сами будем совершать работу, преодолевая силы притяжения магнитов. Чем дальше раздвинем тележки, тем большую работу совершим и тем

большую потенциальную энергию запасём в системе (тем большую работу совершат силы притяжения магнитов при сближении тележек, если мы их отпустим). Таким образом, при удалении тележек от положения равновесия потенциальная энергия системы увеличивается.

Аналогичное рассуждение можно провести и для молекул. Потенциальная энергия взаимодействия молекул увеличивается, если расстояние между ними становится больше равновесного. Поэтому в газообразном состоянии, когда среднее расстояние между молекулами значительно превышает равновесное, потенциальная энергия взаимодействия молекул больше, чем в жидком и твёрдом состояниях. Таким образом, в рассмотренном примере большей внутренней энергией обладают пары ртути.

Чтобы перевести тело из твёрдого состояния в жидкое, а затем в газообразное, нужно совершить работу по преодолению сил притяжения между частицами. При этом внутренняя энергия увеличивается, даже если температура тела не меняется. При обратном переходе из газообразного состояния в жидкое, а затем в твёрдое внутренняя энергия тела уменьшается.



1. Что называют внутренней энергией тела? **2.** Рассмотрите превращения энергии, которые происходят при подъёме шара и при его падении. **3.** Что свидетельствует об изменении состояний свинцового шара и свинцовой плиты (см. рис. 9) в результате их соударения? **4.** Приведите примеры перехода механической энергии тела в его внутреннюю энергию. **5.** От чего зависит внутренняя энергия тела? **6.** Объясните, почему при переходе вещества из жидкого состояния в газообразное внутренняя энергия тела увеличивается, даже если его температура не меняется.



1. Подумайте, существует ли связь между внутренней энергией и температурой тела.

2. Докажите, пользуясь основными положениями МКТ, что все тела обладают внутренней энергией.

3. Что происходит с внутренней энергией при переходе вещества из газообразного состояния в жидкое и затем в твёрдое?

УПРАЖНЕНИЕ 3

1. Сравните внутренние и механические энергии планёра, стоящего на вершине горы и находящегося в полёте, если его температуру на горе и в воздухе считать: а) одинаковой; б) различной.
2. В одном стакане находится холодная вода, в другом — горячая той же массы. Одинакова ли внутренняя энергия воды в этих стаканах?

§ 6 СПОСОБЫ ИЗМЕНЕНИЯ ВНУТРЕННЕЙ ЭНЕРГИИ ТЕЛА

Ранее был поставлен вопрос о сравнении механических и внутренних энергий планёра, стоящего на горе и находящегося в полёте, при условии, что его температура в обоих случаях одинакова. Механическая энергия планёра на горе и в полёте различна, так как различны его скорость и высота над землёй. При этом его внутренняя энергия остаётся постоянной, поскольку кинетическая энергия хаотического движения молекул и потенциальная энергия их взаимодействия друг с другом не изменяются.

Как же изменить внутреннюю энергию тела? Проведём простой опыт. Ударим по металлическому стержню молотком (рис. 10). В этом случае над стержнем будет совершена работа, он нагреется и деформируется. Значит, кинетическая энергия движения молекул и потенциальная энергия их взаимодействия изменятся. Следовательно, изменится и внутренняя энергия стержня.

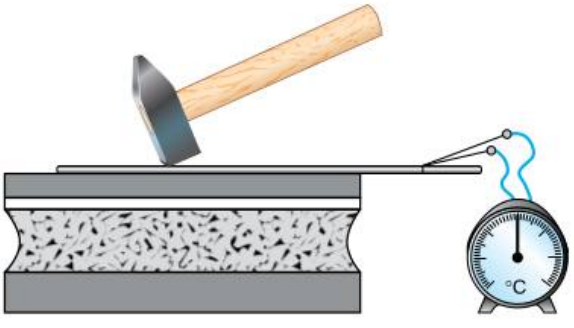


Рис. 10. Увеличение внутренней энергии металлического стержня совершением работы

Если работа совершается над телом, то внутренняя энергия этого тела увеличивается. Подтверждением этого может служить следующий опыт. Латунную трубку с эфиром (рис. 11) плотно закрыли пробкой. Трубку обвили вокруг верёвкой, которую быстро двигают. В результа-

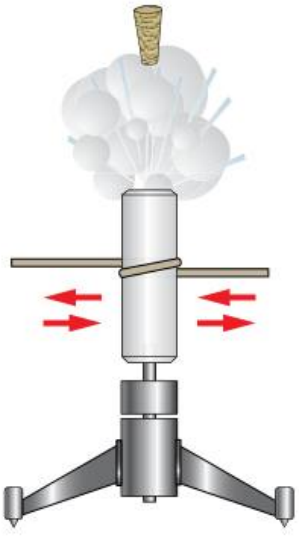


Рис. 11. Увеличение внутренней энергии эфира совершением работы

те через некоторое время эфир нагревается, закипает, и пар выбивает пробку.

Если работу совершает само тело, то его внутренняя энергия уменьшается. Наблюдать это можно на опыте.

Возьмём толстостенную стеклянную банку с узким горлом, закроем её пробкой и будем накачивать в банку воздух (рис. 12). Через некоторое время пробка вылетит, а на внутренней поверхности банки появятся капельки жидкости. Дело в том, что, выталкивая пробку, воздух совершает работу. При этом он резко охлаждается, и водяной пар, находящийся в воздухе, превращается в воду. В банке появляется туман. Работу совершает само тело (воздух), поэтому его внутренняя энергия уменьшается.

Внутренняя энергия тела изменяется не только при совершении работы. Если к одному концу металлического стержня поднести пламя спиртовки (рис. 13), то через некоторое время нагреется весь стержень. Как вам известно, при нагревании молекулы тела начинают двигаться быстрее. Следовательно, их кинетическая энергия увеличивается. Значит, увеличивается внутренняя энергия стержня.

Рассмотрим ещё один пример. Опустим нагретый стержень в сосуд с холодной водой. Температура воды начнёт увеличиваться, а температура стержня — уменьшаться. Происходит передача энергии от тела с более высо-



Рис. 12. Уменьшение внутренней энергии воздуха при совершении им работы

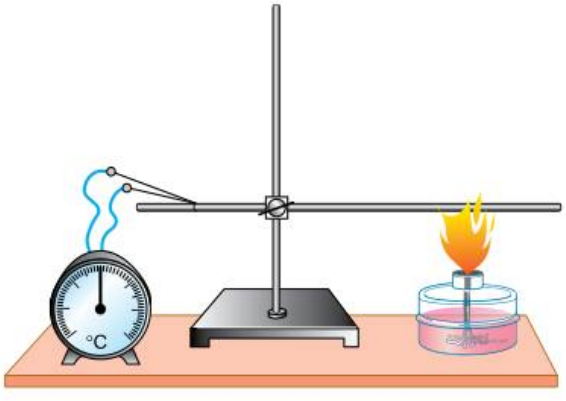


Рис. 13. Увеличение внутренней энергии металлического стержня теплопередачей

кой температурой (стержень) к телу с более низкой температурой (вода). Работа при этом не совершается.

Процесс изменения внутренней энергии тела без совершения работы называют теплопередачей.

Теплопередача (теплообмен) происходит только при наличии разности температур, причём энергия всегда передаётся от тела с большей температурой к телу с меньшей температурой.

Внутреннюю энергию тела можно изменить двумя способами: совершением работы и теплопередачей.

1. Пользуясь рисунком 10, расскажите, как изменяется внутренняя энергия тела, когда над ним совершают работу. **2.** Опишите опыт, показывающий, что внутренняя энергия тела уменьшается при совершении работы. **3.** Что такое теплопередача? При каком условии возможен этот процесс? **4.** Приведите примеры изменения внутренней энергии тела путём теплопередачи. **5.** Назовите способы изменения внутренней энергии тела.

Чем объяснить, что при вколачивании гвоздя в стену его шляпка почти не нагревается, но, когда гвоздь вбит, достаточно нескольких ударов, чтобы шляпка сильно нагрелась?

УПРАЖНЕНИЕ 4

1. Каким способом — совершением работы или теплопередачей — изменялась внутренняя энергия детали: а) при сверлении в ней отверстия; б) при нагревании её в печи перед закалкой; в) при быстром охлаждении детали в воде?
2. В кузнице с помощью молота (холодная ковка) получают нужную форму детали. Как вы думаете, нагревается ли деталь после ударов молота? Обоснуйте свой ответ.
3. Кусок свинца можно нагреть разными способами: ударяя по нему несколько раз молотком, помещая в пламя горелки, сгибая и разгибая несколько раз, помещая в горячую воду. Можно ли утверждать, что во всех случаях внутренняя энергия куска свинца изменилась?
4. Что происходит со спичкой при трении её о коробок? Меняется ли при этом её внутренняя энергия? Ответ обоснуйте.

Это любопытно...

Из истории учения о теплоте

С глубокой древности люди задумывались над вопросами: чем отличается горячее тело от холодного? что такое теплота? Ещё в 1744—1745 гг. ***Михаил Васильевич Ломоносов*** в работе «Размышления о причине теплоты и холода» высказал утверждение о том, что тепловые явления обусловлены движением частиц тела — его молекул.

Согласно другой точке зрения, теплоту связывали с особого рода жидкостью, пропитывающей поры тела, как вода пропитывает губку. Действительно, мы замечаем, что тепло от огня в очаге передаётся через стенки котла воде, нагревая её. Горячая вода нагревает погружённую в неё холодную ложку. Каждый из вас может привести пример, как бы подтверждающий представление о теплоте, как о жидкости, способной перетекать от более нагретого тела к менее нагретому. То, что эта жидкость не только невидима, но и невесома, было установлено сравнительным взвешиванием холодных и горячих тел. Такую жидкость назвали *теплородом*. Приток теплорода в тело вызывает его нагревание, а убыль — охлаждение. Количество теплорода во всех тепловых процессах должно оставаться постоянным.

Ломоносов отрицал существование теплорода и говорил, что «причиною теплоты является внутреннее вращательное движение связанной материи». Подобной точки зрения придерживались и некоторые другие учёные XVI—XVIII вв. Так, английский учёный ***Фрэнсис Бэкон*** писал: «Сама теплота в своей сущности есть не что иное, как движение... Теплота состоит в переменном движении мельчайших частиц тела».



Опыт Румфорда. При сверлении помещённой в воду металлической болванки вода, к удивлению окружающих, закипала без огня

Эксперименты, свидетельствовавшие против теории теплорода, были поставлены лишь в конце XVIII в. англо-американским учёным ***Бенджамином Томпсоном*** (граф Румфорд). Окончательно же теория теплорода была отвергнута только в XIX в. после открытия закона сохранения энергии.

Приведите пример опыта, результат которого свидетельствует, по вашему мнению, в пользу того, что теплорода не существует. Обоснуйте свою точку зрения.

§ 7 ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ

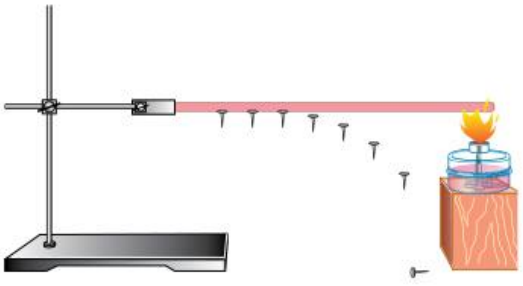


Рис. 14. Передача энергии от одной части твёрдого тела к другой

Вы знаете, что внутреннюю энергию тела можно изменить путём теплопередачи. Понимать механизм теплопередачи и уметь её использовать в жизни очень важно для человека. Существует три вида теплопередачи: *теплопроводность*, *конвекция*, *излучение*. Рассмотрим сначала теплопроводность.

Проделаем опыт. К металлическому стержню (спице) прикрепим с помощью воска несколько гвоздиков (рис. 14). Нагревая один конец стержня, проследим за их поведением. Мы заметим, что по мере нагревания стержня воск будет плавиться и гвоздики начнут падать. Сначала упадут гвоздики вблизи пламени, затем те, которые находятся дальше от него. Это значит, что стержень разогревается постепенно — чем дальше от пламени часть стержня, тем большее время требуется для её нагревания.



Передача внутренней энергии от одной части гвоздя к другой при нагревании

Объясним, как передаётся энергия при теплопроводности. При нагревании одного конца стержня частицы этой части металла начинают двигаться быстрее. В результате их взаимодействия с соседними частицами последние тоже ускоряются. Так постепенно энергия передаётся по всему стержню, и он нагревается.



Изменение внутренней энергии тел путём теплопередачи

Рассмотрим другой пример. В стакан с горячей водой опустим ложку. Через некоторое время она нагреется, а вода немного остынет. Частицы горячей воды движутся в среднем с бóльшими скоростями, чем частицы холодной ложки. Встречая на своём пути холодную ложку, эти частицы воды передают частицам ложки часть своей кинетической энергии. За счёт взаимодействия частиц ложки энергия передаётся по ней от более нагретой части к менее нагретой.

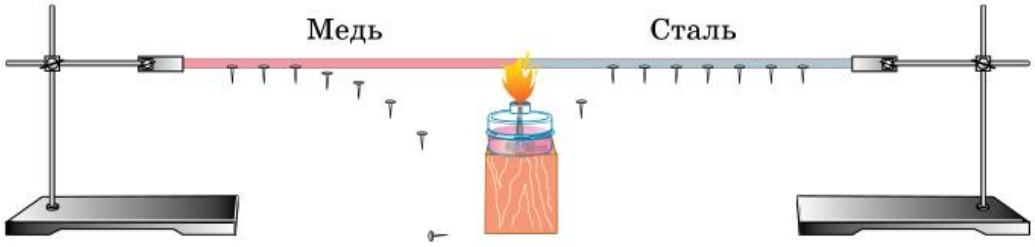


Рис. 15. Теплопроводность разных веществ

Теплопроводность — процесс, при котором энергия передаётся от одного тела к другому или от одной части тела к другой за счёт теплового движения частиц и их взаимодействия между собой.

Важно отметить, что *при теплопроводности* происходит только передача энергии (иногда говорят — перенос тепла), а *переноса вещества не происходит*. В противном случае при нагревании стержня (см. рис. 14), например, изменялась бы его толщина, чего не наблюдается.

Способность различных веществ передавать энергию путём теплопроводности различна. Иначе говоря, различные вещества обладают разной теплопроводностью. В этом можно убедиться на опыте, в котором энергия передаётся по стержням из меди и стали (рис. 15).

Наилучшей теплопроводностью обладают металлы. Если вы опустите в горячую воду металлическую и деревянную ложки и будете придерживать их пальцами, то почувствуете, что металлическая ложка быстро становится горячей, в отличие от деревянной, изменение температуры которой на ощупь не определяется.



Рис. 16. Теплопроводность жидкости

Проведём опыт, который позволит сделать вывод о теплопроводности воды. Возьмём пробирку с водой, опустим в неё кусочек льда. (Для того чтобы лёд утонул, его нужно утяжелить, например прикрепить к нему гайку.) Расположим верхнюю часть пробирки над пламенем спиртовки. Нагревая пробирку, доведём воду до кипения (рис. 16). Что можно сказать о температуре воды в нижней части пробирки? Можно предположить, что вода не нагрелась,

поскольку лёд не растаял. Значит, теплопроводность воды плохая.

Не только вода, но и другие жидкости (исключение — расплавленные металлы) обладают плохой теплопроводностью.

В газах расстояние между молекулами значительно больше, чем в жидкостях, и взаимодействуют молекулы между собой очень слабо. Поэтому следует ожидать, что теплопроводность газов ещё хуже, чем жидкостей.



Рис. 17. Теплопроводность газа

Проверим нашу гипотезу на опыте. Расположим пробирку с воздухом закрытым концом вверх над пламенем горелки (рис. 17), а в открытый конец поместим палец. Палец очень долго не будет чувствовать тепло, значит воздух обладает плохой теплопроводностью. Плохая теплопроводность газов позволяет использовать их в качестве теплоизоляторов. Именно из-за содержания воздуха между волокнами наполнителя в зимней одежде мы не замерзаем. Самую плохую теплопроводность имеет очень сильно разреженный газ (вакуум).



При горении спички её противоположный конец остаётся холодным, что свидетельствует о плохой теплопроводности дерева

Человек научился использовать и сочетать вещества с разной теплопроводностью для своих нужд. Так, посуду для приготовления пищи изготавливают из металлов, которые хорошо проводят тепло. А её ручки делают из плохо проводящих тепло материалов — дерева, пластмассы. Чайные чашки, тарелки делают из глины, фарфора, также обладающих плохой теплопроводностью.

Для сохранения тепла стены домов изготавливают из материалов с плохой теплопроводностью, часто их делают многослойными. А металлические трубы со всевозможными теплоносителями (отопление) или хладоносителями (холодильники) имеют с внешней стороны слой теплоизоляции, уменьшающий передачу энергии окружающей среде.

1. Каков механизм передачи энергии по металлическому стержню при его нагревании? **2.** В чём состоит процесс теплопроводности? **3.** Объясните плохую теплопроводность газов на основе МКТ. **4.** Объ-

ясните опыт (см. рис. 15), показывающий, что различные вещества обладают разной теплопроводностью. Медь или сталь обладает лучшей теплопроводностью? **5.** Приведите примеры применения веществ, имеющих хорошую и плохую теплопроводность.

1. Греет ли ватное одеяло?

2. Почему пористые материалы обладают плохой теплопроводностью?

3. Ножницы и карандаш, лежащие на столе, имеют одинаковую температуру. Почему же на ощупь ножницы кажутся холоднее?

УПРАЖНЕНИЕ 5

1. Почему металлический чайник, стоящий на огне, брать рукой опасно, а горящую спичку можно держать, не обжигаясь?

2. Почему пустотелый кирпич обеспечивает лучшую теплоизоляцию, чем полнотелый?

3. При какой температуре и металл, и дерево будут казаться на ощупь одинаково нагретыми?

4*[1]. Половина ледяной поверхности пруда была покрыта с начала зимы толстым слоем снега, а другая половина расчищена для катания на коньках. На какой половине пруда толщина льда больше?

ЗАДАНИЕ 4

- Возьмите две проволочки — стальную и медную или стальную и алюминиевую длиной по 5 см каждая. Отметьте время в секундах и осторожно введите одновременно обе проволочки на 1 см в один и тот же слой верхней части пламени свечи, держа проволочки за один конец двумя пальцами. Пальцы должны захватывать 1 см каждой проволочки. Когда пальцам на одной проволочке станет горячо, нужно выпустить её из рук и отметить время. Так же поступите и с другой проволочкой. Сравните результаты. Остудите обе проволочки в блюдце с холодной водой (или под краном), вытрите их насухо тряпочкой и повторите опыт, чтобы закрепить результат. Сделайте вывод.

Это любопытно...

Приспособление животных к различным температурным условиям

Большинство живых существ из-за свойств цитоплазмы клеток способны жить при температуре между 0 и 50 °С. Бóльшая часть мест обитания на поверхности нашей планеты имеет температуру именно в этих пределах.

[1] Звёздочкой обозначены задачи повышенной сложности.



Фенек



Лиса



Песец

Для многих видов живых организмов выход за эти пределы означает гибель либо от холода, либо от жары. Однако имеются бактерии и синезелёные водоросли, населяющие источники воды с температурой выше 85 °С.

Животные менее стойки к экстремальным температурам. Чтобы сохранить температуру тела постоянной, животное должно либо уменьшить потери тепла эффективной защитой, либо увеличить производство тепла. Это достигается весьма разнообразными способами. Прежде всего, важен защитный покров, будь то шерсть, перья или жировой слой. Защитная роль шерстяного покрова хорошо известна. Благодаря ему ездовая собака может, например, спать на снегу при температуре –50 °С. С приближением зимы мех её становится гуще и длиннее. Перья и шерсть не просто пассивные оболочки. Распушив их, птицы и животные создают воздушную подушку с хорошими теплоизоляционными свойствами.

Кончики лап и кончики носа животных не могут быть покрыты шерстью, перьями или жиром, так как иначе они не выполняли бы своих основных функций. Оказывается, теплокровные животные, обитающие в холодном климате, имеют относительно меньшие выступающие части тела (уши, хвосты, лапы и т. д.), чем их сородичи из более тёплых мест. Это уменьшает потери тепла. Наглядным примером могут служить лисицы: фенек Сахары имеет длинные конечности и огромные уши; лисица, живущая в умеренных широтах, более приземиста, её уши намного короче; у песца, живущего в Арктике, очень маленькие уши и короткая морда.

ЗАДАНИЕ 5

- Заполните таблицу, используя материалы учебников физики и биологии, а также дополнительную литературу.

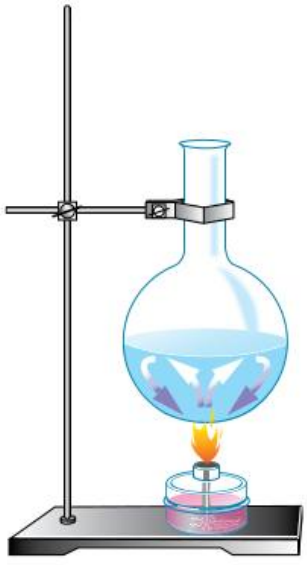
№ п/п	Название животного	Место обитания	Анатомические особенности для терморегулирования организма

Подготовьте сообщение о фактах адаптации животных к различным климатическим условиям, которые показались вам интересными.

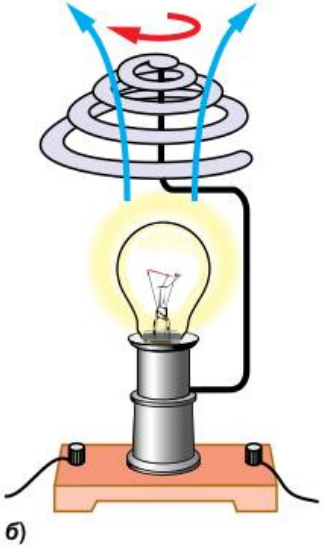
§ 8 КОНВЕКЦИЯ

На опытах вы убедились, что жидкости и газы обладают плохой теплопроводностью. Между тем ряд примеров убеждает нас в том, что они всё же передают тепло от одних тел к другим. Так, зимой воздух в комнате нагревается от радиаторов водяного отопления. Происходит это в результате того, что тёплый нагретый воздух поднимается вверх, вытесняя вниз холодный. Это ещё один вид теплопередачи — *конвекция*.

Рассмотрим механизм конвекции на примере передачи тепла в жидкости. Возьмём колбу с водой, опустим в неё красящее вещество и нагреем снизу. Вы увидите потоки подкрашенной жидкости, поднимающиеся вверх (рис. 18, *а*). Это явление можно объяснить тем, что слои воды, расположенные возле горелки, нагреваются сильнее остальной части воды. Нагреваясь, вода расширяется. Вам известно, что при увеличении объёма тела при неизменной массе его плотность уменьшается. Поэтому сила Архимеда, действующая на нагретую жидкость, становится больше силы тяжести. Это приводит к тому, что нагретая жидкость поднимается вверх.



а)



б)

Рис. 18. Конвекция:
а — в жидкости;
б — в воздухе

Перенос энергии потоками жидкости и газа называют конвекцией.

Таким же способом передаётся тепло и в газах. Соберите вертушку, изображённую на рисунке 18, *б*, и увидите, что под действием потоков нагретого воздуха она начинает вращаться. Конвекция существует только в жидкостях и газах и является основным способом теплопередачи в них.

В отличие от теплопроводности *при конвекции происходит перенос вещества*.

В твёрдых телах конвекция не происходит, так как их частицы могут только колебаться около положений равновесия и образование потока вещества невозможно.



Рис. 19. Нагревание воздуха в комнате путём конвекции

Конвекция, так же как и теплопроводность, широко используется в быту и технике. Преимущественно за счёт конвекции происходит обогрев комнаты радиаторами (рис. 19). Воздух, находящийся около радиатора, нагревается, расширяется и поднимается вверх. Наверху он остывает и опускается вниз, где снова нагревается от радиатора и поднимается вверх и т. д. Примером использования конвекции является тяга, модель для демонстрации которой показана на рисунке 20. Тяга обеспечивает естественный приток воздуха, необходимый, например, для поддержания горения в печах, котлах, каминах.

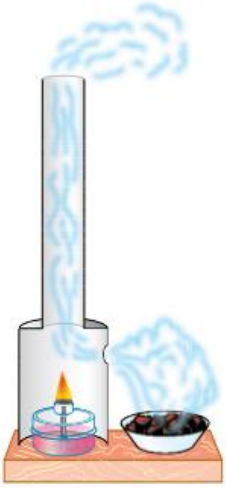


Рис. 20. Модель для демонстрации тяги

Помимо *естественной* конвекции, возникающей при нагревании снизу жидкостей или газов, существует *вынужденная* конвекция. Она возникает при принудительном перемешивании неравномерно нагретых жидкостей или газов с помощью насосов, мешалок и т. п.

1. Объясните механизм нагревания воды в колбе, поставленной на огонь (см. рис. 18, *а*). **2.** Объясните, как и почему происходит перемещение воздуха над нагретой лампой (см. рис. 18, *б*). **3.** Какой вид теплопередачи называют конвекцией? **4.** Почему конвекция невозможна в твёрдых телах? **5.** Приведите примеры естественной и вынужденной конвекции в быту и технике.

1. В чём различие механизмов передачи энергии при теплопроводности и конвекции?

2. Почему жидкости и газы нагревают не сверху, а снизу?

3. Из курса географии вам известно о существовании бризов — ветров, возникающих около моря. Объясните, используя знания о тепловых явлениях, образование дневного и ночного бриза.

УПРАЖНЕНИЕ 6

1. Почему радиаторы водяного отопления располагают под окнами?
2. В каком случае наполненная до краёв кастрюля с кипятком остынет быстрее: когда её поставили на лёд или когда лёд положили на крышку кастрюли?
3. Что остынет быстрее — стакан с компотом или стакан с киселём? Ответ обоснуйте.
4. Объясните действие тяги (см. рис. 20). Когда тяга лучше — зимой или летом?
5*. Будет ли гореть свеча на борту космического орбитального комплекса?

ЗАДАНИЕ 6

- Возьмите зажжённую свечу, откройте немного входную дверь так, чтобы получилась узкая щель. Помещайте свечу наверху, в середине высоты двери и внизу. Следите за направлением языков пламени. Сделайте вывод. Опыт проводите под наблюдением взрослых.

§ 9 ИЗЛУЧЕНИЕ



Солнечное излучение поддерживает на Земле тёплый климат

Основным источником тепла на Земле является Солнце. Как же энергия передаётся от Солнца к Земле? Ясно, что не путём теплопроводности и не путём конвекции, потому что пространство между Землёй и Солнцем вещества практически не содержит. **Энергия от Солнца к Земле передаётся посредством излучения.**

Излучение — это электромагнитные волны, которые мы будем изучать в 9 классе. Все нагретые тела испускают излучение, но с разной интенсивностью. При испускании излучения внутренняя энергия тела уменьшается, а при поглощении — увеличивается. Излучением называют также и вид теплопередачи, при котором энергия передаётся с помощью электромагнитных волн.

Изучим на опыте нагревание за счёт излучения. Для этого возьмём теплоприёмник — металлическую коробочку, одна сторона которой чёрная, другая — отполирована до зеркального блеска. Внутри коробочки находится воздух. Соединим теплоприёмник с жидкостным мано-

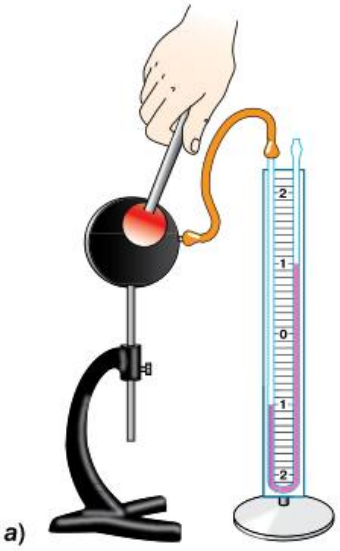


Рис. 21. Передача энергии посредством излучения

метром с помощью резиновой трубки (рис. 21). Если воздух в теплоприёмнике нагреть, то он расширится, что приведёт к понижению уровня жидкости в колене манометра, с которым соединён теплоприёмник. Чем выше температура воздуха в коробочке, тем больше расширяется воздух при нагревании и, значит, разность уровней жидкости в коленах манометра будет больше.

Поднесём к теплоприёмнику кусок металла, нагретый до высокой температуры (рис. 21, *а*). Разность уровней в коленах манометра свидетельствует о том, что воздух в коробочке нагрелся. Между куском металла и теплоприёмником находится воздух, поэтому путём теплопроводности передача энергии произойти не могла. Не могла она произойти и путём конвекции, поскольку коробочка располагалась на одном уровне с куском металла, а не над ним. Значит, теплоприёмник нагрелся за счёт излучения.

Выясним, какая поверхность — чёрная или блестящая — поглощает излучение лучше. Для этого поднесём кусок нагретого металла сначала к чёрной поверхности (см. рис. 21, *а*), а затем — к блестящей (рис. 21, *б*). Разность уровней жидкости в коленах манометра в первом случае больше, чем во втором, значит, *чёрная поверхность поглощает излучение лучше, чем блестящая. Чёрная поверхность, как показывает опыт, и испускает излучение интенсивнее, чем блестящая или белая.*

Передача энергии посредством излучения приобретает первостепенное значение там, где тела нагреты до очень высоких температур, например в различного рода тепловых агрегатах — котлах, топках и т. п. Нагревание излучением используется в парниках. Воздух в парнике согревается потому, что солнечное излучение легко проходит сквозь почти прозрачное для него стекло, поглощается тёмной поверхностью почвы и нагревает её. Излучение же, испускаемое нагретой почвой, стекло пропускает плохо. К тому же в парниках очень слабая циркуляция



Поверхность метеозонда окрашивают серебристой краской, чтобы он меньше нагревался солнечным излучением

воздуха. В результате парник оказывается «ловушкой» для энергии. Вследствие содержания в атмосфере газов, плохо пропускающих излучение нагретой земной поверхности (водяной пар, углекислый газ и др.), на Земле создаётся аналогичный парниковый эффект.

Повышение содержания в атмосфере парниковых газов ведёт к росту температуры на Земле. Наблюдающееся в течение последних десятилетий увеличение массы углекислого газа в атмосфере рассматривают как одну из причин глобального потепления.

Виды теплопередачи встречаются не изолированно, а в различных комбинациях. Например, в котельной установке передача энергии от раскалённых газов к поверхности котла происходит одновременно посредством излучения и конвекцией, через стенки котла — теплопроводностью, а от стенок котла к жидкости — главным образом путём конвекции.



Рис. 22. Устройство термоса

Сложный теплообмен осуществляется, например, в *термосе* (рис. 22). Он представляет собой стеклянную колбу *4* с двойными стенками, покрытыми изнутри и снаружи блестящим металлическим слоем. В термосе пространство между стенками колбы лишено воздуха, что препятствует передаче энергии путём теплопроводности. Блестящее покрытие колбы препятствует передаче энергии излучением. Колбу помещают в пластмассовый или металлический футляр *3*, чтобы защитить от повреждений, закрывают пробкой *2* и навинчивают колпачок *1*. Термос используют для сохранения температуры пищи и напитков.

1. Как на опыте показать нагревание за счёт излучения? **2.** Какие тела лучше поглощают энергию излучения, а какие — хуже? **3.** Приведите примеры учёта на практике различной способности тел поглощать энергию излучения. **4.** Как устроен термос?

УПРАЖНЕНИЕ 7

1. Почему летом носят одежду светлых тонов?
2. Вы не раз сидели у костра и, наверное, защищали себя от тепла рукой. Почему это можно сделать?

3. Почему снег, покрытый сажей или грязью, тает быстрее, чем чистый?
4. Почему спецодежда пожарных обычно серебристого цвета?
5. Скафандры, надеваемые космонавтами, обычно окрашены в белый цвет. В то же время некоторые поверхности космического корабля чёрные. Чем объясняется выбор цвета?

Это любопытно...

Городские «острова тепла»

Термин «остров тепла» имеет отношение к территории с более высокой по сравнению с окружающей местностью температурой воздуха или земной поверхности. Формирование «островов тепла» характерно для мегаполисов — в центре города температура несколько выше, чем на окраине (рис. 23). С чем это связано?

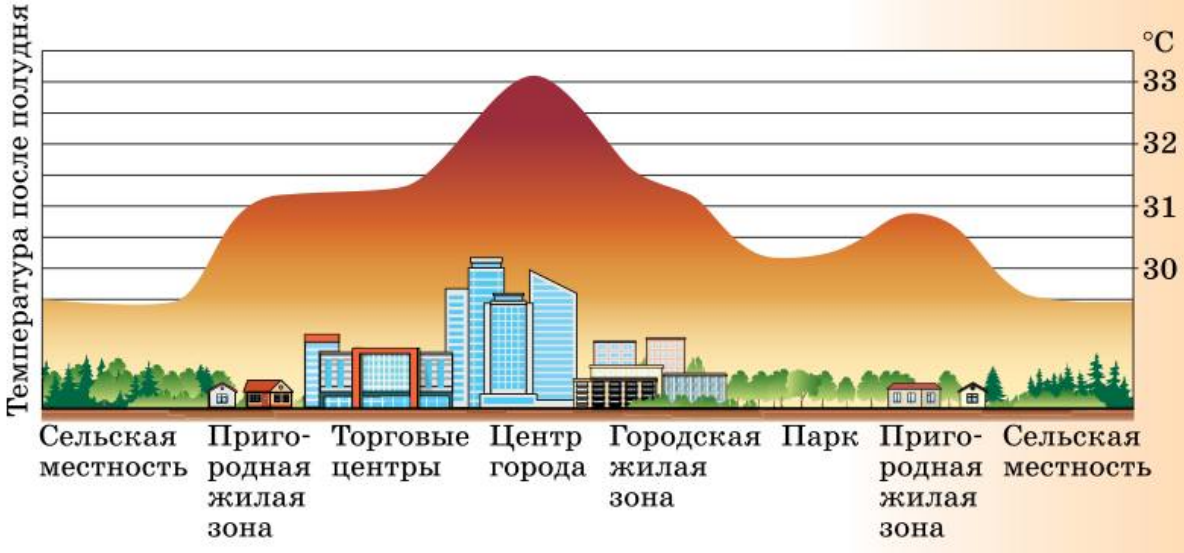


Рис. 23. Городской «остров тепла»

Прежде всего, это обусловлено свойствами материалов, применяемых в городском строительстве: дороги и здания поглощают днём солнечное излучение лучше, чем природные поверхности, при этом ночью остывают медленнее. Также имеет место эффект «городского каньона»: стоящие близко друг к другу высокие здания из-за многократного отражения и поглощения солнечного излучения как бы служат для него «ловушкой». Кроме того, здания мешают свободному перемещению воздушных масс, что препятствует охлаждению за счёт конвекции.

Существенным фактором является выделение энергии различными промышленными объектами, автотранспортом и т. д. Выброс в атмосферу сажи, пепла, измельчённого топлива усиливает парниковый эффект, что также ведёт к повышению температуры.

Наблюдения показали, что «острова тепла» имеются почти во всех крупных городах, при этом разность температур между центром города и его окраинами составляет от 1 до 10 °С.



Предложите несколько способов уменьшить эффект повышения температуры воздуха в черте города.

§ 10 КОЛИЧЕСТВО ТЕПЛОТЫ. ЕДИНИЦЫ КОЛИЧЕСТВА ТЕПЛОТЫ

Вы знаете, что внутреннюю энергию можно изменить двумя способами: совершением работы и теплопередачей.

Энергию, которая передаётся телу или теряется им в процессе теплопередачи, называют количеством теплоты.

Количество теплоты обозначают буквой Q. Так как количество теплоты представляет собой изменение внутренней энергии, то единицей количества теплоты в СИ является *джоуль* (**Дж**). Используют также *килоджоули* (**кДж**) и *мегаджоули* (**МДж**).

$1\ \text{Дж} = 10^{-3}\ \text{кДж}$
$1\ \text{Дж} = 10^{-6}\ \text{МДж}$

$$1\ \text{кДж} = 1000\ \text{Дж} = 10^3\ \text{Дж};$$
$$1\ \text{МДж} = 1\,000\,000\ \text{Дж} = 10^6\ \text{Дж}.$$

В процессе теплопередачи может происходить изменение температуры тела или изменение агрегатного состояния его вещества без изменения температуры. Рассмотрим случай, когда передача телу некоторого количества теплоты приводит к увеличению его температуры. От чего зависит это количество теплоты?

Нальём в один химический стакан воду массой 100 г, в другой — массой 200 г. Нагревая сосуды на одинаковых горелках, будем следить за изменением температуры с помощью термометров. Увидим, что за одно и то же время вода большей массы нагрелась на меньшее число градусов (рис. 24), хотя получили сосуды от горелок одинаковое количество теплоты. Чтобы изменение температуры воды в сосудах было одинаковым, необходимо сосуд с водой

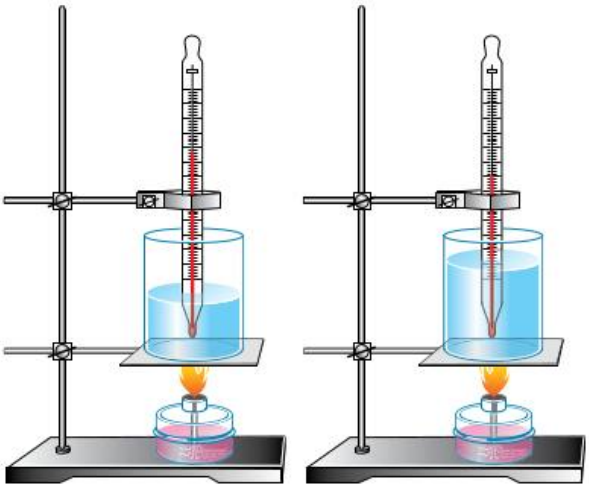


Рис. 24. Нагревание воды разной массы

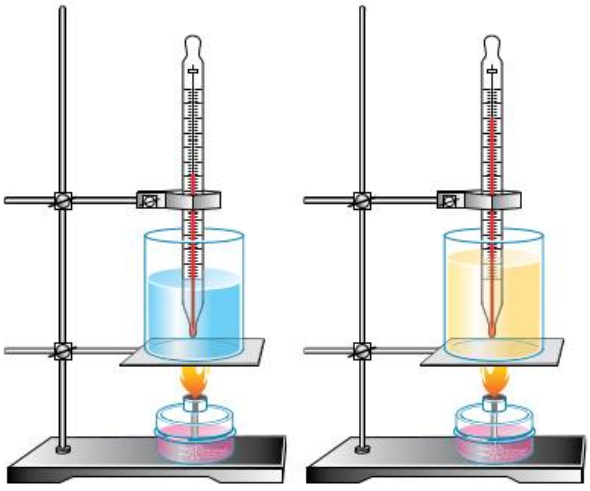


Рис. 25. Нагревание разных веществ равной массы

большей массы нагревать большее время, а значит, затратить большее количество теплоты.

Следовательно, *количество теплоты, которое необходимо сообщить телу для его нагревания, зависит от массы тела.*

Будем нагревать на одинаковых горелках воду одинаковой массы в одном стакане от температуры 20 °С до температуры 40 °С, в другом — от 20 до 60 °С. Опыт показывает, что на нагревание воды во втором стакане требуется больше времени, а значит, большее количество теплоты. Следовательно, *количество теплоты, которое необходимо для нагревания тела, зависит от того, на сколько градусов оно нагревается, т. е. от разности конечной и начальной температур тела.*

Проделаем другой опыт. Нагреем на одинаковых горелках воду и растительное масло равной массы, начальные температуры которых были одинаковы. За одинаковое время они нагреются по-разному (рис. 25). Масло нагреется до более высокой температуры. Чтобы температура воды стала равной температуре масла, воде требуется сообщить дополнительное количество теплоты. Следовательно, *количество теплоты, необходимое для нагревания*

тела, зависит от рода вещества, из которого оно состоит.

Опыт показывает, что количество теплоты, которое выделяется при охлаждении тела, зависит от тех же физических величин, что и количество теплоты, необходимое для нагревания этого тела.

Таким образом, **количество теплоты, необходимое для нагревания тела (или выделяющееся при его охлаждении), зависит от массы тела, разности конечной и начальной температур и от рода вещества, из которого оно состоит.**



1. Что называют количеством теплоты? 2. Какова единица количества теплоты? 3. Как зависит количество теплоты от массы тела? 4. Как зависит количество теплоты от разности конечной и начальной температур тела? 5. Опишите опыт, показывающий, что количество теплоты зависит от рода вещества, из которого состоит тело. 6. От каких величин зависит количество теплоты, которое выделяется при охлаждении тела?

§ 11 УДЕЛЬНАЯ ТЕПЛОЁМКОСТЬ

Многочисленные опыты, подобные тем, которые были рассмотрены в предыдущем параграфе, показывают, что полученное телом при нагревании количество теплоты:

1) прямо пропорционально массе тела ($Q \sim m$);

2) прямо пропорционально разности конечной и начальной температур тела ($Q \sim (t_2 - t_1)$);

3) зависит от рода вещества, из которого состоит тело.

$Q = cm(t_2 - t_1)$

Это можно записать в виде формулы:

$$Q = cm(t_2 - t_1),$$

где c — коэффициент пропорциональности, определяемый родом вещества.

Коэффициент пропорциональности c называют *удельной теплоёмкостью вещества*.

Выразим удельную теплоёмкость из формулы для количества теплоты:

$$c = \frac{Q}{m(t_2 - t_1)}.$$

Физическую величину, показывающую, какое количество теплоты необходимо сообщить телу массой 1 кг для изменения его температуры на 1 °С, называют удельной теплоёмкостью вещества.

Из формулы для удельной теплоёмкости следует, что её единицей является *джоуль на килограмм-градус Цельсия* $\left(\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot °\text{С}}\right)$.

Вспомним, что количество теплоты равно изменению внутренней энергии тела при теплопередаче. Следовательно, *удельная теплоёмкость показывает, на сколько изменяется внутренняя энергия вещества массой* 1 кг *при изменении температуры* на 1 °С. Так, при изменении температуры на 1 °С (при нагревании или охлаждении) внутренняя энергия подсолнечного масла массой 1 кг изменится на 1700 Дж.

Удельная теплоёмкость подсолнечного масла $1700\ \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot °\text{С}}$ означает, что для нагревания подсолнечного масла массой 1 кг на 1 °С необходимо передать ему количество теплоты, равное 1700 Дж, а при охлаждении 1 кг подсолнечного масла на 1 °С выделится 1700 Дж энергии.

Так как молекулы различных веществ взаимодействуют по-разному, разные вещества имеют разную удельную теплоёмкость (табл. 1). Удельные теплоёмкости веществ определяют экспериментально и заносят в специальные таблицы.

Таблица 1. Удельная теплоёмкость некоторых веществ

Вещество	$c, \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot °\text{С}}$	Вещество	$c, \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot °\text{С}}$	Вещество	$c, \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot °\text{С}}$
Золото	130	Железо	460	Лёд	2100
Ртуть	138	Сталь	500	Керосин	2100
Свинец	140	Чугун	540	Эфир	2350
Олово	230	Стекло	840	Дерево (дуб)	2400

Окончание табл.

Вещество	c, $\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot °\text{C}}$	Вещество	c, $\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot °\text{C}}$	Вещество	c, $\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot °\text{C}}$
Серебро	250	Кирпич	880	Спирт	2500
Медь	400	Алюминий	920	Молоко жирное	3900
Цинк	400	Масло подсолнечное	1700		
Латунь	400			Вода	4200

Удельная теплоёмкость одного и того же вещества, находящегося в разных агрегатных состояниях, различна. Например, удельная теплоёмкость воды в жидком состоянии равна $4200 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot °\text{C}}$, а в твёрдом состоянии (лёд) — $2100 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot °\text{C}}$.

1. Что такое удельная теплоёмкость вещества? **2.** Какова единица удельной теплоёмкости вещества? **3.** Почему разные вещества имеют разную удельную теплоёмкость? **4.** Почему различна удельная теплоёмкость одного и того же вещества, находящегося в разных агрегатных состояниях?

1. Удельную теплоёмкость измеряют как в $\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot °\text{C}}$, так и в $\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$. Объясните почему.

2. Почему в радиаторах центрального отопления используют воду?

3. Климат морской отличается от климата континентального. Чем это объяснить?

4*. В два цилиндрических стакана, стеклянный и алюминиевый, одинаковой высоты, ёмкости и массы одновременно наливают одинаковое количество горячей воды. Прикасаясь руками к стаканам, обнаруживают, что один стакан (какой?) прогрелся быстрее, хотя удельная теплоёмкость стекла и алюминия почти одинаковая. Объясните явление.

УПРАЖНЕНИЕ 8

1. Что потребует большего количества теплоты для нагревания на 1 °С — вода в стеклянной банке или вода такой же массы в алюминиевом бидоне? Массы банки и бидона считать одинаковыми.

2. Что потребует большего количества теплоты для нагревания на 1 °С — 100 г воды или 100 г меди?

3. Ученик на вопрос учителя: «Что значит: удельная теплоёмкость цинка равна 400 $\frac{\text{Дж}}{\text{кг}\cdot{}^\circ\text{С}}$?» — ответил: «Это значит, что для нагревания цинка на 1 °С потребуется количество теплоты, равное 400 Дж». Правильный ли ответ дал ученик? Обоснуйте свой ответ.

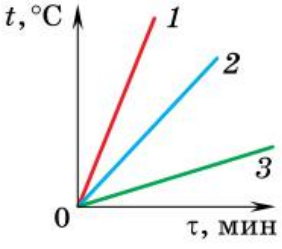


Рис. 26

4. Медной и стальной гирькам одинаковой массы и температуры сообщили равное количество теплоты. У какой гирьки температура изменится больше?

5. На горелках одинаковой мощности нагревают три одинаковых сосуда, в которых находятся вода, керосин и подсолнечное масло равной массы. Определите, какому веществу соответствует каждый график зависимости температуры от времени нагревания (рис. 26).

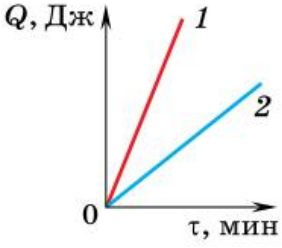


Рис. 27

6. На электрической плитке стоит алюминиевый чайник, наполненный водой. На рисунке 27 приведены графики зависимости количества теплоты, полученного чайником и водой, от времени нагревания. Массы чайника и налитой в него воды одинаковы. Какой из графиков соответствует воде, а какой — алюминию?

§ 12 РАСЧЁТ КОЛИЧЕСТВА ТЕПЛОТЫ. УРАВНЕНИЕ ТЕПЛОВОГО БАЛАНСА

Как вы уже знаете, количество теплоты, получаемое телом массой m при нагревании от температуры t_1 до температуры t_2, вычисляют по формуле:

$$Q = cm(t_2 - t_1),$$

где c — удельная теплоёмкость вещества тела.

Если тело охлаждается, то его конечная температура t_2 будет меньше начальной температуры t_1. В этом случае тело отдаёт количество теплоты

$$Q = cm(t_1 - t_2).$$

Пример 1. В алюминиевом котелке массой 800 г нагрели 3 л воды от 20 до 60 °С. Какое ко-



Нагревание воды в котелке

личество теплоты было передано при этом воде и котелку?

В задаче описан процесс теплообмена между котелком и водой — оба тела будут нагреваться вместе, их температуры одинаковы. В данном случае будем считать, что теплообменом с окружающим воздухом можно пренебречь. Вода и котелок при нагревании получают разные количества теплоты, так как их массы и удельные теплоёмкости (см. табл. 1) различны. Для решения задачи потребуется значение плотности воды $\left(1000\ \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}\right)$.

Запишем условие задачи и решим её.

Дано:	**СИ**	**Решение:**
$m_1 = 800$ г	0,8 кг	Количество теплоты, полученное котелком, равно:
$c_1 = 920\ \frac{\text{Дж}}{\text{кг}\cdot{}^\circ\text{C}}$		$Q_1 = c_1 m_1 (t_2 - t_1)$,
$V_2 = 3$ л	$3 \cdot 10^{-3}$ м^3	$Q_1 = 920\ \frac{\text{Дж}}{\text{кг}\cdot{}^\circ\text{C}} \times$
$\rho = 1000\ \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$		$\times\ 0{,}8$ кг $\cdot$ (60 °C –
$c_2 = 4200\ \frac{\text{Дж}}{\text{кг}\cdot{}^\circ\text{C}}$		– 20 °C) =
$t_1 = 20$ °C		= 29 440 Дж.
$t_2 = 60$ °C		Количество теплоты, полученное водой, равно:
Q — ?		

$$Q_2 = c_2 m_2 (t_2 - t_1).$$

Массу воды определим по формуле

$$m_2 = \rho V_2.$$

Следовательно,

$$Q_2 = c_2 \rho V_2 (t_2 - t_1),$$

$$Q_2 = 4200\ \frac{\text{Дж}}{\text{кг}\cdot{}^\circ\text{C}} \cdot 1000\ \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \cdot 3 \cdot 10^{-3}\ \text{м}^3 \cdot (60\ ^\circ\text{C} - 20\ ^\circ\text{C}) = 504\ 000\ \text{Дж}.$$

Количество теплоты, которое израсходовано на нагревание котелка и воды в нём:

$Q = Q_1 + Q_2$,

$Q = 29\,440$ Дж $+ 504\,000$ Дж $= 533\,440$ Дж $\approx$ ≈ 533 кДж.

Ответ: $Q \approx 533$ кДж.

Пример 2. Решив выпить чаю, мальчик смешал 120 г кипятка, температура которого 100 °С, и 60 г заваренного чая при температуре 10 °С. В стакане установилась температура 70 °С. Вычислите количество теплоты, которое отдал кипяток при остывании. Какое количество теплоты получил холодный заваренный чай при нагревании?

Запишем условие задачи и решим её.

Дано:	**СИ**	**Решение:**
$m_1 = 120$ г $t_1 = 100$ °С $m_2 = 60$ г $t_2 = 10$ °С $t = 70$ °С $c = 4200 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{°С}}$	0,12 кг 0,06 кг	Кипяток, остывая от температуры t_1 до t, отдал количество теплоты: $Q_1 = cm_1(t_1 - t)$, $Q_1 = 4200 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{°С}} \times$ $\times\ 0{,}12$ кг $\cdot\ 30$ °С $=$ $= 15\,120$ Дж.
Q_1 — ? Q_2 — ?		

Холодный заваренный чай, нагреваясь от температуры t_2 до t, получил количество теплоты:

$Q_2 = cm_2(t - t_2)$,

$Q_2 = 4200 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{°С}} \cdot 0{,}06$ кг $\cdot\ 60$ °С $= 15\,120$ Дж.

Ответ: $Q_1 = Q_2 = 15\,120$ Дж.

Проанализируем ответ, полученный при решении примера 2. Количество теплоты, отданное кипятком, оказалось равным количеству

теплоты, полученному холодным заваренным чаем. Следовательно, теплообмен с окружающими телами не происходит. В данном случае в систему, в которой происходит теплообмен, входят горячая вода и заваренный чай.

Если процесс теплообмена происходит в системе, которая не обменивается энергией с внешними телами, то количество теплоты, отданное одними телами, равно количеству теплоты, полученному другими телами системы.

$Q_{отд} = Q_{пол}$

$$Q_{отд} = Q_{пол}.$$

Данное уравнение является математическим выражением закона сохранения энергии при теплообмене и называется ***уравнением теплового баланса.***

Если нет теплообмена с окружающей средой, то внутренняя энергия нагревающихся тел, участвующих в теплообмене, увеличивается ровно на столько, на сколько уменьшается внутренняя энергия остывающих тел.

1. Как рассчитывают количество теплоты, сообщённое телу при его нагревании или выделяющееся при его охлаждении? **2.** Какое уравнение называют уравнением теплового баланса? В каком случае оно справедливо?

УПРАЖНЕНИЕ 9

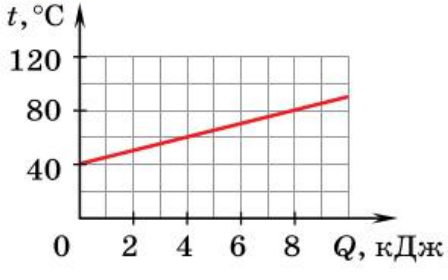


Рис. 28

1. Какое количество теплоты необходимо передать льду массой 1,5 кг при температуре −30 °C для его нагревания на 20 °C?
2. Вода массой 2 кг остыла от 95 до 25 °C. На сколько при этом изменилась её внутренняя энергия?
3. На рисунке 28 приведён график зависимости температуры медного тела от переданного ему количества теплоты. Какова масса тела?

4. В стеклянный стакан массой 120 г налили 200 г молока при температуре 80 °С. Какое количество теплоты выделится при охлаждении стакана с молоком до 20 °С?

5. Мальчик налил в аквариум 10 л воды при температуре 10 °С. Затем он долил воду при температуре 40 °С и в аквариуме установилась температура 20 °С. Определите объём воды, долитой в аквариум.

6. Ученик провёл физический эксперимент: в воду массой 250 г он опустил нагретое в кипящей воде до 100 °С металлическое тело массой 100 г. Начальная температура воды 20 °С, после установления теплового равновесия температура стала 24,5 °С. Определите по данным опыта удельную теплоёмкость металлического тела, если: а) теплообменом с окружающей средой и сосудом можно пренебречь; б) вода налита в алюминиевый стакан массой 60 г, а теплообменом с окружающей средой можно пренебречь.

ЗАДАНИЕ 7

- Придумайте несколько задач, используя данные таблицы 1. Обменяйтесь с товарищем условиями задач и решите их.

Это любопытно...

Калория — единица количества теплоты

Первые измерения количества теплоты проводились во второй половине XVIII в., когда понятия работы и энергии ещё не были введены. Количество теплоты измерялось особой единицей — *калорией* (**кал**). В быту она используется и сегодня. Например, в калориях указывается энергетическая ценность продуктов. Эта первая единица количества теплоты была определена как количество теплоты, необходимое для нагревания 1 г воды на 1 °С. 1 кал = 4,1868 Дж.

На сколько градусов нагреется вода массой 250 г, если ей сообщить количество теплоты, равное 2200 кал?

§ 13 ЭНЕРГИЯ ТОПЛИВА. УДЕЛЬНАЯ ТЕПЛОТА СГОРАНИЯ

Часто, когда нам нужно получить некоторое количество теплоты, мы используем топливо (газ, бензин, керосин, уголь, дрова и т. п.).

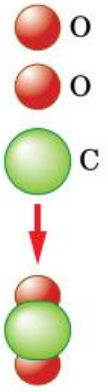


Рис. 29. Строение молекулы углекислого газа (соединение атома углерода и двух атомов кислорода)

До сих пор мы рассматривали процессы, в которых не происходило образование новых веществ. При получении же энергии с использованием топлива — горении топлива — одни вещества превращаются в другие, т. е. происходит химическая реакция. *Горение* — это сложная химическая реакция с участием кислорода, в результате которой выделяется энергия и излучается свет.

Многие виды топлива, например, уголь, нефть, содержат углерод, который при горении соединяется с кислородом. При этом образуется углекислый газ (рис. 29) и выделяется энергия.

Опыты показывают, что количество теплоты, выделяющееся при сгорании топлива, прямо пропорционально массе топлива и зависит от рода топлива. Характеристикой топлива является его *удельная теплота сгорания*, которая определяется его химическим составом.

Удельная теплота сгорания — физическая величина, показывающая, какое количество теплоты выделяется при полном сгорании 1 кг топлива.

Удельную теплоту сгорания обозначают буквой q и вычисляют по формуле

$$q = \frac{Q}{m},$$

где Q — количество теплоты, которое выделяется при полном сгорании топлива массой m.

Единица удельной теплоты сгорания — *джоуль на килограмм* $\left(\frac{\text{Дж}}{\text{кг}}\right)$.

Удельную теплоту сгорания разных видов топлива определяют опытным путём (табл. 2).

Таблица 2. Удельная теплота сгорания некоторых видов топлива

Вещество	q, $10^7 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$	Вещество	q, $10^7 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$
Порох	0,38	Древесный уголь	3,4
Дрова сухие	1,0	Природный газ	4,4
Торф	1,4	Нефть	4,4
Каменный уголь	2,7	Бензин	4,6
Спирт	2,7	Керосин	4,6
Антрацит	3,0	Водород	12

Например, удельная теплота сгорания торфа $1{,}4 \cdot 10^7 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$. Это означает, что при полном сгорании торфа массой 1 кг выделяется $1{,}4 \cdot 10^7$ Дж энергии. При полном сгорании 2 кг торфа выделится энергии в 2 раза больше — $2{,}8 \cdot 10^7$ Дж.

$Q = qm$

При полном сгорании топлива массой m выделяется количество теплоты:

$$Q = qm.$$

1. Что называют удельной теплотой сгорания топлива? 2. Какова единица удельной теплоты сгорания топлива? 3. По какой формуле можно вычислить количество теплоты, выделяемое при сгорании топлива?

УПРАЖНЕНИЕ 10

1. Определите по таблице 2, чему равна удельная теплота сгорания природного газа. Объясните физический смысл этой величины.
2. При полном сгорании какого топлива одинаковой массы — каменного угля или нефти — выделится большее количество теплоты? Ответ поясните.
3. Какое количество теплоты выделяется при полном сгорании торфа массой 5 кг?

4. При полном сгорании 6 кг топлива выделилось количество теплоты $2{,}76 \cdot 10^8$ Дж. О каком топливе идёт речь?

5. Удельная теплота сгорания водорода больше, чем газа бутана. Чем же тогда можно объяснить, что при сгорании баллона бутана выделилось большее количество теплоты, чем при сгорании такого же объёма водорода, если давление газов одинаково?

6*. На газовой плите воду в чайнике нагрели до кипения (100 °С) за 15 мин. Чему равна масса газа, сгорающего за 1 с, если в чайнике было 3 л воды при температуре 20 °С? Теплообменом с окружающей средой и чайником можно пренебречь.

7*. Ученики провели опыт для оценки удельной теплоты сгорания спирта. Какое значение они получили, если масса спиртовки до начала опыта была равна 155 г, после опыта — 153 г, в алюминиевом калориметре массой 50 г было 200 г воды и в процессе нагревания её температура изменилась на 60 °С?

8*. Постройте в одних координатных осях графики зависимости $Q(m)$ для двух видов топлива, если $q_1 = 3q_2$. Приведите пример таких видов топлива.

ЗАДАНИЕ 8

1. Придумайте несколько задач, используя данные таблицы 2. Обменяйтесь с товарищем условиями задач и решите их.

2. Определите минимальное количество природного газа, необходимое для того, чтобы довести до кипения воду в чайнике, которым вы пользуетесь. Почему на практике газа требуется больше? Как уменьшить расход газа?

Это любопытно...

Виды горючего топлива

Топливо — основа энергетики. Величина общего потребления энергии на душу населения, а также эффективность её использования относятся к самым важным показателям экономического развития страны.

Топливо применяют для получения энергии, которую можно использовать для технических или бытовых целей. К топливу относятся только такие вещества, которые при сгорании выделяют большое количество теплоты.

Топливо подразделяют на твёрдое, жидкое и газообразное. К твёрдому топливу относят каменный и бурый уголь, горючие сланцы, торф, древесину, к жидкому — нефть, к газообразному — природный газ. Всё это виды естественного топлива. Существует также и искусственное топливо. Например, в настоящее время получают искусственные нефть и газ путём переработки угля.

Главным горючим элементом большинства видов топлива является углерод, весовое содержание которого в топливе составляет 50—97%.

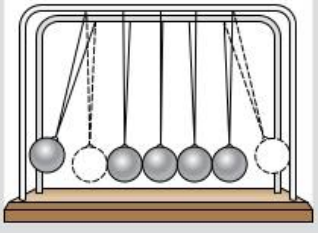
Другим важным элементом является водород, весовое содержание которого доходит до 10% и выше. Чем больше углерода и водорода, тем ценнее топливо, так как при его сгорании выделится большее количество теплоты.

При сжигании топлива образуется много вредных отходов в виде оксида углерода, золы и т. п. Чем больше сжигается топлива, тем больше вредных отходов. Загрязнение воздуха и дефицит кислорода оказывают пагубное влияние на здоровье человека. В связи с этим необходимо вести строгий контроль за состоянием атмосферы, не допуская её загрязнения.

ЗАДАНИЕ 9

- Какие меры предпринимаются для снижения уровня загрязнения воздуха, которое возникает в результате сгорания топлива на теплоэлектростанциях? Соберите необходимую информацию, используя дополнительную литературу или Интернет.

§ 14 ЗАКОН СОХРАНЕНИЯ И ПРЕВРАЩЕНИЯ ЭНЕРГИИ В МЕХАНИЧЕСКИХ И ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССАХ



Превращения механической энергии из одного вида в другой и передача от одного тела другому

Вам уже известно, что в механических процессах могут происходить превращения энергии из потенциальной в кинетическую и наоборот. При этом если тела взаимодействуют только друг с другом и между ними отсутствует трение, то механическая энергия системы тел, равная сумме потенциальной и кинетической энергии, со временем не изменяется. Это утверждение называют *законом сохранения механической энергии*.

В реальных процессах всегда есть трение, поэтому механическая энергия системы не сохраняется, а уменьшается со временем. Однако, как вы уже знаете (вспомните опыт с падением шара на плиту, см. рис. 9), уменьшение механической энергии тел сопровождается увеличением их внутренней энергии.

Полная энергия системы тел — сумма механической (кинетической и потенциальной) энергии и внутренней.

$$E = E_{\text{мех}} + U.$$

$$E = E_{мех} + U$$

Полную энергию системы тел можно изменить, совершая над телами работу или сообщая системе количество теплоты:

изменение полной энергии системы тел ΔE равно сумме работы внешних сил A и количества теплоты Q, полученного системой от окружающих тел.

$$\Delta E = \Delta E_{мех} + \Delta U = A + Q.$$

Если на систему тел не действуют внешние силы ($A = 0$), и она не участвует в теплообмене с окружающими телами ($Q = 0$), то систему называют *изолированной*. Полная энергия изолированной системы сохраняется ($\Delta E = 0$).

В результате происходящих в системе процессов часть механической энергии может перейти во внутреннюю, но *уменьшение механической энергии изолированной системы всегда в точности равно увеличению внутренней энергии* ($\Delta E_{мех} = -\Delta U$). Данное утверждение является частным случаем ***закона сохранения энергии***:

во всех процессах в природе энергия не может появиться из ничего или исчезнуть бесследно; она может лишь переходить от одного тела к другому и из одного вида в другой.

Открытию закона сохранения энергии способствовали исследования многих учёных. Огромное значение имели работы немецких учёных ***Роберта Майера*** (1814—1878) и ***Германа Гельмгольца*** (1821—1894), английского физика ***Джеймса Джоуля*** (1818—1889).

Часто при тепловых явлениях механическая энергия системы тел остаётся неизменной



Использование энергии Солнца: *а* — нагревание поверхности Земли; *б* — поглощение энергии растениями и превращение её в химическую энергию

($\Delta E_{мех} = 0$). В этом случае изменение внутренней энергии системы равно сумме работы внешних сил и количества теплоты, переданного системе: $\Delta U = A + Q$. Например, если газ сжимают, совершая работу $A = 1$ кДж, а также сообщают ему количество теплоты $Q = 1$ кДж, то внутренняя энергия газа возрастает на $\Delta U = 2$ кДж.

Если же $\Delta E_{мех} = 0$ и, кроме того, система является изолированной ($A = 0$, $Q = 0$), то её внутренняя энергия сохраняется ($\Delta U = 0$). При этом если температуры тел системы различны, то между ними будет происходить теплообмен. Но поскольку внутренняя энергия системы не меняется, то количество теплоты, отданное одними телами, будет равно количеству теплоты, полученному другими телами системы: $Q_{отд} = Q_{пол}$. Таким образом, мы получили уже известное вам уравнение теплового баланса.

1. Сформулируйте закон сохранения механической энергии. **2.** Что называют полной энергией системы тел? **3.** Какую систему называют изолированной? **4.** В чём состоит закон сохранения энергии применительно к тепловым процессам?

1. Газ, находящийся в цилиндре под поршнем, сжимают. Подумайте, положительную или отрицательную работу совершает при этом сила, действующая на поршень со стороны газа.

2*. Как вы думаете, будет ли количество теплоты, необходимое для нагревания до определённой температуры газа, находящегося в цилиндре под поршнем, зависеть от того, закреплён поршень или нет?

УПРАЖНЕНИЕ 11

1. Два тела массой 1 кг каждое движутся навстречу друг другу с одинаковыми скоростями 2 м/с, сталкиваются и останавливаются. На сколько изменилась внутренняя энергия системы тел?
2. Некоторому газу передали количество теплоты 200 Дж. Предоставленный сам себе, при расширении он совершил работу 250 Дж. Определите, как и на сколько изменилась внутренняя энергия газа.
3. Какое количество теплоты отдал газ окружающей среде, если над ним совершили работу 2 кДж? Внутренняя энергия газа при этом увеличилась на 1 кДж.
4. Тело получило количество теплоты 12 Дж. Какую работу оно совершило, если внутренняя энергия тела уменьшилась на 20 Дж?

§ 15 ПЛАВЛЕНИЕ И ОТВЕРДЕВАНИЕ КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ТЕЛ

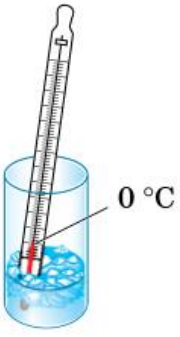


Рис. 30. Плавление льда в стакане

Много раз вы видели, как на улице в мороз вода замерзает и превращается в лёд, а при потеплении происходит обратный процесс: лёд тает и становится водой. Для того чтобы изучить эти процессы, проделаем опыт. В стакан положим примерно 80 г растолчённого льда, опустим в него термометр и оставим на столе. Будем наблюдать за льдом и следить за температурой. В результате теплообмена с окружающей средой температура льда повышается. Когда его температура станет равной 0 °С, лёд начнёт таять (рис. 30), а температура изменяться не будет. Через некоторое время весь лёд перейдёт из твёрдого состояния в жидкое.

Переход вещества из твёрдого состояния в жидкое называют плавлением.

Чтобы расплавить кристаллическое тело, нужно сначала нагреть его до определённой температуры.

Температуру, при которой вещество плавится, называют температурой плавления вещества.



Плавление олова в стальной ложке

У различных веществ в кристаллическом состоянии температура плавления разная (табл. 3). Например, лёд можно расплавить, внеся его в комнату. Температура плавления льда 0 °С. Кусок олова плавится при нагревании его в стальной ложке на спиртовке. Температура плавления олова 232 °С. Железо имеет очень высокую температуру плавления — 1539 °С, поэтому его плавят в специальных печах, где создаётся такая температура.

Существует процесс, обратный плавлению, — кристаллизация.

Переход вещества из жидкого состояния в твёрдое называют отвердеванием или кристаллизацией.

Таблица 3. Температура плавления некоторых веществ (при нормальном атмосферном давлении)

Вещество	$t_{пл}$, °C	Вещество	$t_{пл}$, °C	Вещество	$t_{пл}$, °C
Водород	−259	Натрий	98	Медь	1085
Кислород	−219	Олово	232	Чугун	1200
Азот	−210	Свинец	327	Кремний	1414
Спирт	−114	Цинк	420	Сталь	1500
Ртуть	−39	Алюминий	660	Железо	1539
Лёд	0	Серебро	962	Платина	1772
Цезий	29	Латунь	1000	Осмий	3045
Калий	63	Золото	1064	Вольфрам	3387

Тела в жидком состоянии имеют температуру выше своей температуры плавления. Отвердевание начинается при определённой температуре, до которой расплавленное тело нужно охладить.

Температуру, при которой вещество отвердевает (кристаллизуется), называют температурой отвердевания или кристаллизации.

Опыт показывает, что при неизменном внешнем давлении вещества отвердевают при той же температуре, при которой плавятся. Например, при нормальном атмосферном давлении свинец плавится и кристаллизуется при температуре 327 °C, лёд плавится и вода кристаллизуется при 0 °C.

1. Какой процесс называют плавлением? **2.** Какой процесс называют отвердеванием? **3.** Что называют температурой плавления; температурой отвердевания?

УПРАЖНЕНИЕ 12

1. Можно ли расплавить свинец в оловянной ложке?
2. Почему для измерения температуры в северных районах нашей страны используются спиртовые, а не ртутные термометры?

3. Будет ли цинк плавиться, если его нагреть до температуры 420 °С? Почему?
4. В каком агрегатном состоянии находятся при температуре 1000 °С следующие вещества: алюминий, вольфрам, железо, золото, свинец, серебро?
5. Какие вещества можно расплавить в воде, находящейся при температуре 100 °С?

§ 16 ГРАФИК ПЛАВЛЕНИЯ И ОТВЕРДЕВАНИЯ КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ТЕЛ

Рассмотрим подробнее процесс плавления на примере плавления льда. Для этого будем наблюдать за температурой льда (рис. 31). В начале процесса температура льда была –40 °С, с течением времени лёд нагревался, и его температура повышалась (участок AB). При температуре 0 °С лёд начал плавиться (точка B), и его температура перестала меняться (участок BC). Она оставалась постоянной, пока весь лёд не превратился в воду. Так при постоянной температуре, характерной для данного вещества, происходит плавление всех кристаллических веществ. Именно эта температура является температурой плавления.

Объясним наблюдаемое явление. Энергия тёплого воздуха передаётся льду путём теплопередачи. Так как лёд имеет кристаллическую структуру, его молекулы расположены в строго

@material100

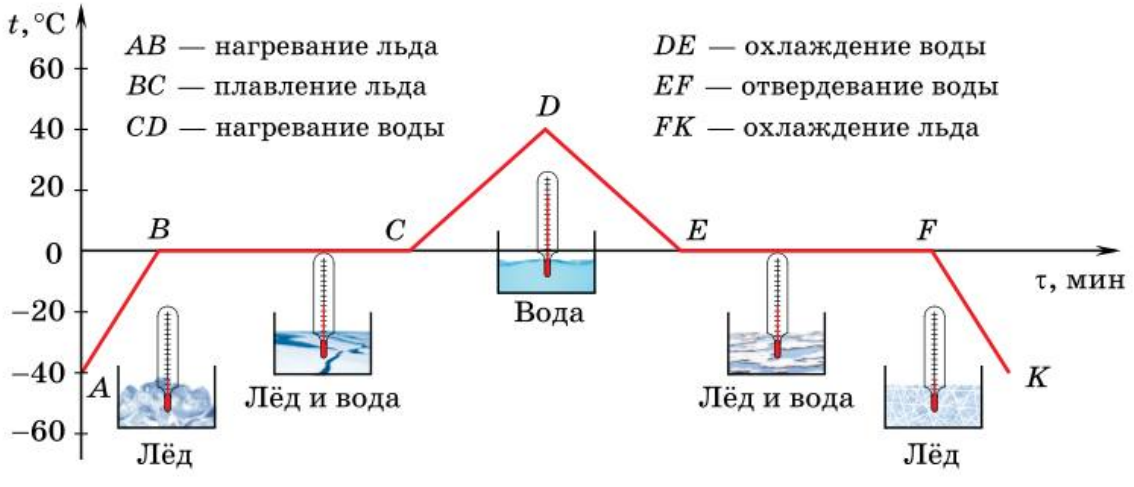


Рис. 31. График зависимости температуры льда от времени нагревания

определённом порядке и колеблются около положения равновесия. Взаимодействие между ними велико. По мере нагревания льда колебательное движение молекул усиливается, его внутренняя энергия и температура повышаются. Наконец, при достижении температуры плавления начинается разрушение кристаллической решётки льда. Связи между молекулами разрываются, частицы покидают свои места. При этом лёд теряет форму, т. е. вещество плавится.

Количество теплоты, сообщаемое телу во время плавления, расходуется на разрушение связей между молекулами кристалла.

В процессе плавления кинетическая энергия молекул не меняется, о чём свидетельствует постоянство температуры. Вся подводимая энергия идёт на увеличение потенциальной энергии молекул.

Вернёмся к опыту со льдом. Образовавшуюся изо льда воду продолжили нагревать (см. рис. 31), её температура стала расти (участок CD). Затем нагревание прекратили (точка D). Температура воды стала уменьшаться (участок DE). При температуре 0 °C начался процесс кристаллизации, во время которого температура оставалась постоянной (участок EF). Только после того, как вся вода превратилась в лёд, температура продолжила уменьшаться (участок FK).

Что же происходит с веществом при кристаллизации? При достижении температуры кристаллизации молекулы замедляются настолько, что силы взаимодействия между ними уже могут удержать молекулы в определённых местах. Кристаллическая структура тела восстанавливается.

В процессе кристаллизации потенциальная энергия молекул уменьшается, а кинетическая не меняется. Поэтому температура остаётся постоянной и происходит передача количества теплоты окружающим телам.

Как правило, плавление кристаллических тел сопровождается уменьшением плотности

вещества. Например, плотность жидкого олова меньше плотности твёрдого. Исключение составляют лёд и висмут, плавление которых сопровождается увеличением плотности вещества. Это объясняется особенностями внутреннего строения кристаллов льда и висмута. Так, плотность воды $1\ \frac{г}{см^3}$, а льда $0{,}9\ \frac{г}{см^3}$.

Тела в аморфном состоянии, в отличие от тел в кристаллическом состоянии, не имеют определённой температуры плавления. При передаче энергии аморфному телу его температура непрерывно повышается. Увеличивается скорость хаотического движения молекул и расстояние между ними. Тела постепенно размягчаются и переходят в жидкое состояние. При охлаждении происходит обратный процесс.

1. Изучите график (см. рис. 31) и опишите процессы, происходящие с водой. **2.** Какие участки графика соответствуют процессам, в которых вода получает энергию, а какие — процессам, в которых вода отдаёт энергию? Почему вы так думаете? **3.** Почему при плавлении льда и отвердевании воды их температура не меняется?

1. Объясните, какие энергетические преобразования наблюдаются при отвердевании воды.

2. Как показать, что стекло — тело аморфное, а поваренная соль — тело кристаллическое?

УПРАЖНЕНИЕ 13

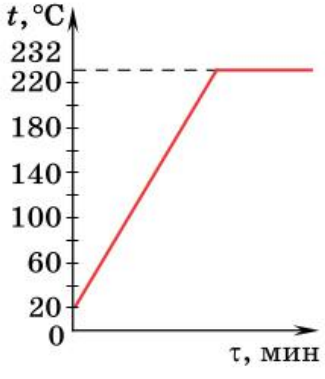


Рис. 32

1. Меняется ли в процессе плавления кинетическая энергия частиц цинка; потенциальная энергия? Ответ обоснуйте.
2. Продолжите график изменения температуры олова с течением времени (рис. 32) при условии, что далее происходит кристаллизация олова и его остывание до первоначальной температуры.
3. Наблюдали ли вы, что весной во время ледохода около реки холоднее, чем вдали от неё? Проанализируйте это явление, чтобы понять и объяснить превращения энергии, происходящие при плавлении.

4*. Почему при изменении атмосферного давления изменяется температура плавления?

Это любопытно...

От чего зависит температура плавления

Установлено, что температура плавления зависит от давления. При повышении давления температура плавления льда понижается. Это можно наблюдать на опыте. На брусок льда надевают проволочную петлю, к нижней части которой подвешен груз. Постепенно проволока опускается, разрезая лёд, и в результате груз падает, а брусок льда на удивление остаётся целым. Дело в том, что из-за возрастания давления температура плавления льда оказывается несколько меньше 0 °С, и лёд под проволокой плавится, а над ней снова смерзается.

Подобное явление наблюдается при преодолении препятствий сползающим по склону ледником. Когда ледник упирается в камень, из-за возрастания давления лёд в этом месте начинает таять, пропуская камень сквозь себя. Когда давление снижается, вода снова замерзает. В результате препятствие как бы проходит сквозь ледник.

Другим фактором, влияющим на температуру замерзания воды, является наличие в ней примесей. Добавление в воду соли снижает её температуру отвердевания. Это удобно, когда нужно охладить что-нибудь ниже нуля. При некоторой определённой концентрации соли весь раствор имеет более низкую температуру замерзания, чем вода. Если, например, количество соли в воде составляет 30%, то такой соляной раствор замерзает при –21 °С.

В городах соль рассыпают на дорогах и тротуарах, чтобы лёд и снег таяли при более низкой температуре.



1*. Если в опыте с ледяным бруском стальную проволоку заменить капроновой нитью того же диаметра, лёд режется значительно хуже. Чем это можно объяснить?

2. Почему морская вода не замерзает при температуре 0 °С?

Как происходит кристаллизация

В морозный день подышите на покрытое инеем стекло. На месте растаявшего инея можно наблюдать рост ледяных кристаллов. Их образование начинается с какого-нибудь готового кристалла льда. При росте кристаллов образуются ответвления в стороны, всегда под одним и тем же углом. Встречаясь друг с другом, ледяные ответвления кристаллов срастаются, образуя сложные узоры.

Мы установили, что температура плавления равна температуре кристаллизации. Но иногда удаётся охладить жидкость на несколько граду-

сов ниже температуры отвердевания. Такую жидкость называют переохлаждённой.

В каких случаях жидкость начинает кристаллизоваться сразу при достижении температуры плавления и в каких случаях возможно переохлаждение? Для начала кристаллизации необходимы так называемые «центры кристаллизации». Ими могут служить мелкие, невидимые даже в микроскоп кристаллики, пылинки, частички дыма, находящиеся в жидкости. Именно около этих центров начинают группироваться молекулы, образуя кристаллы. Например, капельки тумана могут не замерзать даже при температуре –30 °С, если вода достаточно чистая. Туманы, состоящие из переохлаждённых капель, опасны для самолётов. Капельки, осаждаясь на крыльях и корпусе самолёта, образуют на них корку льда (обледенение). При этом самолёт становится тяжелее, изменяется форма крыла, могут примёрзнуть подвижные элементы (элероны, закрылки и т. п.), что опасно. В Российском центральном аэрогидродинамическом институте (ЦАГИ) ведётся работа над созданием гидрофобных нанопокрытий для предотвращения нарастания льда, чтобы облегчить борьбу с обледенением самолёта.



Одну сосульку опустили в замерзающую воду, а другую — в раствор поваренной соли той же температуры. Через некоторое время диаметр первой сосульки заметно увеличился, а второй — уменьшился. Как это можно объяснить?

§ 17 УДЕЛЬНАЯ ТЕПЛОТА ПЛАВЛЕНИЯ

Как вы уже знаете, для того чтобы расплавить тело, недостаточно нагреть его до температуры плавления. Нужно дополнительно сообщить ему при температуре плавления некоторое количество теплоты. От чего оно зависит?

Следует ожидать, что количество теплоты будет тем больше, чем больше масса тела. Действительно, чем больше масса, тем больше число молекул и тем большее число межмолекулярных связей придётся разрушить. Можно также предположить, что для тел одной и той же массы, состоящих из разных веществ, это количество теплоты будет разным, поскольку силы взаимодействия между молекулами разных веществ различны.



Превращение льда в воду

Опыты подтверждают эти предположения и показывают, что количество теплоты, необходимое для перехода вещества из твёрдого состояния в жидкое при температуре плавления, прямо пропорционально массе вещества и зависит от рода вещества.

Количество теплоты, которое нужно сообщить 1 кг кристаллического вещества при температуре плавления, чтобы превратить его в жидкость, называют удельной теплотой плавления вещества.

Удельную теплоту плавления обозначают греческой буквой λ («лямбда») и вычисляют по формуле

$$\lambda = \frac{Q}{m},$$

где Q — количество теплоты, необходимое для плавления вещества массой m.

Единица удельной теплоты плавления — *джоуль на килограмм* $\left(\frac{\text{Дж}}{\text{кг}}\right)$.

У разных веществ разная удельная теплота плавления (табл. 4). Её значение определяется экспериментально.

Таблица 4. Удельная теплота плавления некоторых веществ (при нормальном атмосферном давлении)

Вещество	λ, $10^5 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$	Вещество	λ, $10^5 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$
Алюминий	3,9	Сталь	0,84
Лёд	3,4	Золото	0,67
Железо	2,7	Водород	0,59
Медь	2,1	Олово	0,59
Парафин	1,5	Свинец	0,25
Спирт	1,1	Кислород	0,14
Серебро	0,87	Ртуть	0,12

Например, удельная теплота плавления льда $3{,}4 \cdot 10^5 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$. Что это означает? Чтобы расплавить кусок льда массой 1 кг, взятого при температуре плавления льда, потребуется $3{,}4 \cdot 10^5$ Дж энергии. Это также означает, что внутренняя энергия 1 кг воды при температуре 0 °С на $3{,}4 \cdot 10^5$ Дж больше внутренней энергии 1 кг льда при той же температуре.

$Q = \lambda m$

Зная удельную теплоту плавления, можно подсчитать количество теплоты, необходимое для плавления тела массой m, находящегося при температуре плавления:

$$Q = \lambda m.$$

При отвердевании кристаллического вещества происходит выделение энергии. Как показывает опыт, количество теплоты, выделяющееся веществом при кристаллизации, равно количеству теплоты, необходимому для его плавления. Следовательно, при отвердевании воды массой 1 кг при температуре 0 °С выделится $3{,}4 \cdot 10^5$ Дж энергии.

Таким образом, выделяющееся при отвердевании тела количество теплоты рассчитывают по той же формуле: $Q = \lambda m$.

Пример. Какое количество теплоты требуется для плавления куска свинца массой 0,5 кг, взятого при температуре 27 °С?

Запишем условие задачи и решим её.

Дано:

$m = 0{,}5$ кг

$t_1 = 27$ °С

$t_2 = 327$ °С

$c = 140 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{°С}}$

$\lambda = 0{,}25 \cdot 10^5 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$

Q — ?

Решение:

Чтобы расплавить свинец, его сначала надо нагреть до температуры плавления 327 °С. Для этого потребуется количество теплоты:

$Q_1 = cm(t_2 - t_1)$,

$Q_1 = 140 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{°С}} \cdot 0{,}5 \text{ кг} \times$

$\times (327 \text{ °С} - 27 \text{ °С}) =$

$= 21\,000$ Дж.

Количество теплоты, необходимое для плавления свинца:

$$Q_2 = \lambda m,$$

$$Q_2 = 0{,}25 \cdot 10^5 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}} \cdot 0{,}5 \text{ кг} = 12\,500 \text{ Дж}.$$

Общее количество теплоты:

$$Q = Q_1 + Q_2,$$

$$Q = 21\,000 \text{ Дж} + 12\,500 \text{ Дж} = 33\,500 \text{ Дж} = 33{,}5 \text{ кДж}.$$

Ответ: $Q = 33{,}5$ кДж.



1. На что расходуется энергия топлива при плавлении нагретого до температуры плавления кристаллического тела? **2.** Что показывает удельная теплота плавления? **3.** Какова единица удельной теплоты плавления? **4.** Как рассчитать количество теплоты, необходимое для плавления тела или выделившееся при кристаллизации тела, взятого при температуре плавления?



1. Чтобы лёд в тёплой комнате быстрее растаял, мальчик укутал его ватой. Правильно ли он поступил?

2. Что будет дольше плавиться — лёд или сталь, взятые при температуре плавления, если их массы и количества теплоты, подводимые в единицу времени, одинаковы?

3. Как изменилась бы ситуация с весенними паводками, если бы удельная теплота плавления льда стала бы такой же, как у свинца?



УПРАЖНЕНИЕ 14

1. Лёд внесли с улицы в подвал, температура воздуха в котором 0 °С. Будет ли таять лёд в подвале?
2. В стакане находятся одинаковые массы воды и льда при температуре 0 °С. Обладает ли лёд внутренней энергией? Одинакова ли внутренняя энергия воды и льда?
3. Замёрзнет ли вся вода массой 100 г, предварительно охлаждённая до температуры 0 °С, если она передаст окружающим телам количество теплоты 35 кДж?
4. Алюминиевая и стальная детали массой 1 кг каждая нагреты до их температур плавления. Для плавления какой детали потребуется больше энергии? Во сколько раз?

5. На сколько возрастёт внутренняя энергия куска олова массой 200 г, взятого при температуре 232 °С, если его полностью расплавить?

6. При ювелирных работах необходимо плавить серебро. Рассчитайте количество теплоты, которое выделится при охлаждении и кристаллизации предварительно расплавленного серебра, взятого при температуре 1000 °С. Масса серебра 100 г.

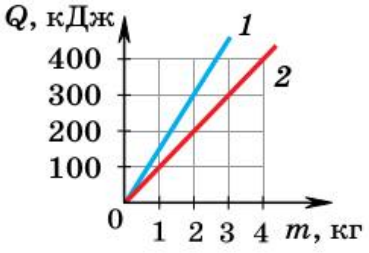


Рис. 33

7*. Определите количество теплоты, которое потребуется для обращения в воду льда массой 3 кг, взятого при 0 °С. Проведите расчёты для случаев: а) потерями энергии пренебречь; б) потери энергии составляют 20%. Почему результаты различаются?

8*. Используя графики, приведённые на рисунке 33, определите, у какого вещества удельная теплота плавления больше и во сколько раз.

ЗАДАНИЕ 10

1. Придумайте несколько задач, используя данные таблиц 3 и 4. Обменяйтесь с товарищем условиями задач и решите их.

2. Возьмите кусочек олова и расплющите его молотком до толщины бумаги. Проткните полученную пластинку спицей и поместите в пламя свечи. Расплавьте пластинку. Опыты проводите в присутствии взрослых.

   Возможно ли в пламени свечи (температура 600—1300 °С) расплавить свинец; железо?

§ 18 ИСПАРЕНИЕ. КОНДЕНСАЦИЯ. НАСЫЩЕННЫЙ И НЕНАСЫЩЕННЫЙ ПАР

Почему в ясный летний день быстро высыхают лужи, оставшиеся после дождя, свежескошенное сено, лежащее на лугах, выстиранное бельё, развешенное на солнце? Куда исчезает вода? Превращается в пар.

Процесс превращения жидкости в пар называют парообразованием.

Существует два способа перехода жидкости в пар: *испарение* и *кипение*.

Процесс парообразования с поверхности жидкости называют испарением.



Испарение воды после дождя

Как объяснить процесс испарения на основе молекулярно-кинетической теории? Вам известно, что молекулы в жидкостях движутся с разными скоростями. Наиболее быстрые молекулы, находящиеся на границе поверхности жидкости и воздуха, могут преодолеть притяжение соседних молекул и покинуть жидкость. Жидкость постепенно становится паром. От чего же зависит скорость испарения жидкости?

Проделаем несколько опытов. Капнем на лист бумаги водой, спиртом или одеколоном и маслом. Проследим, какая жидкость испарится первой, какая — последней. Первым полностью испарится спирт, второй — вода, полного испарения масла вы скорее всего не дождётесь. Следовательно, *скорость испарения зависит от рода жидкости.*



Обмеление Аральского моря в результате потери воды при испарении и резком понижении притока внешних вод

Причина заключается в том, что между молекулами разных жидкостей действуют разные силы притяжения. Так, молекулы спирта притягиваются друг к другу с меньшей силой, чем молекулы воды или масла.

Нальём одинаковое количество воды комнатной температуры в стакан и блюдце. Из какого сосуда вода испарится быстрее? Очевидно, из блюдца, так как в этом случае бóльшая свободная поверхность воды, и поэтому большее число молекул сможет покинуть жидкость за одинаковое время. Следовательно, *скорость испарения зависит от площади поверхности жидкости.*

Когда лужи высыхают быстрее — в тёплый летний день или в холодный осенний? При более высоких температурах воздуха испарение происходит интенсивнее. *Испарение происходит при любой температуре, но с повышением температуры скорость испарения жидкости увеличивается.*

Вы могли наблюдать, что при ветре лужи и бельё высыхают быстрее, чем при отсутствии ветра. Это легко объяснить. Часть вылетевших из жидкости молекул продолжает хаотически двигаться вблизи её поверхности и некоторые возвращаются обратно в жидкость. Ветер же удаляет вылетевшие молекулы, не давая им возможности вернуться. Таким образом, *скорость испарения зависит от движения воздуха над поверхностью жидкости*.

Существует процесс, обратный испарению, — *конденсация*.

Процесс превращения пара в жидкость называют конденсацией.

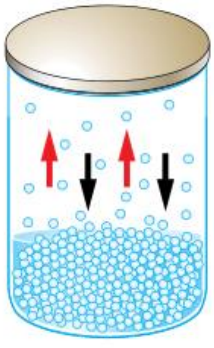


Рис. 34. Испарение жидкости в закрытом сосуде

Процесс испарения всегда сопровождается процессом конденсации. Молекулы пара, находящиеся над жидкостью близко к её поверхности, возвращаются в жидкость. В открытом сосуде испарение идёт быстрее, чем конденсация, поэтому масса жидкости в сосуде уменьшается.

Если же сосуд закрыть, то через некоторое время число молекул, покидающих жидкость, станет равным числу молекул, возвращающихся в неё (рис. 34). Массы жидкости и пара при этом остаются неизменными. Говорят, что система «жидкость — пар» находится в равновесии. Такое равновесие называют ***динамическим***, т. е. подвижным.

Пар, находящийся в динамическом равновесии со своей жидкостью, называют насыщенным.

Насыщенный пар обладает интересными свойствами. Если сжимать его при постоянной температуре, то увеличения плотности и давления происходить не будет. При сжатии пара его плотность в первый момент немного увеличится, и процесс конденсации начнёт преобладать над испарением. Это будет происходить до тех пор, пока вновь не установится динамическое равновесие и плотность пара не вернётся к прежнему значению.

Если нагревать жидкость с паром в закрытом сосуде, то плотность и давление пара будут увеличиваться. Действительно, при повышении температуры скорость испарения жидкости возрастёт, и процесс испарения начнёт преобладать над конденсацией. Динамическое равновесие восстановится уже при более высоких плотности и давлении пара.

Таким образом, *плотность и давление насыщенного пара зависят от его температуры, но не от объёма*.

Если сосуд открыть, то некоторое количество молекул пара выйдет из сосуда. Теперь число вылетающих из жидкости молекул будет больше числа молекул, возвращающихся в жидкость за то же время, т. е. процесс испарения будет преобладать над конденсацией. Пар над жидкостью будет ненасыщенным.

Пар, не находящийся в динамическом равновесии со своей жидкостью, называют ненасыщенным.

Испаряются не только жидкости, но и твёрдые тела. Если сырое бельё вывесить на мороз, то оно вначале замёрзнет (вода превратится в лёд), а через некоторое время высохнет, следовательно, лёд испарится. Другой пример — испарение кристаллического иода. Если в колбу положить кристаллики иода и нагреть их на спиртовке, то через некоторое время иод перейдёт сразу в газообразное состояние, минуя жидкое. Такой процесс называют *сублимацией*. После прекращения нагревания иод из газообразного состояния сразу переходит в твёрдое, снова минуя жидкое.



1. Какой процесс называют испарением? **2.** Объясните на основе МКТ, как происходит процесс испарения. **3.** Почему для каждого вещества существует определённая температура плавления, но не существует определённой температуры испарения? **4.** Какими способами можно ускорить процесс испарения? Объясните их на основе МКТ. **5.** Какой процесс называют конденсацией? **6.** Что такое динамическое равновесие? **7.** Какой пар называют насыщенным? **8.** Какой пар называют ненасыщенным?

Объясните, почему давление насыщенного пара зависит от рода вещества.

УПРАЖНЕНИЕ 15

1. Почему испарение из почвы летом больше, чем зимой?
2. Как предотвратить испарение воды в открытом сосуде?
3. Почему очки запотевают, когда вы входите с мороза в тёплое помещение?

ЗАДАНИЕ 11

1. Нанесите пипеткой на лист бумаги по капле воды, одеколона и наблюдайте за их испарением. Какая жидкость испарится быстрее?

   Нанесите пипеткой по одной капле спирта на разные листы бумаги. Один из листов наклоните, чтобы капля растеклась. Тем самым вы увеличите поверхность испарения этой капли. Наблюдайте за испарением капель. Какая капля испарится быстрее? Дайте объяснение.

   Нанесите пипеткой по капле спирта на разные листы бумаги. Один лист отложите в сторону, а около второго помашите тетрадкой до полного высыхания капли. Посмотрите, испарилась ли другая капля. Дайте объяснение. Сделайте общий вывод из опытов.

2*. Возьмите шприц, наполните его горячей водой так, чтобы и маленького пузырька воздуха не было под поршнем (рис. 35, *а*). Заткните отверстие шприца пальцем и выдвигайте поршень. Что образуется в пространстве между водой и поршнем? Опишите ваши ощущения во время этого опыта. Постарайтесь запомнить, как менялась сила, с которой надо было вытаскивать поршень.

   Повторите эксперимент, используя вместо воды такой же объём воздуха (рис. 35, *б*). Удалось ли вам обнаружить разницу в ощущениях? Попробуйте объяснить результат.

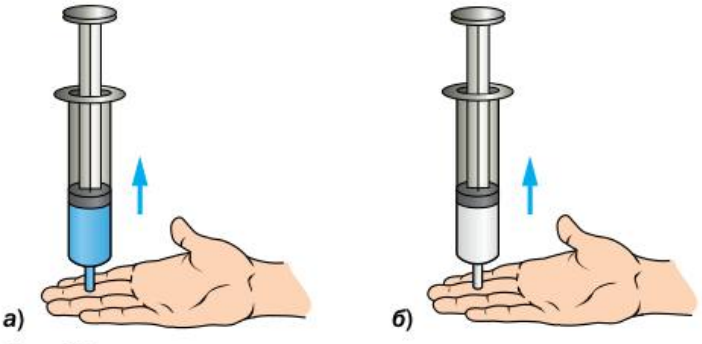


Рис. 35

§ 19 ПОГЛОЩЕНИЕ ЭНЕРГИИ ПРИ ИСПАРЕНИИ ЖИДКОСТИ. ВЫДЕЛЕНИЕ ЭНЕРГИИ ПРИ КОНДЕНСАЦИИ ПАРА

На руку капните воду. Жидкость начнёт испаряться, и рука ощутит прохладу. Можно предположить, что при испарении жидкость охлаждается.

Проделаем опыт. Возьмём термометр, обмотаем его шарик влажной тряпочкой. Рядом положим термометр с сухим шариком. Сравним температуры, которые показывают сухой и влажный термометры. Почему температура влажного термометра ниже?



Конденсация пара на окне

Чтобы ответить на этот вопрос, рассмотрим процесс испарения с энергетической точки зрения. Поскольку при испарении наиболее быстрые молекулы покидают жидкость, то средняя кинетическая энергия молекул оставшейся части жидкости уменьшается. Это означает, что температура испаряющейся жидкости понижается.

Почему же мы не замечаем понижения температуры испаряющейся в стакане воды? Дело в том, что в этом случае температура воды поддерживается постоянной за счёт энергии, поступающей к воде от окружающего воздуха. Значит, чтобы температура жидкости при испарении оставалась постоянной, ей необходимо передавать некоторое количество теплоты. *Процесс испарения сопровождается поглощением энергии.*



Выпадение росы

Конденсация пара сопровождается выделением энергии. Это объясняется тем, что кинетические энергии молекул, возвращающихся в жидкость, увеличиваются под действием сил притяжения со стороны жидкости. В результате средняя кинетическая энергия молекул жидкости увеличивается, что соответствует нагреванию жидкости. Чтобы температура жидкости при конденсации пара оставалась постоянной, от системы необходимо отводить энергию.

После жаркого летнего дня вы могли наблюдать вечером, когда воздух становится прохладнее, выпадение росы. Это водяной пар, находившийся в воздухе, при охлаждении превращается в жидкость, и капельки воды оседают на листьях и траве. Образование облаков также объясняется конденсацией водяного пара. Поднимаясь в более холодные высокие слои атмосферы, пар превращается в мельчайшие капельки воды.

1. Опишите опыт, демонстрирующий охлаждение жидкости при испарении. **2.** Объясните на основе МКТ понижение температуры жидкости при её испарении. **3.** Что происходит с молекулами жидкости и пара в процессе испарения и конденсации? **4.** Приведите примеры природных явлений, которые можно объяснить испарением жидкости и конденсацией пара.

1. Если капнуть на руку одеколон, то ощущение прохлады будет сильнее, чем если капнуть воду. Как это можно объяснить?

2. Почему конденсация пара в атмосфере в капельки дождя или снежинки ведёт к повышению температуры воздуха?

УПРАЖНЕНИЕ 16

1. Выходя из реки после купания, вы ощущаете прохладу, особенно в ветреную погоду. Почему?
2. В жаркий день, когда входишь в воду, кажется, что вода холоднее воздуха, а когда выходишь из воды — воздух холоднее. Почему?
3. В ветреный день нам становится теплее, если спрятаться от ветра, зайдя, например, за угол дома. Одинаковы ли показания термометра на ветру и за углом дома?
4. В производстве для обеспечения чистой водой различных технологических процессов используют дистилляторы. Процесс получения дистиллированной воды основан на парообразовании и конденсации водяных паров. На рисунке 36 показан разрез простейшего дистиллятора, где *1* — нагреватель; *2* — жёлоб; *3* — кран; *4* — холодильник; *5* — дистиллируемая вода; *6* — отводная трубка. В дистиллятор через кран *3* наливают воду, предназначенную для перегонки, и нагревают её. Образующиеся водяные пары соприкасаются с конусообразным дном холодильника, в который налита холодная вода. Пар конденсируется, и дистиллированная вода стекает в жёлоб, откуда её спускают при помощи отводной трубки *6*.

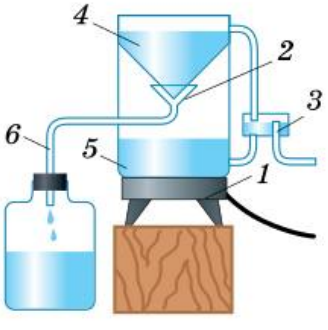


Рис. 36

Какие агрегатные превращения вещества происходят в дистилляторе?

Это любопытно...

Водяной пар в атмосфере

В воздухе содержатся водяные пары́. Если температура окружающей среды понижается, водяной пар может конденсироваться и создать туман. Для образования тумана, кроме понижения температуры, необходимо ещё присутствие центров конденсации: пылинок, частиц несгоревшего топлива и т. п.

В ясные безветренные ночи, когда земная поверхность охлаждается, часть водяных паров вблизи поверхности Земли, конденсируясь, выделяется в виде росы на листьях растений. Роса не заменяет дождь, но смачивает листья и стебли. Кроме того, при образовании росы выделяется энергия, которая препятствует охлаждению растений и предохраняет их от губительного действия заморозков.

С явлением конденсации мы встречаемся и при образовании облаков. Воздух, нагреваясь у поверхности Земли, становится легче, расширяется и поднимается вверх, где температура ниже. Там он охлаждается, но продолжает расширяться, поскольку в верхних слоях атмосферы давление меньше, чем внизу. На работу по расширению воздуха требуется энергия. Поскольку притока энергии снаружи нет, расходуется внутренняя энергия воздуха. Он охлаждается и конденсируется в мельчайшие капельки воды. Так образуются слоистые облака. Но температура этой массы воздуха с оставшимся в нём паром всё ещё выше температуры окружающей среды, поэтому она продолжает подниматься вверх. С высотой давление и температура ещё понижаются, и капли воды превращаются в кристаллики льда. Так образуются кучевые облака. Нижний уровень кучевых облаков состоит преимущественно из капель воды, а верхний — из кристалликов льда.

Когда масса облака превысит критическую, содержащиеся в нём ледяные кристаллы начинают падать вниз. Если, проходя нижние слои атмосферы, они растают, то выпадает дождь, а если не растают, то снег или град.

Облака переносятся ветрами на большие расстояния, в результате этого происходит обмен влагой между различными районами нашей планеты. Ежегодно с поверхности Земли испаряется 511 тыс. км^3 воды. Попав в высокие слои атмосферы, эта огромная масса водяных паров вновь превращается в воду и выпадает на Землю в виде дождя, снега или града.



ЗАДАНИЕ 12

- Объясните, как возникает ледяной дождь, используя материал учебника и допонительные источники информации. Чем ледяной дождь отличается от обычного дождя?

§ 20 ВЛАЖНОСТЬ ВОЗДУХА. СПОСОБЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЛАЖНОСТИ ВОЗДУХА

Бóльшая часть поверхности Земли покрыта водой, которая постоянно испаряется в атмосферу, затем конденсируется в холодных областях в виде облаков и возвращается в Мировой океан в виде дождя. Так происходит непрерывный круговорот воды в природе (рис. 37). Очень важным для всего живого является содержание водяного пара в воздухе.

Количество водяного пара в воздухе можно охарактеризовать физической величиной — *абсолютная влажность*. Абсолютная влажность ρ равна плотности водяного пара, содержащегося в воздухе. Она показывает, какая масса водяного пара содержится в воздухе объёмом 1 м^3.

При каждой температуре существует максимальная абсолютная влажность воздуха, равная плотности насыщенного водяного пара ρ_0 при этой температуре. Значения плотности насыщенного водяного пара при разной температуре приведены в таблице 5. С увеличением температуры плотность насыщенного пара возрастает.



Рис. 37. Круговорот воды в природе

Таблица 5. Зависимость плотности насыщенного водяного пара от температуры

t, °C	ρ_0, 10^{-3} $\frac{кг}{м^3}$	t, °C	ρ_0, 10^{-3} $\frac{кг}{м^3}$
–10	2,3	15	12,8
–5	3,2	20	17,3
0	4,8	25	23,0
5	6,8	30	30,4
10	9,4	50	83,0

Интенсивность процессов испарения воды и конденсации пара зависит от того, насколько водяной пар в воздухе далёк от насыщения. Представим себе, что в помещении находится насыщенный водяной пар. Такое бывает в бане, когда на пол вылито много воды. Будет ли сохнуть в таком помещении мокрое полотенце? Нет, не будет, так как количество вылетающих молекул воды, содержащейся в полотенце, будет равно количеству молекул, возвращающихся обратно в жидкость. Если же пар ещё не достиг насыщения, то испарение будет преобладать и через некоторое время полотенце высохнет. Испарение идёт тем интенсивнее, чем более далёк пар от насыщения.

Для характеристики степени близости пара к насыщению служит физическая величина *относительная влажность*.

Относительной влажностью воздуха φ называют отношение абсолютной влажности воздуха ρ к плотности ρ_0 насыщенного водяного пара при той же температуре, выраженное в процентах.

Её обозначают греческой буквой φ («фи»).

$$\varphi = \frac{\rho}{\rho_0} \cdot 100\%.$$

Чем меньше относительная влажность, тем быстрее сохнут вещи, больше воды испаряет

@vpatrial100

$$\varphi = \frac{\rho}{\rho_0} \cdot 100\%$$

кожа человека и животных, поверхность растений. Человек чувствует себя наиболее комфортно при относительной влажности 40—60%. В музеях внимательно следят за относительной влажностью воздуха, так как при её увеличении деформируются деревянные предметы, размножаются бактерии. Хранение продуктов питания, лекарств, бумаги также требует поддержания в помещении определённой влажности.

Из формулы для расчёта относительной влажности следует, что к увеличению относительной влажности ведёт увеличение абсолютной влажности при постоянной температуре. Относительная влажность также будет расти, если при постоянной абсолютной влажности охлаждать воздух. При некоторой температуре она достигнет 100% — находящийся в воздухе водяной пар станет насыщенным. Дальнейшее охлаждение приведёт к конденсации пара. Именно это происходит ранним утром: вследствие охлаждения воздуха выпадает роса.

Температуру, при которой находящийся в воздухе водяной пар становится насыщенным, называют точкой росы.

Чем выше относительная влажность, тем ближе точка росы к фактической температуре воздуха.

Для измерения влажности воздуха применяют ***гигрометры***.

В основе работы *волосного гигрометра* (рис. 38) лежит свойство обезжиренного человеческого волоса изменять длину при изменении относительной влажности воздуха. При увеличении влажности воздуха волос удлиняется, а при уменьшении — укорачивается. Изменение длины волоса приводит к повороту стрелки гигрометра. По шкале определяют относительную влажность воздуха.

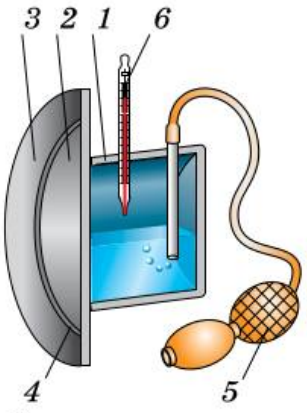


Рис. 38. Волосной гигрометр

Абсолютную влажность воздуха по точке росы можно определить с помощью *конденсаци-*



а)



б)

Рис. 39. Конденсационный гигрометр: *а* — внешний вид; *б* — устройство

онного гигрометра (рис. 39, *а*). Его основным элементом является прикреплённая к стойке металлическая коробка *1* (рис. 39, *б*), передняя стенка *2* которой хорошо отполирована. Коробка окружена полированным кольцом *3*, которое отделено от неё теплоизолирующей прокладкой *4*. В коробке имеется два отверстия. Через одно отверстие с помощью трубки к ней присоединена резиновая груша *5*.

В коробку наливают легко испаряющуюся жидкость (обычно эфир) и через другое отверстие в неё вставляют термометр *6*. С помощью груши продувают воздух через коробку, что вызывает сильное испарение эфира и быстрое охлаждение коробки. Её полированная поверхность запотевает. Появление капелек росы указывает на то, что находящийся в воздухе вблизи коробки водяной пар при понижении температуры стал насыщенным. Температура, которую при этом показывает термометр, и есть точка росы. По таблице определяют плотность насыщенного водяного пара при данной температуре, т. е. абсолютную влажность воздуха.



Рис. 40. Психрометр

Гигрометр психрометрический (чаще его называют *психрометр*) состоит из двух термометров — сухого и влажного (рис. 40). Резервуар влажного термометра обёрнут куском ткани, конец которой опущен в воду. Сухой термометр показывает температуру окружающего

воздуха, а влажный — температуру влажной ткани. Показания термометров будут разными. Вода с ткани испаряется, влажный термометр охлаждается. Чем больше относительная влажность воздуха, тем менее интенсивно происходит процесс испарения и тем меньше разность показаний термометров.

Зная температуру сухого термометра и разность значений температуры сухого и влажного термометров, можно определить относительную влажность воздуха по специальной (психрометрической) таблице 6.

Таблица 6. Психрометрическая таблица

Показания сухого термометра, °С	Разность показаний сухого и влажного термометров, °С										
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	Относительная влажность, %										
6	100	86	73	60	47	35	23	10	–	–	–
8	100	87	75	63	51	40	28	18	7	–	–
10	100	88	76	65	54	44	34	24	14	5	–
12	100	89	78	68	57	48	38	29	20	11	–
14	100	89	79	70	60	51	42	34	25	17	9
16	100	90	81	71	62	54	46	37	30	22	15
18	100	91	82	73	65	56	49	41	34	27	20
20	100	91	83	74	66	59	51	44	37	30	24
22	100	92	83	76	68	61	54	47	40	34	28
24	100	92	84	77	69	62	56	49	43	37	31
26	100	92	85	78	71	64	58	51	46	40	34

1. Что показывает абсолютная влажность воздуха? **2.** Что называют относительной влажностью воздуха? **3.** Что называют точкой росы? **4.** С помощью каких приборов измеряют влажность воздуха? **5.** Как определить точку росы с помощью конденсационного гигрометра? **6.** Как, используя психрометр, можно узнать относительную влажность воздуха?

1. Один фантазёр утверждал, что он изобрёл жидкость, которая испаряется тем быстрее, чем ниже её температура. Может ли быть такое?

2*. Можно ли утверждать, что влажный термометр психрометра охлаждается до точки росы? Аргументируйте свой ответ, используя таблицы 5 и 6.

УПРАЖНЕНИЕ 17

1. Увеличивается или уменьшается относительная влажность, если температура воздуха понижается?
2. Что можно сказать об изменении температуры воздуха ночью, если утром выпала роса?
3. В каких местах — сухих или более влажных (вблизи водоёма) — чаще всего наблюдаются туманы? Почему?
4. Почему на берегу моря выстиранное бельё сохнет дольше, чем вдали от него?
5. Если на мокрую рубашку в комнате направить поток воздуха от вентилятора, то она высохнет намного быстрее. Объясните механизм этого явления. Поможет ли вентилятор ускорить процесс сушки белья, если относительная влажность воздуха будет 100% ?
6. Какова относительная влажность воздуха, если при температуре 20 °С абсолютная влажность воздуха равна $11{,}8 \cdot 10^{-3} \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$?
7. Чему равна относительная влажность в комнате при температуре 20 °С, если показания влажного термометра психрометра равны: а) 16 °С; б) 20 °С; в) 19 °С?

ЗАДАНИЕ 13

1. Изготовьте волосной гигрометр (гигроскоп). Для этого закрепите на листе картона или фанеры с помощью булавки лёгкую стрелку из тонкого картона, как показано на рисунке 41. Прикрепите с помощью клея или пластилина волос длиной приблизительно 10 см, предварительно протёртый одеколоном для обезжиривания, к стрелке в точке A и к картону в точке B (см. рис. 41). Шкала должна быть нарисована заранее. Ваш гигроскоп готов. Проверьте его действие.

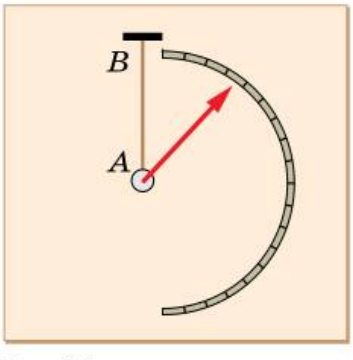


Рис. 41

Вертикально поставьте прибор над батареей отопления около окна. Отметьте положение стрелки. Теперь включите в ванной горячий душ и через несколько минут (лучше это сделать, когда запотеет зеркало в ванной) внесите туда изготовленный вами прибор. Отметьте перемещение стрелки.

2. Придумайте несколько задач, используя данные таблиц 5 и 6. Обменяйтесь с товарищем условиями задач и решите их.

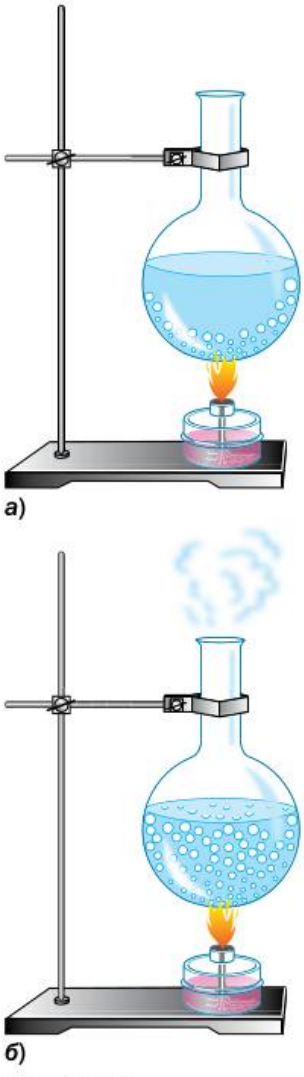


Рис. 42. Нагревание и кипение воды в колбе

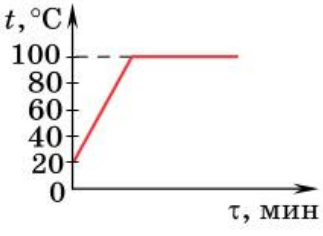


Рис. 43. График нагревания и кипения воды

Рассмотрим процессы, которые будут происходить при нагревании воды в сосуде (рис. 42). Через некоторое время после включения спиртовки на дне и стенках сосуда образуются пузырьки (рис. 42, *а*). Это пузырьки воздуха, который всегда растворён в воде. Кроме воздуха, в пузырьках находится насыщенный пар, который образуется при испарении воды внутрь этих пузырьков.

С увеличением температуры увеличивается давление насыщенного пара внутри пузырьков. Когда давление в пузырьках становится чуть больше внешнего давления, которое складывается из атмосферного давления и давления столба жидкости, пузырьки начинают быстро раздуваться. Действующая на них архимедова сила увеличивается и в некоторый момент становится настолько большой, что пузырьки отрываются от дна сосуда и всплывают.

Так как вода в верхних слоях ещё не прогрелась, пар в пузырьках остывает и конденсируется. В результате они резко сжимаются (схлопываются), и мы слышим, как вода шумит.

Когда вода прогревается по всему объёму, поднимающиеся пузырьки уже не уменьшаются в размерах. Достигая поверхности воды, они лопаются, выбрасывая наружу водяной пар (рис. 42, *б*). Таким образом происходит кипение.

Кипение — это процесс парообразования, происходящий по всему объёму жидкости.

График зависимости температуры воды при её нагревании и кипении от времени представлен на рисунке 43. Во время кипения температура воды не изменяется и при нормальном атмосферном давлении равна 100 °C.

Кипение происходит при такой температуре, при которой давление насыщенного па-

ра равно давлению внутри жидкости. Температура жидкости во время кипения не меняется.

Температуру, при которой жидкость кипит, называют температурой кипения.

У разных веществ температура кипения разная. В таблице 7 приведена температура кипения некоторых веществ при нормальном атмосферном давлении.

Таблица 7. Температура кипения некоторых веществ (при нормальном атмосферном давлении)

Вещество	$t_{кип}$, °C	Вещество	$t_{кип}$, °C
Водород	−253	Вода	100
Азот	−196	Ртуть	357
Кислород	−183	Свинец	1740
Эфир	35	Медь	2567
Спирт	78	Железо	2750



Кипение воды

Летучие жидкости — эфир, спирт — кипят при сравнительно низких температурах. Это объясняется малыми силами взаимодействия между молекулами. Поэтому нужно лишь небольшое нагревание, чтобы давление паров летучих жидкостей достигло атмосферного. Давление же паров ртути становится равным атмосферному лишь при температуре 357 °C. При комнатной температуре оно мало.

Температура кипения зависит от атмосферного давления. При увеличении атмосферного давления температура кипения повышается, при уменьшении — понижается. Это следует из условия кипения. Чем больше атмосферное давление, тем при более высокой температу-

ре давление внутри пузырьков с ним сравняется.

В высоких горах, где атмосферное давление ниже, чем у подножия, температура кипения воды заметно понижается. Так, на горе Эльбрус (высота примерно 5,6 км) вода кипит при температуре 82 °С.

Если термометр во время опыта поместить над поверхностью кипящей воды, то окажется, что температура пара равна также 100 °С. Это означает, что кинетическая энергия молекул при кипении остаётся неизменной. На что же расходуется подводимая к жидкости энергия?

Энергия идёт на увеличение потенциальной энергии молекул. Ведь для того, чтобы превратить жидкость в пар, нужно совершить работу по удалению притягивающихся друг к другу молекул на значительные расстояния.

Таким образом, внутренняя энергия пара больше внутренней энергии воды, из которой он образовался. Этим объясняется тот факт, что ожог паром бывает более тяжёлым, чем кипятком при температуре 100 °С.

1. Объясните на основе МКТ, как происходит процесс кипения. **2.** Какой процесс называют кипением? **3.** Что называют температурой кипения жидкости? **4.** Сформулируйте условие кипения.

1. Охарактеризуйте каждый участок графика на рисунке 43.

2. В кондитерском производстве раствор сахара надо выпаривать при температуре ниже 100 °С (иначе он пригорает). Как этого достичь?

УПРАЖНЕНИЕ 18

1. Из чайника выкипела почти вся вода. В некоторый момент времени массы воды и пара в нём оказались равными. Их температура 100 °С. Можно ли утверждать, что внутренняя энергия пара и внутренняя энергия воды одинаковы?
2. Где кипящая вода горячее — на уровне моря, на высокой горе или в глубокой шахте? Ответ обоснуйте.
3. В закрытом сосуде спирт закипел при температуре 50 °С. Что можно сказать о давлении в сосуде?

4. На одной координатной плоскости изобразите примерные графики зависимости температуры от времени при нагревании и кипении воды и спирта одинаковой массы. Жидкости нагреваются на одинаковых горелках.

5. В кастрюле кипит вода и варится картофель. Чтобы ускорить варку, девочка увеличила подачу газа в горелку в 4 раза. Быстрее ли сварится картофель?

6*. Ртуть кипит при температуре 357 °С, однако ртутные термометры применяют для измерения и более высоких температур. Почему это возможно?

Это любопытно...

Примеры использования кипения

Различие температур кипения жидкостей используют для разделения их путём дробной перегонки. Например, нефть представляет собой смесь веществ. При нагревании нефти начинается последовательное кипение её составных частей. Пары́ кипящего вещества направляются в холодильник, где они конденсируются и собираются в отдельных резервуарах. Там их подвергают последующей очистке. При нагревании раньше всего испаряются наиболее ценные, летучие части нефти (эфир, бензин). Затем получают лигроин, керосин, лёгкие соляровые масла, мазут.

Зависимость температуры кипения жидкости от давления используют в паровых котлах (автоклавах). Температура кипения воды в них достигает 135 °С. Автоклавы применяются для стерилизации горячим паром медицинских инструментов и перевязочных материалов, дезинфекции белья, при производстве стеарина, глюкозы и др. Мощные котлы дают пар высокого давления и температуры для работы паровых турбин.

Для приготовления пищи в быту широко используется скороварка. В её крышке находится клапан с грузом, который удерживает пар в сосуде. Крышка плотно крепится на корпусе скороварки. При нагревании повышаются давление и температура пара. Температура кипения воды становится выше 100 °С, что уменьшает время приготовления пищи. Когда давление внутри скороварки достигает определённого значения, клапан поднимается и часть пара выпускается, предотвращая тем самым её «взрыв».



В настоящее время в промышленности кислород получают из воздуха. Предложите способ, как это можно сделать.

§ 22 УДЕЛЬНАЯ ТЕПЛОТА ПАРООБРАЗОВАНИЯ

Для того чтобы при температуре кипения превратить жидкость в пар, ей необходимо сообщить некоторое количество теплоты. Как вы уже знаете, подводимая энергия расходуется на увеличение потенциальной энергии молекул.

Следует ожидать, что количество теплоты будет тем больше, чем больше масса жидкости. Кроме того, можно предположить, что для разных жидкостей одной и той же массы это количество теплоты будет разным. Дело в том, что силы взаимного притяжения между молекулами разных жидкостей различны и для удаления молекул друг от друга требуется совершить разную работу.

Опыты подтверждают эти предположения и показывают, что количество теплоты, необходимое для превращения жидкости в пар при температуре кипения, прямо пропорционально массе жидкости и зависит от рода жидкости.

Количество теплоты, необходимое для превращения жидкости массой 1 кг в пар при температуре кипения, называют удельной теплотой парообразования.

Удельную теплоту парообразования обозначают буквой L и вычисляют по формуле

$$L = \frac{Q}{m},$$

где Q — количество теплоты, полученное жидкостью, m — масса образовавшегося пара. Единица удельной теплоты парообразования — *джоуль на килограмм* $\left(\frac{\text{Дж}}{\text{кг}}\right)$.

Удельная теплота парообразования показывает, на сколько увеличивается внутренняя энергия жидкости массой 1 кг *при переходе её в пар при температуре кипения.*

Значения удельной теплоты парообразования определяются экспериментально. В таблице 8 приведены значения удельной теплоты парообразования для некоторых жидкостей при температуре кипения и нормальном атмосферном давлении.

Таблица 8. Удельная теплота парообразования некоторых веществ (при температуре кипения и нормальном атмосферном давлении)

Вещество	L, $10^6 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$	Вещество	L, $10^6 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$
Вода	2,3	Эфир	0,4
Аммиак (жидкий)	1,4	Ртуть	0,3
Спирт	0,9	Воздух (жидкий)	0,2

Например, из таблицы видно, что удельная теплота парообразования воды $2{,}3 \cdot 10^6 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$. Это означает, что для превращения 1 кг воды в пар при температуре кипения (100 °С) необходимо затратить $2{,}3 \cdot 10^6$ Дж энергии. Если начальная температура воды ниже 100 °С, то потребуется больше энергии.

$$Q = Lm$$

Из формулы для определения удельной теплоты парообразования получим формулу для расчёта количества теплоты, необходимого для обращения в пар жидкости массой m:

$$Q = Lm.$$

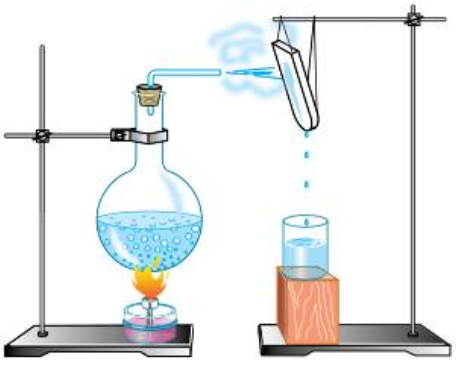


Рис. 44. Конденсация пара

Водяной пар, соприкасаясь с холодным предметом, конденсируется (рис. 44). При этом выделяется энергия. Точные опыты показывают, что *пар, конденсируясь, отдаёт то количество теплоты, которое пошло на его образование.*

Количество теплоты, выделяющееся при конденсации пара массой m, также определяют по формуле: $Q = Lm$.

Удельная теплота парообразования показывает не только, какое количество теплоты поглощается жидкостью массой 1 кг при переходе её в пар, но и какое выделяется при превращении пара массой 1 кг в жидкость при температуре кипения.

Пример. Какое количество теплоты необходимо затратить, чтобы 3 кг эфира, взятого при температуре 20 °С, обратить в пар?

Запишем условие задачи и решим её.

Дано:

$m = 3$ кг

$t_1 = 20$ °С

$t_2 = 35$ °С

$c = 2350 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{°С}}$

$L = 0{,}4 \cdot 10^6 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$

Q — ?

Решение:

Для нагревания эфира от 20 до 35 °С (температуры кипения) потребуется количество теплоты:

$$Q_1 = cm(t_2 - t_1),$$

$$Q_1 = 2350 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{°С}} \cdot 3 \text{ кг} \times$$

$$\times (35 \text{ °С} - 20 \text{ °С}) =$$

$$= 105\,750 \text{ Дж} \approx 0{,}1 \cdot 10^6 \text{ Дж}.$$

Количество теплоты, необходимое для превращения эфира в пар при температуре кипения:

$$Q_2 = Lm,$$

$$Q_2 = 0{,}4 \cdot 10^6 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}} \cdot 3 \text{ кг} = 1{,}2 \cdot 10^6 \text{ Дж}.$$

Общее количество теплоты:

$$Q = Q_1 + Q_2,$$

$$Q = 0{,}1 \cdot 10^6 \text{ Дж} + 1{,}2 \cdot 10^6 \text{ Дж} = 1{,}3 \cdot 10^6 \text{ Дж}.$$

Ответ: $Q = 1{,}3 \cdot 10^6$ Дж.

1. На что расходуется количество теплоты, подводимое к жидкости при кипении? **2.** Что называют удельной теплотой парообразования? **3.** Какова единица удельной теплоты парообразования? **4.** Опишите опыт, который показывает, что при конденсации пара выделяется энергия. **5.** Как рассчитать количество теплоты, необходимое для превращения жидкости в пар при температуре кипения?

1. На сколько внутренняя энергия паров эфира при температуре 35 °С и нормальном атмосферном давлении больше внутренней энергии жидкого эфира той же массы при той же температуре?

2. На рисунке 45 приведён график зависимости температуры воды от времени её нагревания. Каким процессам соответствуют участки графика *AB*, *BC*, *CD*, *DE*, *EF*?

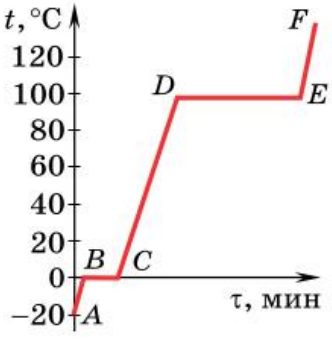


Рис. 45

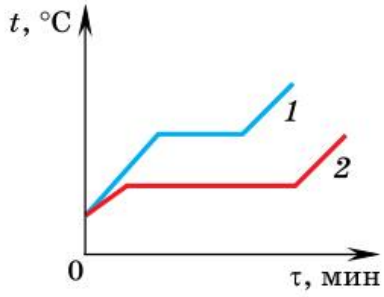


Рис. 46

3. На рисунке 46 приведены графики зависимости температуры от времени для двух жидкостей одинаковой массы, нагреваемых на горелках одинаковой мощности. Удельная теплота парообразования какой жидкости больше?

УПРАЖНЕНИЕ 19

1. Почему внутренняя энергия водяного пара при температуре 100 °С больше, чем внутренняя энергия воды той же массы при той же температуре?

2. Какое количество теплоты необходимо затратить, чтобы 2 кг спирта, взятого при температуре 20 °С, обратить в пар при температуре кипения?

3. Назовите процессы, которые надо осуществить, чтобы: а) воду, взятую при температуре 20 °С, превратить в пар, имеющий температуру 120 °С; б) эфир, взятый при температуре 125 °С, охладить до температуры 20 °С. (Атмосферное давление нормальное.)

Для каждого случая постройте примерный график зависимости температуры вещества от количества теплоты, полученного от нагревателя или отданного окружающим телам.

4. В кастрюле бурно кипит вода. В неё помещают меньшую кастрюлю с водой, нагретой до температуры 100 °С. Закипит ли вода в малой кастрюле?

5*. В парниковых хозяйствах для уничтожения личинок вредителей грунт обрабатывают горячим водяным паром. Определите расход пара на кубометр грунта (масса пара, необходимая для нагревания 1 м^3 грунта), если грунт надо нагреть от 15 до 95 °С. Плотность грунта в среднем равна 1,8 $\frac{\text{г}}{\text{см}^3}$, средняя удельная теплоёмкость грунта 800 $\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{С}}$, температура используемого пара 100 °С.

6*. В сосуд с водой, взятой при температуре 0 °С, впустили водяной пар массой 1 кг при температуре 100 °С. Спустя некоторое время в сосуде установилась температура 20 °С. Какова первоначальная масса воды в сосуде? Теплообмен с окружающей средой не происходит.

ЗАДАНИЕ 14

- Придумайте несколько задач, используя данные таблиц 7 и 8. Обменяйтесь с товарищем условиями задач и решите их.

§ 23 РАБОТА ГАЗА И ПАРА ПРИ РАСШИРЕНИИ

Человек для облегчения своего труда изобрёл различные механизмы и машины. Среди них большое значение имеют двигатели. На практике широкое распространение получили тепловые двигатели.

Проделаем опыт. Пробирку с водой закроем пробкой и укрепим в специальном держателе (рис. 47). Будем нагревать воду. Когда она закипит, образовавшийся пар выбьет пробку, совершив при этом работу.

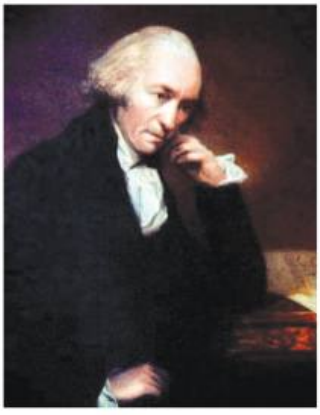


Рис. 47. Работа расширяющегося водяного пара вызывает движение пробки

Рассмотрим энергетические преобразования, которые произошли. При сгорании спирта происходит выделение энергии. Часть её передаётся воде. В результате вода нагревается всё сильнее, начинается её кипение. Образовавшийся над водой пар, расширяясь, совершает механическую работу. При этом пробке сообщается кинетическая энергия.

Можно представить рассматриваемый процесс в виде следующей схемы:

сгорание топлива ⟶ нагревание холодной воды до кипения и образования пара ⟶ совершение механической работы.



ДЖЕЙМС УАТТ

(1736—1819)

Шотландский инженер-изобретатель, усовершенствовал универсальную паровую машину

Таким образом, внутренняя энергия топлива сначала перешла во внутреннюю энергию пара, затем пар, расширяясь, совершил механическую работу и часть его внутренней энергии превратилась в кинетическую энергию пробки.

Важно отметить, что при этом:

1) часть энергии теряется на нагревание окружающей среды;

2) для передачи энергии от нагревателя воде необходимо, чтобы температура воды была ниже температуры нагревателя;

3) в рассмотренном опыте газ может совершить работу лишь один раз.

Для того чтобы газ мог совершать работу многократно, систему необходимо возвращать в первоначальное состояние. Если пробирку заменить металлическим цилиндром, а пробку — поршнем, хорошо пригнанным к стенкам цилиндра, то получим простейшую модель *теплового двигателя*.



Тепловой двигатель Дж. Уатта

Тепловым двигателем называют машину, в которой внутренняя энергия топлива превращается в механическую энергию.

Такой двигатель был изобретён в конце XVII в. В России первый поршневой двигатель был создан в 1765 г. ***Иваном Ивановичем Ползуновым*** (1728—1766). В дальнейшем тепловой двигатель был усовершенствован ***Джеймсом Уаттом***.

1. Как экспериментально подтвердить возможность совершения механической работы нагретым паром? **2.** Какие превращения энергии происходят в опыте, изображённом на рисунке 47? **3.** Какие двигатели называют тепловыми?

1. Какое преобразование энергии лежит в основе работы тепловых двигателей?

2. Можно ли механическую энергию полностью превратить во внутреннюю?

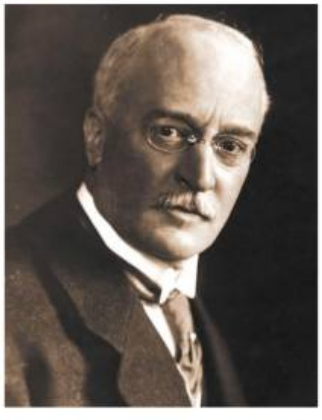
УПРАЖНЕНИЕ 20

1. Керосин какой массы надо сжечь, чтобы выпарить 100 г воды, взятой при температуре 50 °С?

2. На какую высоту можно поднять груз массой 100 кг за счёт энергии, выделенной при сгорании 10 г керосина?

§ 24 ДВИГАТЕЛЬ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ

Двигатель, в котором сжигание топлива происходит внутри цилиндра, где образовавшийся газ расширяется, называют ***двигателем внутреннего сгорания***. К таким двигателям относятся бензиновые двигатели и дизели. Двигатели внутреннего сгорания широко используются на наземном, воздушном и водном транспорте, в сельскохозяйственной и строительной технике, электрогенераторах и др.



РУДОЛЬФ ДИЗЕЛЬ

(1858—1913)

Немецкий инженер, создатель используемого и сегодня двигателя внутреннего сгорания с воспламенением топлива от воздействия разогретого при сжатии воздуха

Исторически первыми надёжно работающими бензиновыми двигателями стали карбюраторные двигатели, появившиеся в конце XIX в. Горючая смесь в таких двигателях готовится вне цилиндра в специальном устройстве — *карбюраторе* — путём распыления бензина в потоке воздуха. В дизельных двигателях горючая смесь готовится в самом цилиндре. Первый дизельный двигатель был построен немецким инженером ***Рудольфом Дизелем*** в 1897 г.

Рассмотрим устройство одноцилиндрового четырёхтактного карбюраторного двигателя внутреннего сгорания (рис. 48). Двигатель состоит из цилиндра, в котором перемещается

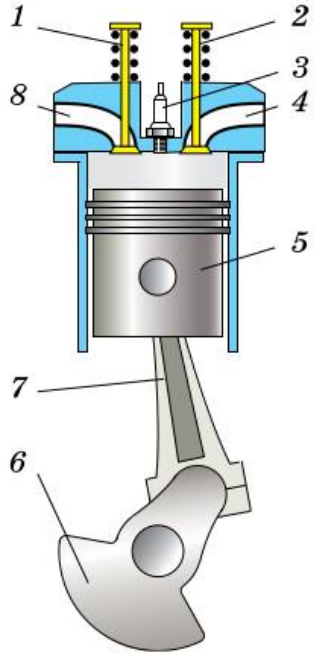


Рис. 48. Двигатель внутреннего сгорания (карбюраторный) в разрезе

поршень *5*. При помощи шатуна *7* поршень соединён с коленчатым валом *6*. В верхней части цилиндра имеются два клапана *1* и *2*. При работе двигателя в нужные моменты клапаны автоматически открываются и закрываются. Через впускной канал *8* в цилиндр из карбюратора поступает горючая смесь, которая воспламеняется с помощью свечи *3*. Через выпускной канал *4* выпускаются отработанные газы.

Рабочим циклом двигателя внутреннего сгорания называют процессы, в результате осуществления которых количество теплоты, выделяющееся при сгорании топлива, превращается в механическую работу.

В четырёхтактном карбюраторном и дизельном двигателях рабочий цикл состоит из четырёх тактов. Каждый такт совершается за пол-оборота коленчатого вала.

Такт *впуска* (рис. 49, *а*). При движении поршня вниз в цилиндре под поршнем давление уменьшается. В результате этого через отверстие, открываемое впускным клапаном *1*, в цилиндр поступает горючая смесь (в карбюраторных двигателях) или чистый воздух (в дизелях). Когда цилиндр заполнится горю-

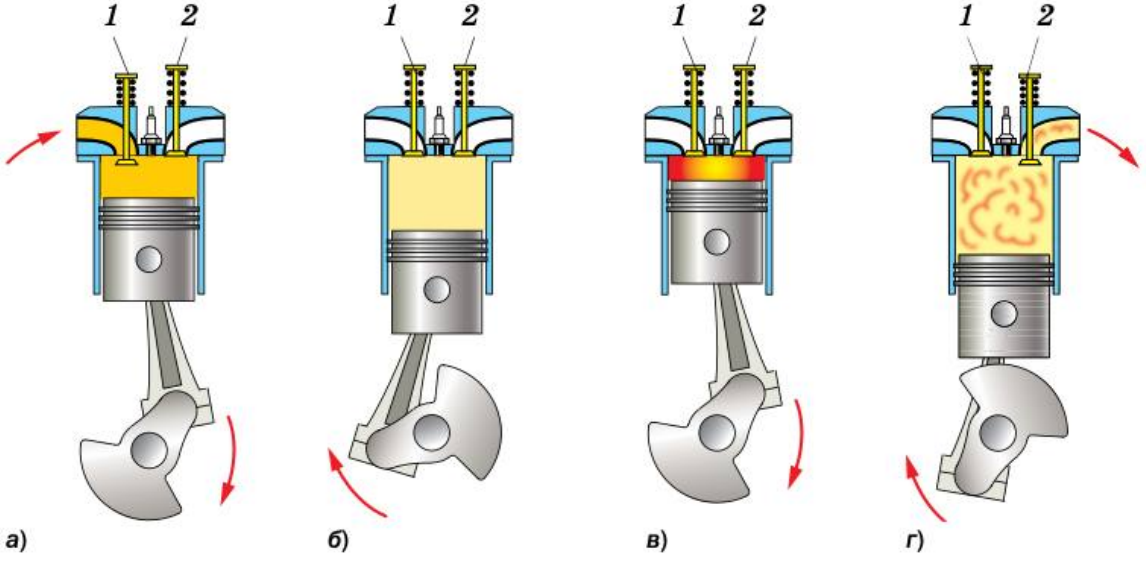


Рис. 49. Циклы работы двигателя внутреннего сгорания (карбюраторного)







Транспортные средства, в которых используется двигатель внутреннего сгорания

чей смесью или воздухом, впускной клапан закрывается.

Такт *сжатия* (рис. 49, *б*). Поршень движется вверх. Оба клапана (впускной и выпускной) закрыты. В результате сжатия температура рабочей смеси достигает 300—350 °С при давлении $(6—10) \cdot 10^5$ Па, а температура воздуха в дизелях — 500—600 °С при давлении $(30—36) \cdot 10^5$ Па. К моменту приближения поршня к верхней точке между электродами свечи зажигания (в карбюраторных двигателях) проскакивает искра, и смесь загорается; в дизельных двигателях производится впрыск топлива под давлением $(120—125) \cdot 10^5$ Па. Оно быстро перемешивается с воздухом, и полученная смесь, самовоспламенившись, быстро сгорает.

Такт *расширения* (*рабочий ход*) (рис. 49, *в*). Оба клапана по-прежнему закрыты. При сгорании рабочей смеси выделяется большое количество теплоты, в результате чего происходит расширение газов, сопровождающееся резким повышением температуры (до 1800—2000 °С в карбюраторных и 1600—1800 °С в дизельных двигателях) и давления (до $(20—35) \cdot 10^5$ Па в карбюраторных и $(45—80) \cdot 10^5$ Па в дизельных двигателях). Расширяясь, газы толкают поршень и вместе с ним коленчатый вал, совершая механическую работу. При этом газы охлаждаются, так как часть их внутренней энергии превращается в механическую энергию поршня. Под действием силы давления газов поршень перемещается вниз.

Такт *выпуска* (рис. 49, *г*). Поршень движется вверх. Открывается выпускной клапан, и начинается выпуск отработанных газов. Давление газов в цилиндре в течение всего такта находится в пределах $(1{,}05—1{,}15) \cdot 10^5$ Па. Отработанные газы вытесняются поршнем в атмосферу. После этого цикл повторяется.

Обычно в автомобилях используют двигатели из четырёх цилиндров (рис. 50), в каждом из которых поочерёдно происходит рабочий

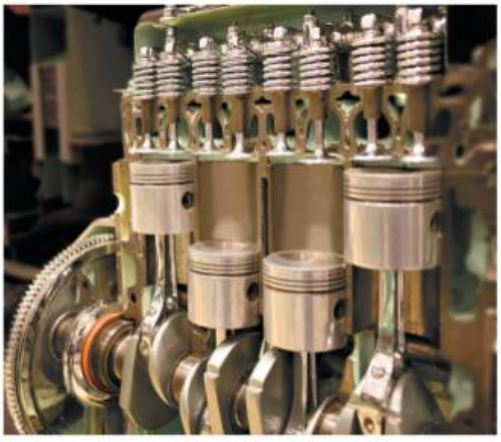


Рис. 50. Четырёхцилиндровый карбюраторный двигатель

ход. Поршни всех цилиндров вращают один общий коленчатый вал. Существуют двигатели, имеющие 6, 8 и даже более цилиндров. В таких двигателях обеспечивается бóльшая равномерность вращения вала, и они являются более мощными.

В современных бензиновых автомобильных двигателях карбюраторные системы подачи топлива уступили место более совершенным инжекторным системам. При этом подача топлива в цилиндры производится путём впрыска с помощью специальных форсунок, а дозирование топлива осуществляется электронным блоком управления.

Дизели из-за их массивности долгое время использовали в основном на судах, тракторах, грузовых автомобилях, автобусах. В настоящее время созданы компактные дизельные двигатели и для легковых автомобилей. Сегодня в России около 5% парка легковых автомобилей оснащены дизельными двигателями. По сравнению с бензиновыми двигателями в выхлопе дизелей, как правило, меньше угарного газа, но больше сажи и оксидов азота.

1. Какой двигатель называют двигателем внутреннего сгорания? **2.** Пользуясь моделью простейшего двигателя внутреннего сгорания (см. рис. 48), расскажите, из каких основных частей он состоит. **3.** За сколько тактов происходит один рабочий цикл двигателя? Сколько оборотов делает при этом коленчатый вал двигателя? **4.** Опишите процессы, происходящие в двигателе внутреннего сгорания в течение каждого из четырёх тактов. Как называют эти такты? **5.** Каковы различия в работе карбюраторного и дизельного двигателей?

1. Почему в четырёхтактном двигателе внутреннего сгорания лишь один такт называют рабочим ходом?

2. Какие энергетические преобразования происходят в процессе такта расширения?

3. Зачем на ось коленчатого вала двигателя насаживают маховик (тяжёлый сплошной диск)?

4. Во время образования горючей смеси в карбюраторе температура понижается. Какова причина?

§ 25 ПАРОВАЯ ТУРБИНА

Паровые турбины (от лат. *turbo* — вихрь), наряду с двигателями внутреннего сгорания, являются самыми распространёнными типами тепловых двигателей. В наши дни паровые турбины стали основным агрегатом тепловых и атомных электростанций. Они также используются на морских и речных судах в качестве двигателей.

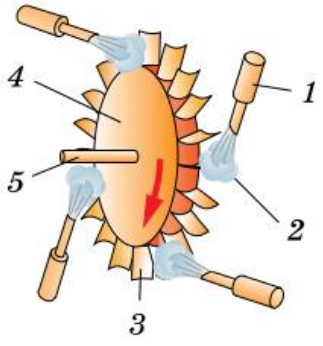


Рис. 51. Схема паровой турбины

В паровой турбине сначала внутренняя энергия нагретого пара переходит в кинетическую энергию потока пара, а затем в кинетическую энергию вращения ротора (вращающейся части) турбины.

Рассмотрим устройство и принцип работы паровой турбины (рис. 51). Нагретый в котле водяной пар поступает в трубки — сопла *1*. Форма трубок такова, что скорость пара в них увеличивается, а его температура при движении по трубке уменьшается. Таким образом, кинетическая энергия потока пара увеличивается за счёт его внутренней энергии.



Ротор паровой турбины

Поток пара *2* направляется на лопатки *3*, закреплённые по ободу диска *4*. Диск насажен на вал *5*. Вал и диск с лопатками образуют ротор турбины. Быстро движущийся пар оказывает давление на лопатки и заставляет ротор вращаться. Так кинетическая энергия потока пара превращается в кинетическую энергию вращения ротора турбины.

На электростанциях с турбиной соединён генератор электрического тока. Для выработки электрической энергии необходимо, чтобы ротор генератора вращался с частотой 3000 оборотов в минуту. Именно такую частоту могут обеспечить паровые турбины. В зависимости от назначения мощность паровых турбин может быть разной: от нескольких киловатт до 1 200 000 кВт.

Над усовершенствованием конструкции паровой турбины работали в разное время учё-

ные и инженеры многих стран. Так, шведский инженер ***Густав де Лаваль*** (1845—1913) в 1890 г. предложил конструкцию сопла́, позволяющего получать сверхзвуковые скорости пара. Это сопло́ используется и в настоящее время и называется сопло́ Лаваля. А английский механик ***Чарлз Парсонс*** (1854—1931) в 1884 г. запатентовал многоступенчатую турбину. В настоящее время турбины Парсонса являются основными двигателями электростанций.

1. Какие превращения энергии происходят в паровой турбине? **2.** В чём различие в устройстве турбин и поршневых машин? **3.** Из каких частей состоит паровая турбина и как она работает? **4.** Где используются паровые турбины?

Это любопытно...

Из истории тепловых двигателей

В III в. до нашей эры греческий математик и механик ***Архимед*** построил пушку, которая стреляла с помощью пара. Рисунки пушки Архимеда и её описание были найдены спустя 18 столетий в рукописях ***Леонардо да Винчи***. Как же стреляла эта пушка? Один конец ствола сильно разогревали на огне. Затем в нагретую часть ствола наливали воду. Она мгновенно испарялась и превращалась в пар. Пар, расширяясь, с силой и грохотом выбрасывал ядро. Ствол пушки представлял собой цилиндр, по которому, как поршень, скользило ядро.

Тремя столетиями позже ***Герон Александрийский*** описал прибор, который сейчас называют героновым шаром (рис. 52). Он представляет собой полый железный шар, закреплённый так, что может вращаться вокруг горизонтальной оси. Из закрытого котла с кипящей водой пар по трубке поступает в шар и через изогнутые трубки вырывается наружу. При этом шар приходит во вращение. Геронов шар — прообраз реактивных двигателей.



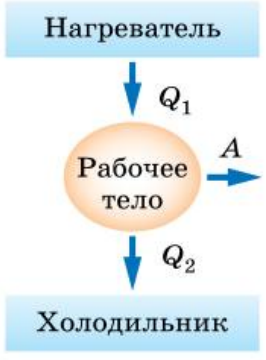
Рис. 52. Геронов шар

Через 16 столетий, в 1629 г., итальянский учёный ***Джованни Бранка*** описал двигатель, в котором использовалась энергия пара в другом виде. Это было колесо с лопатками, в которое с силой ударяла струя пара, благодаря чему колесо начинало вращаться. Таким образом, по существу, была изобретена паровая турбина.

Какие превращения энергии происходят в пушке Архимеда и героновом шаре?

§ 26 КПД ТЕПЛОВОГО ДВИГАТЕЛЯ

В предыдущих параграфах были рассмотрены устройство и принцип работы двигателя внутреннего сгорания и паровой турбины. В каждом из этих двигателей энергия, выделяющаяся при сгорании топлива, превращается в механическую работу. Однако часть энергии неизбежно теряется и не может быть использована полезно. Разберёмся, с чем связаны эти потери и познакомимся с количественной характеристикой эффективности преобразования энергии тепловым двигателем.



Принципиальная схема теплового двигателя

В любом тепловом двигателе можно выделить три части: *нагреватель*, *рабочее тело*, *холодильник*. Рабочим телом обычно служит пар или газ. В нагревателе при сжигании топлива выделяется энергия, которая идёт на нагревание рабочего тела. Рабочее тело, расширяясь, совершает работу. Однако нам требуется не однократное расширение, а циклическая работа двигателя. Поэтому рабочее тело надо вернуть в исходное состояние, т. е. сжать его. При этом работа, затраченная на сжатие, должна быть меньше работы, совершённой при расширении. Для этого сжатие осуществляют, приведя систему в контакт с холодильником (телом с более низкой температурой). Холодильником может служить окружающая среда.

Согласно закону сохранения энергии механическая работа, совершаемая двигателем, не может быть больше энергии, полученной от нагревателя. Часть энергии рабочее тело отдаёт холодильнику. Поэтому *совершаемая работа меньше количества теплоты, полученного от нагревателя.*

Обозначим количество теплоты, полученное рабочим телом от нагревателя, Q_1, количество теплоты, отданное рабочим телом холодильнику, Q_2, работу, совершённую двигателем, A. Тогда $A = Q_1 - Q_2$. В действительности совершённая работа ещё меньше. Это связано с нагреванием деталей двигателя, наличием трения между ними и т. д.

Отношение совершённой двигателем работы к количеству теплоты, выделившемуся при сгорании топлива, называют коэффициентом полезного действия теплового двигателя (КПД).

$$\eta = \frac{A}{Q_1}$$

Коэффициент полезного действия обозначают греческой буквой η («эта»).

КПД теплового двигателя рассчитывают по формуле:

$$\eta = \frac{A}{Q_1}.$$

$$\eta = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} \cdot 100\%$$

Так как некоторое количество теплоты рабочее тело передаёт холодильнику, то $A < Q_1$ и коэффициент полезного действия всегда меньше единицы. Часто его выражают в процентах, тогда говорят, что КПД меньше 100%.

$$\eta = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} \cdot 100\%.$$

Например, КПД современных турбоагрегатов может достигать 40—50%, бензинового двигателя составляет 20—25%, дизеля — 35%.



1. Почему в тепловых двигателях только часть энергии топлива идёт на совершение механической работы? **2.** Что называют КПД теплового двигателя? **3.** Почему КПД двигателя меньше 100%?



1. Можно ли внутреннюю энергию полностью превратить в механическую?

2. Приведите примеры известных вам тепловых двигателей. Что служит в этих двигателях нагревателем; холодильником? Что используется в качестве рабочего тела?

fanstelia.ru

УПРАЖНЕНИЕ 21

1. Количество теплоты, полученное рабочим телом теплового двигателя от нагревателя, равно 35 кДж. За то же время холодильнику было передано 75% полученной энергии. Найдите КПД двигателя и совершённую им работу.
2. Тепловой двигатель с КПД 12% совершает за цикл работу 150 Дж. Определите количество теплоты, отданное за цикл холодильнику.
3. Количество теплоты, отданное в атмосферу тепловым двигателем за один цикл, равно 15 кДж. КПД двигателя 15%. Определите количество теплоты, полученное за цикл от нагревателя.

Это любопытно...

Загрязнение окружающей среды

Ускоренное развитие техники выдвинуло на первый план проблему влияния человека на среду его обитания. От правильного и своевременного решения вопроса охраны окружающей среды во многом зависят здоровье и благосостояние людей, живущих на Земле сейчас, и их потомков.

Научно-техническая революция и её достижения способствуют развитию общества и каждой личности. А это, в свою очередь, открывает широкий простор для дальнейшего развития промышленности, транспорта и других областей экономики. Но этот процесс имеет свои отрицательные стороны.

Во многих городах мира существенно загрязняют атмосферу выбросы вредных веществ двигателями автомобилей. Например, вблизи основных магистралей концентрация ядовитого угарного газа (CO) превышает допустимую в 2—10 раз, оксидов азота — почти в 16 раз. Это приводит к тому, что люди, живущие в домах, расположенных в 10—50 м от проезжей части крупных дорог, в несколько раз чаще болеют онкологическими заболеваниями и болезнями дыхательной системы.

К экологическим катастрофам ведёт и утечка топлива из транспортных средств. Известны многочисленные аварии, происходящие с танкерами ёмкостью 100 т и более, в результате которых в Мировой океан попадает большое количество нефтепродуктов. Содержание нефтепродуктов, например, в Чёрном море в 2 раза выше нормы. Такое загрязнение приводит к тому, что гибнут ценные породы рыб, умирает растительность побережья, что пагубно отражается на здоровье людей.

Вред окружающей среде наносят и существующие тепловые электростанции. Их эксплуатация связана со значительными выбросами в окружающую среду продуктов сгорания органического топлива (золы, оксидов серы, окиси углерода, сажи, углеводородов и азота).

Меры по борьбе с загрязнением окружающей среды

Человечество стоит перед проблемой сохранения биосферы и окружающей среды. Для нормальной жизни надо иметь чистую воду, чистый воздух, здоровую пищу и соседство всего живого: растений, птиц, зверей. Без этого человеческая жизнь немыслима. Естественно, что будущее человечества — за прогрессом. Но этот прогресс должен осуществляться не за счёт природы. Приемлемы только природосберегающие технологии. Рассмотрим некоторые из них, направленные на уменьшение загрязнения окружающей среды выбросами автомобильных двигателей.

Большое преимущество даёт применение газового топлива вместо бензина: в 2—3 раза снижается расход топлива, резко уменьшается токсичность отработанных газов, добыча газа требует меньших трудовых и материальных затрат, при его использовании увеличивается срок службы двигателя, свечей зажигания. Перспективными в экологическом плане являются двигатели, работающие на водороде. Высокая теплотворная способность водорода, отсутствие вредных выбросов (при сгорании образуется лишь водяной пар) делают водород перспективным и экологически самым чистым видом топлива. Большое будущее и за электромобилями, которые уже появились на дорогах во многих странах.

Подводя итог всему сказанному, можно сделать следующий вывод. Если раньше природа могла самовосстанавливаться, то в эпоху научно-технических революций такое самовосстановление невозможно. Человек должен помогать природе восстанавливать её ресурсы.

ИТОГИ ГЛАВЫ

Вы узнали, что характеризует температура и как её измерить, что такое количество теплоты и от чего оно зависит. Понимаете, что такое внутренняя энергия и как её изменить, от чего зависит влажность воздуха, чем отличается насыщенный пар от ненасыщенного.

Можете применить закон сохранения энергии к тепловым процессам, объяснить, чем различаются теплопроводность, конвекция и излучение. Умеете рассчитать количество теплоты, полученное и отданное телом в различ-

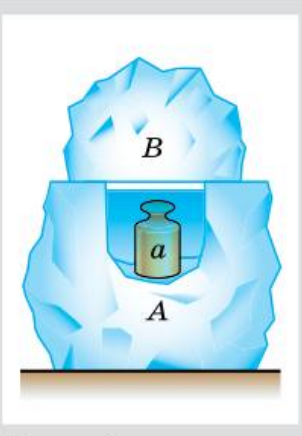
ных тепловых процессах, определить влажность воздуха.

Теперь вы знаете, как работают тепловые двигатели и как охарактеризовать эффективность преобразования энергии в них.

ОБСУДИМ?

Прочитайте описание опыта, взятого из популярного в XIX в. учебника физики известного педагога К. Д. Краевича.

«Если нагретое до некоторой температуры (например, до 50 °С) тело *a* (например, стограммовую медную гирьку) поместить в углубление, сделанное в куске льда *A* и закрываемое другим куском льда *B*, то тело будет охлаждаться, уступая свою теплоту льду и превращая его в воду. Через некоторое время тело примет температуру растаявшей воды и льда, т. е. 0 °С, и дальнейшее таяние прекратится. Вода может быть собрана губкою, и количество образовавшейся воды определено взвешиванием; оно может служить мерою той теплоты, которую тело потеряло, охладившись от 50 до 0 °С, и которую надо ему сообщить, чтобы нагреть его от 0 до 50 °С».



Ледяной калориметр

Ледяной калориметр обладает рядом преимуществ по сравнению с другими калориметрами. Главное из них — это практически полное отсутствие рассеяния энергии в окружающую среду.

Как, используя данный эксперимент, определить удельную теплоёмкость меди?

ПРОЕКТЫ И ИССЛЕДОВАНИЯ

1. «Ледяной калориметр» (возможная форма: презентация, опыт, макет).
2. «Опыт Франклина по изучению излучения и поглощения энергии сукном разного цвета» (возможная форма: презентация, опыт, реферат).
3. «Моя умная теплица» (возможная форма: презентация, реферат, макет).

Глава 2

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ

§ 27 ЭЛЕКТРИЗАЦИЯ ТЕЛ ПРИ СОПРИКОСНОВЕНИИ. ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ЗАРЯЖЕННЫХ ТЕЛ



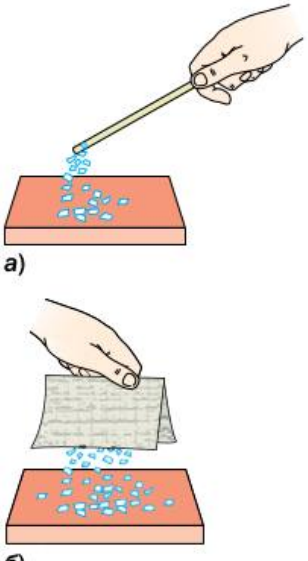
Электризация волос

Вы не раз встречались с электрическими явлениями в повседневной жизни. Вспомните, как проскакивают искры, когда вы снимаете шерстяной свитер в тёмной комнате. При этом слышно характерное потрескивание. При расчёсывании волос пластмассовой расчёской можно видеть, как волосы прилипают к ней.

Аналогичные явления наблюдали ещё древние греки. Они обнаружили, что если потереть янтарь о шерсть, то к нему начинают прилипать мелкие предметы. Слово «янтарь» по-гречески «электрон». Поэтому явление, возникающее при трении двух разнородных твёрдых тел, было названо *электризацией*. Слово «электрон» стало родоначальником целой серии терминов: электрон, электричество, электрический заряд, электрический ток и т. п.

Для того чтобы выяснить суть явления электризации, проделаем несколько опытов. Возьмём стеклянную палочку. Потрём её листом бумаги и поднесём к мелким кусочкам бумаги. Мы увидим, что палочка будет притягивать к себе эти бумажки (рис. 53, *а*).

При трении *электризуются оба тела*. В этом легко убедиться, если поднести к кусочкам бумаги листок, потёртый о палочку. Он тоже будет притягивать эти бумажки (рис. 53, *б*). Подобные опыты можно проделать и с другими телами. Так, если потереть о шерсть эбонитовую палочку, то и палочка, и кусочек шерсти



а)

б)

Рис. 53. Электризация трением

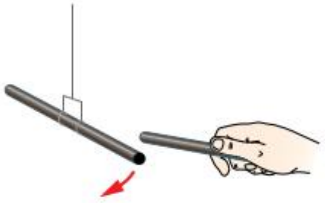


Рис. 54. Отталкивание наэлектризованных эбонитовых палочек

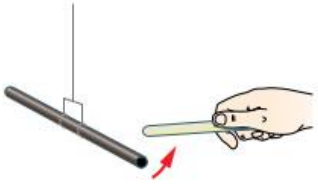


Рис. 55. Притяжение наэлектризованных эбонитовой и стеклянной палочек

приобретут способность притягивать мелкие бумажки.

Выясним, как взаимодействуют друг с другом наэлектризованные тела. Для этого наэлектризуем две эбонитовые палочки, потерев их о шерсть. Подвесим одну палочку на нити и поднесём к ней другую (рис. 54). Палочка на нити повернётся, оттолкнувшись от неподвижной палочки. Если же к подвешенной эбонитовой палочке поднести стеклянную палочку, потёртую о шёлк, то эбонитовая палочка к ней притянется (рис. 55).

Взаимодействие наэлектризованных тел было названо *электрическим*. Опыты показывают, что интенсивность такого взаимодействия может быть разной. Свойство тел, от которого зависит сила их электрического взаимодействия, характеризуется физической величиной — ***электрический заряд***. Электрический заряд обозначают буквой q и измеряют в *кулонах* **(Кл)**. Единица заряда названа в честь французского физика ***Шарля Кулона***. Определение этой единицы будет дано позже.

Теперь мы можем пояснить, что при электризации тела приобретают электрический заряд. Электризация может происходить не только при трении тел друг о друга, но и при соприкосновении, и даже без непосредственного контакта между телами.

Электризация — это сообщение телу электрического заряда.



ШАРЛЬ ОГЮСТЕН КУЛОН

(1763—1806)

Французский физик, военный инженер, исследователь электромагнитных и механических явлений

Многочисленные опыты показывают, что наэлектризованные тела делятся на две группы. В каждой из этих групп любые два тела взаимно отталкиваются, в то же время любые два тела из разных групп взаимно притягиваются. Это означает, что существует *два рода (вида) электрических зарядов*.

Условились считать, что стеклянная палочка, потёртая о шёлк, имеет

заряд ***положительного*** знака. Эбонитовая палочка, потёртая о мех, — ***отрицательного***. Одни тела электризуются так, как стеклянная палочка (действуют на другие наэлектризованные тела так, как эта палочка), т. е. приобретают положительный заряд. Другие — как эбонитовая палочка, т. е. приобретают отрицательный заряд.

Итак, опыты показывают, что **существует два рода электрических зарядов; тела, имеющие электрические заряды одинакового знака, взаимно отталкиваются, а тела, имеющие заряды противоположного знака, взаимно притягиваются.**

1. Как при помощи листочков бумаги обнаружить, наэлектризовано ли тело? **2.** Как взаимодействуют друг с другом две одинаковые палочки, наэлектризованные одинаковым способом? **3.** Сколько видов электрических зарядов существует в природе? Какие опыты это подтверждают? **4.** Как взаимодействуют тела, имеющие заряды одного знака; разного знака?

1. Если ножовкой распиливать лист плексигласа или полистирола, то опилки, образующиеся в процессе распилки, прилипают к ножовке. Как можно объяснить это явление?

2. На тонких шёлковых нитях подвешены два одинаковых шарика: один заряженный, второй незаряженный. Предложите способ определения, какой шарик заряжен, а какой нет.

3. Объясните электризацию волос (см. рис. на с. 100).

УПРАЖНЕНИЕ 22

1. На рисунке 56 показано взаимодействие заряженных тел. Найдите ошибки в рисунке и исправьте их.

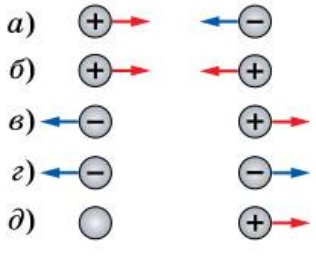


Рис. 56

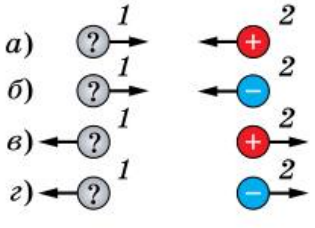


Рис. 57

2. Рассмотрите рисунок 57. Считая, что тело *1* заряжено, определите знак его заряда в каждом случае.

Это любопытно...

Легенда об открытии электризации

Древние греки любили украшения из янтаря — яркой, золотистой окаменевшей смолы. Его способность электризоваться была известна давно.

Впервые исследованием этого явления занялся знаменитый философ ***Фалес Милетский***. Вот как об этом рассказывает легенда. Дочь Фалеса пряла шерсть янтарным веретеном, изделием финикийских мастеров. Как-то, уронив веретено в воду, девушка стала обтирать его краем своего шерстяного хитона и заметила, что к веретену пристало несколько ворсинок. Думая, что они прилипли к веретену, потому что оно всё ещё влажное, она принялась вытирать его ещё сильнее. И что же? Шерстинок налипало тем больше, чем сильнее она натирала веретено. Девушка обратилась за разъяснением этого явления к отцу. Фалес понял, что причина в веществе, из которого сделано веретено. Он купил у финикийских купцов различные янтарные изделия и убедился, что все они, будучи натёрты шерстяной материей, притягивают лёгкие предметы.



Как будут взаимодействовать два различных янтарных изделия, потёртые о шерсть?

§ 28 ЭЛЕКТРОСКОП. ПРОВОДНИКИ И НЕПРОВОДНИКИ ЭЛЕКТРИЧЕСТВА

Вы знаете, что эбонитовая палочка, потёртая о шерсть, приобретает отрицательный заряд. Коснёмся наэлектризованной эбонитовой палочкой гильзы, изготовленной из металлической фольги и подвешенной на нити. Гильза оттолкнётся от палочки (рис. 58, *а*). Это пока-

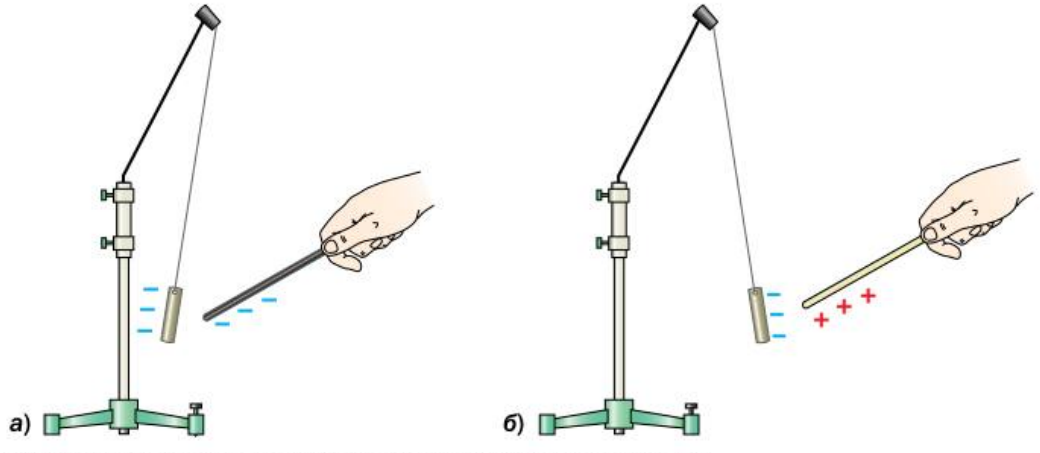


Рис. 58. Электризация гильзы из металлической фольги

зывает, что гильза и эбонитовая палочка заряжены одноимённо. Значит, гильза получила от палочки отрицательный заряд. Проверим это ещё одним способом. Поднесём к гильзе стеклянную палочку, потёртую о шёлк. Гильза будет к ней притягиваться (рис. 58, *б*). Так как стеклянная палочка заряжена положительно, то притяжение гильзы указывает на её отрицательный заряд. Это подтверждает, что эбонитовая палочка действительно зарядила гильзу отрицательно. Следовательно, при соприкосновении происходит передача электрического заряда от одного тела к другому.

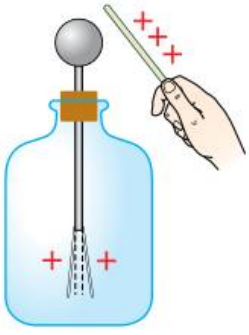


Рис. 59. Обнаружение заряда с помощью простейшего электроскопа

Для проведения экспериментов нужен прибор, который бы показывал, имеет ли данное тело электрический заряд и как он изменяется в различных процессах. Какое свойство заряженных тел можно использовать для этого?

Воспользуемся свойством одноимённо заряженных тел отталкиваться друг от друга. Внутри стеклянной колбы (банки) поместим металлический стержень, на нижнем конце которого прикрепим два листочка фольги или бумаги. Такой прибор называют ***электроскопом***. Если верхнего конца стержня электроскопа коснуться заряженной палочкой, то он зарядится, и его листочки разойдутся (рис. 59).



Электроскоп

Свойство одноимённо заряженных тел отталкиваться используется и в приборе, который называют ***электрометром*** (рис. 60). Основные элементы прибора — лёгкая подвижная стрелка и стержень. Стержень вставлен через пластмассовую пробку в металлический кожух, к нему прикрепляется металлический шар. Если к шару прикоснуться заряженным телом, то шар, а также стрелка и стержень электрометра зарядятся. Поскольку стрелка и стержень заряжаются одноимённо, то стрелка оттолкнётся от стержня и повернётся на некоторый угол. Причём чем больше заряд тела, тем

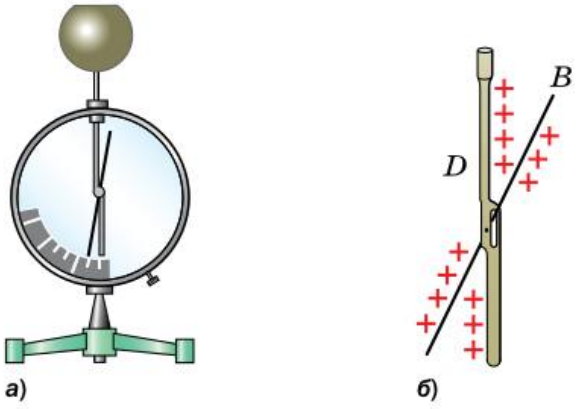


Рис. 60. Электрометр: *а* — внешний вид; *б* — механизм зарядки

больший заряд оно сообщит стержню и стрелке и тем больше будет угол отклонения стрелки. Таким образом, по отклонению стрелки можно судить о том, заряжено тело или нет, а по углу отклонения — о величине заряда тела.

Для того чтобы снова можно было использовать электрометр, нужно каким-то образом снять с него заряд — разрядить. Прикоснёмся к заряженному электрометру стеклянной палочкой, увидим, что ничего не происходит. Соединим электрометр проволокой с землёй или прикоснёмся к нему рукой — стрелка опустится, указывая на то, что электрометр разрядился. Через проволоку и тело человека заряд электрометра передаётся Земле (поскольку размеры Земли огромны, заряд передаётся полностью).

Рассмотренный опыт показывает, что вещества обладают разными электрическими свойствами. Вещества, ведущие себя в аналогичных опытах подобно металлам и передающие заряд, называют ***проводниками***. Вещества, которые подобно стеклу не передают заряд, называют ***диэлектриками***.

Проводниками являются металлы, электролиты (их примерами могут служить растворы солей и кислот), графит и др. К диэлектрикам относятся фарфор, эбонит, стекло, янтарь, резина, дистиллированная вода, воздух и др. Тела, изготовленные из диэлектриков, часто называют *изоляторами*.



Проводник (железо)



Диэлектрик (янтарь)



Полупроводник (германий)

Существуют вещества, занимающие промежуточное положение между проводниками и диэлектриками. Их называют ***полупроводниками***. Способность этих веществ передавать электрический заряд зависит от внешних условий: температуры, освещённости и др.

Типичные, широко применяемые в технике (в частности, в электронике) полупроводники — германий и кремний. В обычных условиях они являются диэлектриками, а, например, при нагревании становятся проводниками.

1. Что происходит при соприкосновении наэлектризованных тел? **2.** Каков принцип действия электроскопа? **3.** Что общего у электроскопа и электрометра и каковы различия между ними? **4.** По какому признаку вещества делятся на проводники, диэлектрики и полупроводники? Приведите примеры веществ каждого типа.

Два лёгких металлических шарика, заряженных положительно, подвешены на одинаковых шёлковых нитях в одной точке. Что произойдёт и почему, если прикоснуться рукой к одному из шариков?

ЗАДАНИЕ 15

- Как при помощи электроскопа определить знак заряда авторучки, потёртой о ткань, используя положительно заряженную палочку? Проведите предложенный эксперимент.

§ 29 ЗАКОН КУЛОНА. ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ

Вы уже знаете, что наэлектризованные тела взаимодействуют друг с другом: они либо притягиваются, либо отталкиваются. Интенсивность этого взаимодействия может быть разной. От чего зависит сила взаимодействия наэлектризованных тел?

Подвесим на нити гильзу из металлической фольги и сообщим ей положительный электрический заряд. Поднесём к гильзе отрицательно заряженную палочку. Опыт показывает, что чем ближе подносим палочку к гильзе, тем сильнее гильза к ней притягивается (рис. 61).

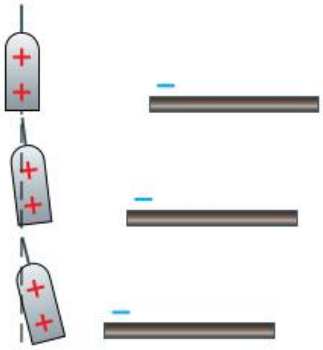


Рис. 61. Чем ближе друг к другу заряженные тела, тем сильнее их взаимодействие

Значит, сила электрического взаимодействия зависит от расстояния между заряженными телами. Кроме того, можно убедиться, что эта сила зависит от заряда тел, их формы и размеров.

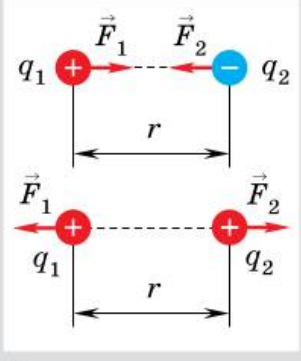
В 1785 г. Кулон, экспериментально изучая взаимодействие между маленькими заряженными шариками, установил закон, по которому может быть вычислена сила взаимодействия неподвижных *точечных зарядов*.

Точечный заряд — это заряженное тело, размеры которого пренебрежимо малы по сравнению с расстояниями от него до других рассматриваемых тел.

Точечный заряд является физической моделью, а не реальным объектом. Введение такой модели позволяет описать взаимодействие заряженных тел количественно. Если реальные заряженные тела малы по сравнению с расстоянием между ними, то приближённое значение силы их взаимодействия можно узнать, считая тела точечными зарядами.

Согласно ***закону Кулона***, *сила взаимодействия двух неподвижных точечных зарядов в вакууме прямо пропорциональна произведению модулей этих зарядов и обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними.*

Силы, с которыми два точечных заряда действуют друг на друга, направлены вдоль прямой, соединяющей их, равны по модулю и противоположны по направлению.



Согласно закону Кулона: $F_1 = F_2 = F$,

$F \sim |q_1| \cdot |q_2|$,

$F \sim \frac{1}{r^2}$

Сила взаимодействия зарядов зависит от свойств среды, в которой они находятся. В диэлектрике эта сила меньше, чем в вакууме при том же расстоянии между зарядами. Подробнее об этом вы узнаете в старших классах.

Взаимодействие заряженных тел происходит на расстоянии. В этом электрическое взаимодействие похоже на всемирное тяготение. Ведь планеты, Солнце и другие небесные тела взаимодействуют друг с другом не соприкасаясь.

Как же взаимодействуют заряженные тела? Одно время учёные считали, что тела действу-



ГЕОРГ ВИЛЬГЕЛЬМ РИХМАН

(1711—1753)

Русский физик немецкого происхождения. Известен как исследователь электричества. Создал прообраз электрометра — электрический указатель. Погиб от удара молнии при проведении опытов с атмосферным электричеством

ют друг на друга непосредственно через пустоту, способны «чувствовать» присутствие друг друга без какой-либо среды.

Русский учёный ***Георг Рихман*** при исследовании электрического взаимодействия выдвинул гипотезу о существовании особого вида материи — электрического поля. В работе «Рассуждения об указателе электричества и о пользовании им при исследовании искусственного и естественного электричества» (1758) он писал: «...электрическая материя, неким движением возбуждаемая вокруг тела... должна опоясывать его на некотором расстоянии; на меньшем расстоянии от поверхности тела действие её бывает сильнее; следовательно, при увеличении расстояния сила её убывает по некоторому, пока ещё неизвестному закону».

Представления Рихмана об электрическом поле получили дальнейшее развитие в трудах британских физиков ***Майкла Фарадея*** и ***Джеймса Максвелла*** (1831—1879). Согласно их учению, любое заряженное тело создаёт вокруг себя ***электрическое поле***.

Главное свойство электрического поля — действие на тела, обладающие электрическим зарядом, с некоторой силой.

Силу, действующую на заряженное тело со стороны электрического поля, называют электрической силой.

Итак, заряженные тела не действуют друг на друга непосредственно. Поле одного заряженного тела действует на другое заряженное тело и наоборот. Именно по действию на заряженные тела и можно судить о наличии в данной области пространства электрического поля.

Исследовать электрическое поле можно с помощью *пробного заряда* — точечного заряда, который настолько мал, что не вызывает существенных изменений в исследуемом поле. Если

поочерёдно помещать в одну и ту же точку электрического поля различные пробные заряды, то на них будут действовать разные электрические силы. При этом обнаружится, что действующая на пробный заряд электрическая сила прямо пропорциональна значению заряда. Следовательно, отношение электрической силы к значению пробного заряда остаётся во всех случаях одинаковым и является характеристикой электрического поля. Эту физическую величину называют ***напряжённостью электрического поля***.

Напряжённость электрического поля — это физическая величина, равная отношению электрической силы, действующей на помещённый в электрическое поле пробный заряд, к значению этого заряда.

Напряжённость электрического поля — *векторная величина*. Она направлена так же, как электрическая сила, действующая на положительный пробный заряд.

Напряжённость обозначают символом $\vec{E}$. В СИ её единица — *ньютон на кулон* $\left(\frac{\text{Н}}{\text{Кл}}\right)$.

Получить представление об электрическом поле можно, изобразив векторы напряжённости поля в различных точках пространства. На рисунке 62 показаны векторы напряжённости электрических полей, созданных положительным (рис. 62, *а*) и отрицательным (рис. 62, *б*) точечными зарядами. На основании закона Кулона можно сделать вывод, что модуль вектора напряжённости электрического поля точечного заряда убывает (см. рис. 62) обратно пропорционально квадрату расстояния от заряда.

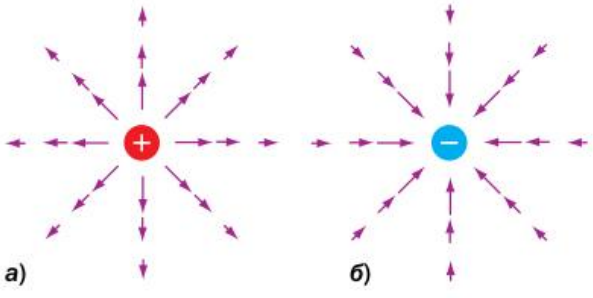
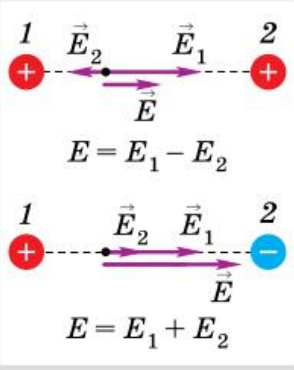


Рис. 62. Векторы напряжённости электрического поля точечного заряда в различных точках пространства

Многочисленные эксперименты показывают, что напряжённость электрического поля, создаваемого в данной точке про-



При сложении напряжённостей учитывают их направления

странства несколькими зарядами, равна сумме напряжённостей полей, которые создавал бы в этой точке каждый из зарядов при отсутствии остальных. Это утверждение называют *принципом суперпозиции*. Обратим внимание, что при сложении напряжённостей необходимо учитывать их направления. Принцип суперпозиции означает, что поля отдельных зарядов друг друга не искажают, а только накладываются друг на друга.

Электрическое поле обладает энергией, так как оно способно совершать работу. Действительно, поскольку на любое заряженное тело, находящееся в электрическом поле, действует сила, значит, при перемещении тела полем совершается работа.

1. Опишите опыт, который показывает, что электрическое взаимодействие передаётся без соприкосновения заряженных тел. **2.** Что называют точечным зарядом? **3.** Сформулируйте закон Кулона. **4.** Что является источником электрического поля? **5.** Как можно экспериментально обнаружить электрическое поле? **6.** Какая физическая величина является характеристикой электрического поля? Каков её физический смысл? **7.** Какова единица напряжённости электрического поля? **8.** Как опытным путём определить направление напряжённости электрического поля?

1. Предложите эксперименты, подтверждающие гипотезу Рихмана об электрическом поле.

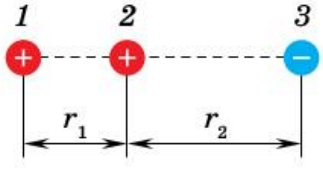


Рис. 63

2*. Три неподвижных точечных заряда расположены так, как показано на рисунке 63. Известно, что $q_1 > 0$, $q_2 > 0$, $q_3 < 0$, $|q_1| > |q_3|$, $r_2 > r_1$. Изобразите силы, действующие на заряд *2* со стороны зарядов *1* и *3*; равнодействующую этих сил. Как направлен вектор напряжённости электрического поля в точке, равноудалённой от зарядов *1* и *3* и лежащей с ними на одной прямой?

УПРАЖНЕНИЕ 23

1. Расстояние между двумя точечными зарядами увеличили в 4 раза. Как и во сколько раз изменилась сила их взаимодействия?
2. Как изменится сила взаимодействия двух точечных зарядов, если каждый из них увеличить в 3 раза, а расстояние между ними оставить неизменным?
3. Как изменится сила взаимодействия двух точечных зарядов, если увеличить один из них в 4 раза, а расстояние между ними — в 2 раза?

ЗАДАНИЕ 16

1. Составьте план эксперимента, доказывающего, что электрическое поле обладает энергией.
2. Как изменяется электрическая сила, действующая на заряженную гильзу при удалении её от заряженного тела? Как это показать на опыте?

§ 30 ДЕЛИМОСТЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ЗАРЯДА. ЭЛЕКТРОН

При электризации тела получают различные электрические заряды. Чем больший заряд имеют тела, тем сильнее они взаимодействуют: притягиваются или отталкиваются. Что происходит с телами при электризации?

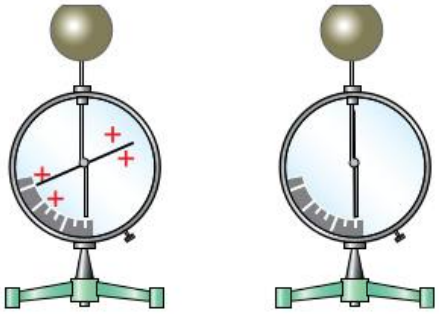


Рис. 64. Зарядка электрометра

Для ответа на этот вопрос вспомним, что наименьшими частицами вещества являются атомы и молекулы, которые электрически нейтральны (их заряд равен нулю). Можно предположить, что в природе существуют частицы, имеющие электрический заряд. Тогда электризацию можно объяснить переходом заряженных частиц от одного тела к другому. В этом случае должен существовать предел деления электрического заряда и минимальный электрический заряд.

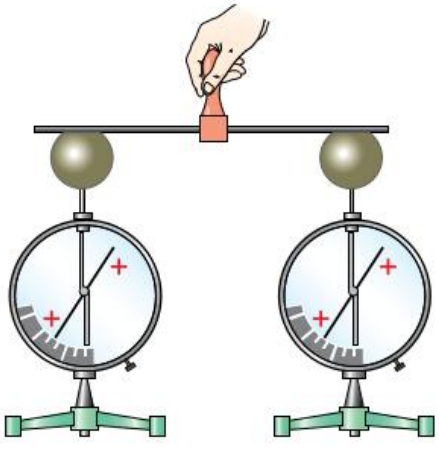


Рис. 65. Делимость электрического заряда

Докажем на опыте, что электрический заряд можно разделить. Для этого возьмём два одинаковых электрометра и зарядим один из них (рис. 64). Затем соединим его металлическим стержнем с другим, незаряженным электрометром. Часть заряда с первого электрометра перейдёт на второй (рис. 65). Так как электрометры одинаковы, то *первоначальный заряд поделился на две равные части*.



АБРАМ ФЁДОРОВИЧ ИОФФЕ

(1880—1960)

Советский физик, академик. Выдающийся организатор советской науки. Проводил исследования по измерению заряда электрона, изучению свойств диэлектриков и полупроводников

Разрядим один из электрометров и повторим опыт. Обнаружим, что заряд снова поделился пополам, и на каждом электрометре оказалось по $\frac{1}{4}$ от первоначального заряда. Так можно делить заряд много раз. Если существует наименьший заряд, то должен быть предел деления заряда. Это значит, что если заряд одного электрометра равен минимальному, то при соединении его с другим электрометром заряженным будет только один из них.

Более сложные опыты по делению электрического заряда были проведены в 1910—1911 гг. практически одновременно советским учёным ***Абрамом Фёдоровичем Иоффе*** и американским учёным ***Робертом Милликеном***. Они обнаружили, что *электрический заряд может меняться только порциями*. Такое свойство называют ***дискретностью заряда***. Это значит, что в природе существует частица, имеющая самый маленький электрический заряд. Носитель наименьшего по модулю отрицательного заряда — ***электрон***. Экспериментально электрон был открыт в 1897 г. английским физиком ***Джозефом Джоном Томсоном*** (1856—1940).



РОБЕРТ МИЛЛИКЕН

(1868—1953)

Американский физик-экспериментатор. Опытным путём доказал существование частиц с наименьшим электрическим зарядом, измерил элементарный заряд. Лауреат Нобелевской премии (1923)

Заряд электрона равен $-1{,}6 \cdot 10^{-19}$ Кл. Частиц с зарядом, меньшим по модулю, чем заряд электрона, в природе не обнаружено. Масса электрона равна $9{,}1 \cdot 10^{-31}$ кг.

Модуль заряда электрона часто называют *элементарным зарядом*, обозначают буквой e. Заряды q любых частиц или тел оказываются либо равными, либо кратными элементарному заряду.

$$q = \pm Ne,$$

где $N = 1, 2, 3, \ldots$.

1. Опишите опыт, который показывает, что электрический заряд делится на части. **2.** Имеет ли электрический заряд предел делимости? **3.** Что такое электрон? Что вы знаете о его заряде и массе?

У Кулона не было метода для измерения заряда, однако он смог установить, что сила электрического взаимодействия маленьких заряженных шариков прямо пропорциональна произведению их зарядов. Как это ему удалось? Предложите способ.

§ 31 СТРОЕНИЕ АТОМА

Вы знаете, что молекулы и атомы, из которых состоят тела, взаимодействуют друг с другом. Эти частицы могут как притягиваться, так и отталкиваться.

Чем же объясняется взаимодействие атомов? Может быть, это проявление сил всемирного тяготения? Расчёты показывают, что эти силы слишком малы, чтобы быть заметными, из-за малой массы частиц. Кроме того, силой всемирного тяготения нельзя объяснить отталкивание частиц. Значит, существуют ещё какие-то силы, заставляющие взаимодействовать атомы и молекулы. И, возможно, зависят эти силы от внутреннего строения частиц.

Долгое время считалось, что атом — неделимая частица. По мере развития физики учёные всё больше сомневались в неделимости атома и пытались разгадать его строение.

Опыты Томсона показали, что в состав атомов входят отрицательно заряженные частицы — электроны. Однако атом электрически нейтрален. Иначе, если бы атом имел даже очень маленький заряд, то все окружающие тела, состоящие из огромного числа атомов, обладали бы очень большими зарядами. Они постоянно взаимодействовали бы друг с другом, чего не происходит. Значит, внутри атома имеется и положительный заряд.

В 1911 г. британский физик ***Эрнест Резерфорд*** (1871—1935) на основании результатов проведённых опытов предложил ***планетарную модель атома***. По Резерфорду, **практи-**

чески вся масса атома сосредоточена в его ядре; вокруг ядра на разных расстояниях от него вращаются электроны. Модель атома Резерфорда напоминает Солнце с планетами, поэтому её и называют планетарной.

Электроны имеют отрицательный заряд, а ядро — положительный, поэтому электрические силы притяжения удерживают электроны около ядра. Ту часть атома, где находятся электроны, называют *электронной оболочкой*.

А как устроено ядро? Ядро, так же как и сам атом, имеет сложную структуру. Оно состоит из частиц — ***нейтронов*** и ***протонов*** (их называют нуклонами). *Протоны заряжены положительно*, а *нейтроны не имеют электрического заряда* (*нейтральные*). Что же удерживает нуклоны в ядре, ведь одноимённо заряженные протоны отталкиваются друг от друга? Нуклоны связаны между собой ядерными силами, которые примерно в 100 раз больше электрических.

Протон был открыт в 1919 г. Резерфордом. Современные эксперименты показывают, что абсолютные значения (модули) зарядов протона и электрона совпадают. Электрический заряд протона, так же как и электрона, — неотъемлемое его свойство, т. е. заряд нельзя отделить от протона или электрона.

Число протонов в ядре атома равно числу электронов в атоме, поэтому атом электрически нейтрален.

На рисунке 66 изображены в качестве примера модели атомов водорода, гелия и лития. Атомы различных элементов отличаются друг от друга количеством протонов и электронов.

Протон имеет относительно большую массу, примерно в 1836 раз больше массы электрона. Массы протона и нейтрона почти одинаковы. Таким образом, основная масса любого атома сосредоточена в ядре.

Если из атома удалить один или несколько электронов, то у образовавшейся частицы будет избыток положительного заряда. Такую

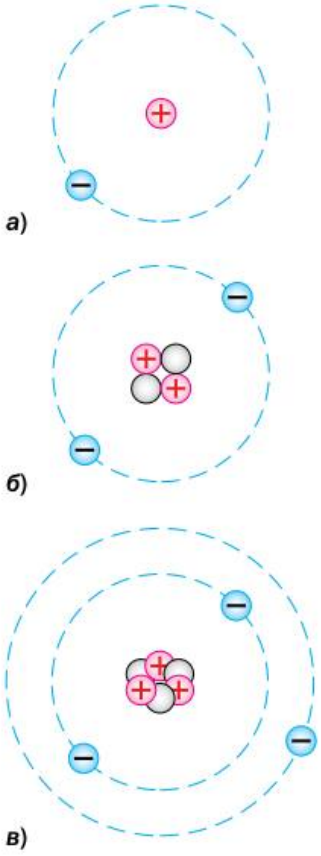


Рис. 66. Модель атома:
а — водорода;
б — гелия;
в — лития

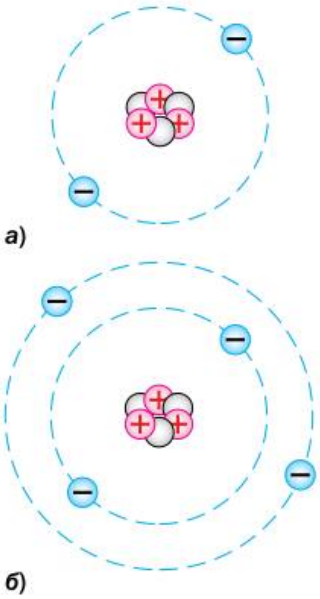


Рис. 67. Ион лития:
а — положительный;
б — отрицательный

частицу называют ***положительным ионом*** (рис. 67, *а*). Атом, присоединивший один или несколько дополнительных электронов, становится ***отрицательным ионом*** (рис. 67, *б*), так как приобретает отрицательный заряд. Число протонов в каждом случае не меняется. *Заряд ядра (число протонов) — главная характеристика данного химического элемента.*

Вернёмся теперь к вопросу о взаимодействии атомов (молекул), который был задан в начале параграфа. Оказывается, природа этого взаимодействия электрическая. Хотя в целом атомы нейтральны, на малых расстояниях между ними действуют электрические силы. Это происходит из-за взаимодействия электронов и ядер, принадлежащих соседним атомам. На расстояниях в 2—3 атомных диаметра между атомами преобладают силы притяжения, а на очень малых расстояниях, когда их электронные оболочки перекрываются, — силы отталкивания.

1. Опишите планетарную модель атома на примере атома гелия. **2.** Какие частицы входят в состав ядра? **3.** Каково строение атомов водорода, гелия и лития? **4.** Как образуются положительные и отрицательные ионы? **5.** Что является главной характеристикой данного химического элемента?

1. Чем отрицательный ион отличается от электрона?

2. Можно ли по моделям атомов (см. рис. 66) определить порядковые номера водорода, гелия и лития в таблице Д. И. Менделеева?

УПРАЖНЕНИЕ 24

1. Нарисуйте модель атома бериллия, в ядре которого 4 протона и 5 нейтронов.
2. Диаметр атома водорода 10^{-10} м, а диаметр его ядра 10^{-15} м. Во сколько раз атом водорода больше своего ядра?
3. Притягиваются или отталкиваются два электрона?
4. Может ли какая-либо частица иметь заряд, превышающий элементарный заряд в 2,5 раза?
5. Ядро атома кислорода содержит 8 протонов. Каков заряд ядра атома кислорода? Сколько электронов содержит атом кислорода?
6. От атома углерода отделился один электрон. Как называют образовавшуюся частицу? Каков её заряд? Нарисуйте модель получившейся частицы.

Это любопытно...

О размерах атома и его ядра

Попробуем соотнести (сравнить) размеры атома и его ядра. Для этого представим себе, что, например, ядро атома водорода увеличилось до размеров самого атома. Тогда диаметр макового зёрнышка (1 мм) оказался бы равным длине футбольного поля (100 м).

Оказывается, что атом почти пуст. Если бы этой пустоты не было и ядра атомов оказались расположенными рядом друг с другом, то масса макового зёрнышка была бы миллион тонн. В природе есть космические объекты, кусочек вещества которых размером с маковое зёрнышко имеет такую массу. Называют такие объекты нейтронными звёздами.



Во сколько раз, согласно рассмотренной наглядной модели, атом больше ядра? Предложите другую наглядную модель, с помощью которой можно было бы сравнить размеры атома и ядра.

§ 32 ОБЪЯСНЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ. ЗАКОН СОХРАНЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ЗАРЯДА



а)



б)

Электризация трением:
а — стеклянной палочки о шёлк;
б — эбонитовой палочки о мех

В предыдущем параграфе вы познакомились со строением атома. Вам уже известно, что электрон не покидает самопроизвольно атом, так как его удерживают силы притяжения положительно заряженного ядра. Ядра атомов различных веществ состоят из разного количества протонов, поэтому силы притяжения электронов к ядрам у разных веществ различны.

При соприкосновении двух разнородных твёрдых тел силы притяжения электронов внешних оболочек к своим атомным ядрам у одного тела могут оказаться меньше, чем их силы притяжения к атомным ядрам другого тела. И тогда электроны в местах соприкосновения тел могут оторваться от своих атомов и перейти в другое тело. При этом у одного тела количество электронов окажется меньше, чем протонов. Значит, оно зарядится положительно. У другого тела возникнет избыток электронов, оно зарядится отрицательно. Говорят, что оба тела электризуются.

Таким образом, при электризации происходит перераспределение электронов. Например,

эбонитовая палочка, потёртая о шерсть, приобретает отрицательный заряд, а шерсть — положительный. При трении электроны с шерсти «перебегают» на палочку. На ней получается избыток электронов (поэтому она заряжается отрицательно), а на шерсти — недостаток электронов (поэтому она заряжается положительно). Количество электронов-«перебежчиков» (и тем самым степень электризации тел) зависит от числа «соприкасающихся» атомов. При трении тел друг о друга число участков с тесным контактом увеличивается, тем самым увеличивается количество электронов, переходящих от одного тела к другому.

Эбонитовая палочка и шерсть обмениваются электронами только между собой. Систему тел, которая не обменивается заряженными частицами с другими телами, называют *электрически изолированной*.

В таких системах выполняется ***закон сохранения электрического заряда.***

В электрически изолированной системе при любых процессах суммарный электрический заряд остаётся постоянным.

$$q_1 + q_2 + \ldots + q_n = \text{const}.$$

$q_1 + q_2 + \ldots + q_n = \text{const}$

Это означает, что если какому-либо телу системы передали несколько электронов, то у другого тела системы эти электроны забрали. При этом у второго тела появился такой же по модулю, но противоположный по знаку заряд, т. е. осталось столько же «лишних» протонов, сколько электронов забрали.

Зная, что в состав веществ входят заряженные частицы, мы можем объяснить существование проводников и диэлектриков. В проводниках есть заряженные частицы (электроны, ионы), способные свободно перемещаться по всему объёму вещества. Часто для краткости говорят о перемещении по проводнику зарядов, однако имеют в виду перемещение электрически заряженных частиц. Диэлектриками яв-

ляются вещества, не содержащие заряженных частиц, способных к свободному перемещению.

В металлах заряженными частицами, способными к свободному перемещению, являются электроны. При образовании металла из нейтральных атомов некоторые, наиболее удалённые от своих ядер электроны утрачивают с ними связь и становятся «собственностью» всего проводника. Свободные электроны участвуют в тепловом движении и могут перемещаться по куску металла в любом направлении.

Знания об электроне и строении атома позволяют объяснить притяжение незаряженных тел к заряженным. Вспомните, как мелкие кусочки бумаги притягивались к наэлектризованной палочке. Бумага — диэлектрик. Рассмотрим сначала притяжение проводящих тел.

Пусть положительно заряженную палочку подносят к подвешенной на шёлковой нити незаряженной металлической гильзе. Гильза отклонится от своего первоначального положения в сторону палочки. Как это объяснить?

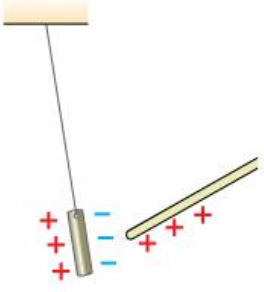


Рис. 68. Притяжение незаряженной гильзы к заряженной палочке

Под действием электрического поля заряженной палочки в гильзе часть свободных электронов перейдёт на ближайшую к палочке сторону гильзы (электроны имеют отрицательный заряд и притягиваются к положительно заряженной палочке). В результате на этой стороне гильзы образуется отрицательный заряд. При этом на удалённой от палочки стороне гильзы будет недостаток электронов, т. е. она станет положительно заряженной. Отрицательно заряженная сторона гильзы ближе к палочке, поэтому гильза к ней притягивается (рис. 68).

Суммарный заряд гильзы остаётся равным нулю, но в ней происходит перераспределение зарядов, так что в одних её участках скапливаются отрицательные заряды, а в других — положительные. Такой тип электризации называют *электростатической индукцией*.

Сложнее объяснить притяжение к наэлектризованной палочке бумаги, ведь бумага не содержит свободных заряженных частиц. Оказы-

вается, под действием электрического поля палочки имеющиеся в бумаге электроны немного смещаются в пределах атомов. Эти смещения малы, но число атомов огромно. В результате на ближней к палочке стороне бумаги образуется заряд, противоположный по знаку заряду палочки, и бумага к ней притягивается.

1. Объясните электризацию тел при соприкосновении. **2.** Почему при электризации трением на телах появляются равные по абсолютному значению, но противоположные по знаку заряды? **3.** Какую роль играет трение при электризации тел? **4.** Какую систему называют электрически изолированной? **5.** Сформулируйте закон сохранения электрического заряда. **6.** Объясните, почему электрически нейтральные тела притягиваются к наэлектризованным. **7.** Что называют электростатической индукцией?

1. Можно ли при электризации трением зарядить только одно из соприкасающихся тел? Ответ обоснуйте.

2. Если приблизить к электроскопу заряженную палочку, не касаясь его, можно заметить, что его листочки расходятся. Если убрать палочку, листочки опадут. Почему это происходит? Опадут ли листочки, если, прежде чем убрать палочку, коснуться стержня электроскопа пальцем?

3. Что произойдёт в опыте, изображённом на рисунке 68, если гильза коснётся палочки? Ответ обоснуйте.

УПРАЖНЕНИЕ 25

1. Стеклянная палочка при трении о шёлк электризуется положительно. Избыток или недостаток электронов образуется на шёлке?

2. Одному из двух одинаковых металлических шариков сообщили заряд $-6q$, другому — заряд $2q$. Затем шарики соединили проводником. Какими станут заряды шариков после соединения?

3. При трении с незаряженной стеклянной палочки было удалено $9 \cdot 10^{16}$ электронов. Чему стал равен заряд палочки? На сколько уменьшилась масса палочки?

4. Какое количество электронов было удалено с изначально незаряженной стеклянной палочки в результате трения, если заряд палочки стал $4 \cdot 10^{-9}$ Кл? На сколько при этом уменьшилась масса палочки?

5. Чтобы заряженное тело стало электрически нейтральным, ему недостаёт $5{,}2 \cdot 10^{12}$ электронов. Каков заряд этого тела?

6*. Два одинаковых металлических положительно заряженных шарика находятся друг от друга на расстоянии, значительно превышающем их размеры. Шарики привели в соприкосновение, а затем вернули в исходное положение. Как и во сколько раз изменилась сила взаимодействия шариков, если до соприкосновения их заряды различались в 3 раза?

§ 33 СТАТИЧЕСКОЕ ЭЛЕКТРИЧЕСТВО, ЕГО УЧЁТ И ИСПОЛЬЗОВАНИЕ В БЫТУ И ТЕХНИКЕ

В век синтетических материалов вам наверняка приходилось наблюдать «электричество от трения», которое называют *статическим электричеством*.

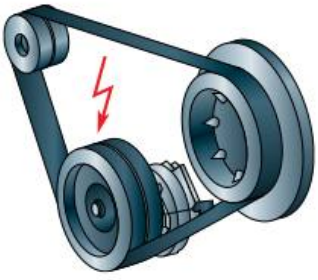


Рис. 69. Электризация прорезиненных ремней при трении

Например, кожаные и прорезиненные ремни в двигателе, электризуясь от соприкосновения со шкивом, могут искрить (рис. 69). И если двигатель работает в помещении, где в воздухе находится мелкая горючая пыль (мука, угольная пыль), то искра может вызвать взрыв и пожар. На клеепромазочной машине, которая смазывает резиновым клеем тканевые материалы, вследствие трения материала о валики происходит их электризация. Даже небольшая искра, возникающая при этом, может вызвать пожар, так как окружающий воздух насыщен парами бензина.

Взаимное отталкивание волокон из-за их электризации мешает работе ткацких станков. Такую ткань трудно раскраивать. Кроме того, наэлектризованная ткань сильно загрязняется вследствие притяжения к ней частичек пыли.

Одним из способов борьбы со статическим электричеством является соединение тела с землёй с помощью проводника — *заземление*. Так, на производстве тщательно заземляют станки и машины. Для покрытия полов в производственных помещениях используются хорошо проводящие электричество пластики. В авиации у некоторых типов самолётов имеются специальные приспособления, заземляющие самолёт при посадке. В полёте, вследствие трения о воздух и по некоторым другим причинам, самолёт накапливает значительный электрический заряд.

Однако заземление не помогает, если используется оборудование, изготовленное из диэлектриков. Для того чтобы поверхность таких материалов лучше проводила электричество,

её подвергают обработке. Например, приводные ремни и ленты транспортёров покрывают графитом или бронзовым порошком.

С той же целью увеличивают влажность воздуха в помещении, при этом на поверхности материалов, не проводящих электричество, образуется тонкая плёнка воды. Недистиллированная вода из-за разных примесей представляет собой электролит, поэтому хорошо проводит электричество. В быту для борьбы с вредной электризацией применяют различные антистатики.



Равномерное окрашивание изделия наэлектризованной краской

Статическое электричество можно успешно использовать на производстве. Оно может играть роль, например, маляра. Если окрашиваемую деталь зарядить положительно, а частицы краски — отрицательно, то частицы краски устремляются к положительно заряженной детали. Поскольку частицы краски заряжены одноимённо, то они отталкиваются друг от друга, и поэтому слой краски получается равномерным. За счёт притяжения частиц к детали этот слой получается плотным и прочным. Расход краски при этом снижается, так как она осаждается тонким слоем и только на детали.

С помощью статического электричества во много раз ускоряется процесс копчения. При электрокопчении частицы коптильного дыма заряжаются положительно, а сам продукт, подвергаемый копчению (например, тушка рыбы), заряжается отрицательно. Частицы дыма, притягиваясь к тушке, быстро внедряются в неё. В этом и состоит процесс копчения.

Вспомните опыт по взаимодействию мелких кусочков бумаги с наэлектризованной палочкой (см. рис. 53, *а*). Где этот эффект можно использовать? Там, где лёгкие продолговатые частицы нужно ориентировать в определённом направлении, например при ворсовании тканей. Материал, на котором требуется получить слой ворса, заземляют. На его поверхность наносят клеящее вещество, а затем через заряженную металлическую сетку, расположенную

над этой поверхностью, пропускают ворс. Ворсинки в электрическом поле между материалом и сеткой ориентируются строго перпендикулярно к поверхности материала и оседают на клей равномерным слоем. Так получаются покрытия, похожие на бархат и замшу.

А если частицам двух различных веществ сообщить электрические заряды противоположных знаков, то что должно произойти с этими частицами при перемешивании веществ? Частицы будут притягиваться друг к другу, и в результате образуется однородная смесь.

Этот эффект используется на хлебозаводах для изготовления теста. Заряженные положительно крупинки муки воздушным потоком подаются в камеру, где они перемешиваются с отрицательно заряженными капельками воды, содержащей дрожжи. Крупинки муки и капельки воды, взаимно притягиваясь (рис. 70), образуют однородное тесто.

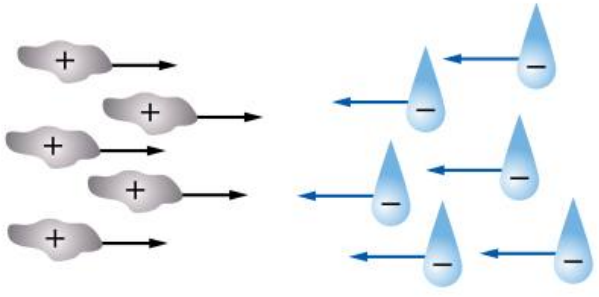


Рис. 70. Взаимное притяжение положительно заряженных крупинок муки и отрицательно заряженных капель воды

1. Как уменьшить вредное действие статического электричества? 2. Как увеличить полезное действие статического электричества? 3. Приведите примеры проявления вредных свойств статического электричества. 4. Почему между ремнём и шкивом, на который он надет, во время работы иногда проскакивает искра?

1. Почему при переливании бензина из одной цистерны в другую он может воспламениться? Какие специальные меры предосторожности необходимо предпринять?

2. В установках для улавливания пыли пропускают воздух через металлические трубы, по оси которых протягивается металлическая проволока. Проволока имеет отрицательный заряд, а труба — положительный. Между ними создаётся сильное электрическое поле. Как будут вести себя пылинки: а) незаряженные; б) заряженные положительно или отрицательно?

УПРАЖНЕНИЕ 26

1. Почему при заправке самолёта горючим и самолёт, и бензозаправщик заземляют?

2. Почему нити прилипают к гребням чесальных машин, применяющихся в текстильной промышленности, и при этом путаются и часто рвутся? Зачем в таких цехах искусственно создают повышенную влажность?

3. Почему ворсинки и пыль прилипают к одежде при чистке её щёткой? Почему, если щётка влажная, это явление не происходит?

ЗАДАНИЕ 17

- Составьте таблицу, в которой укажите: вредные и полезные проявления статического электричества в быту; условия, при которых эти проявления вы обнаружили. Есть ли явления, которые исчезают при изменении внешних условий?

§ 34 ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК. ИСТОЧНИКИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА

Вы уже знаете, что заряженные частицы могут передвигаться, или, как говорят, может происходить движение электрического заряда.

Упорядоченное (направленное) движение заряженных частиц называют электрическим током.

Для существования в проводнике электрического тока необходимо, чтобы в нём были заряженные частицы, которые могут передвигаться по всему проводнику. Их называют ***свободными зарядами***. В зависимости от вещества свободными зарядами могут быть электроны (в металлах) или положительные и отрицательные ионы (в электролитах). Кроме того, нужно, чтобы существовали силы, заставляющие свободные заряды двигаться в определённом направлении.

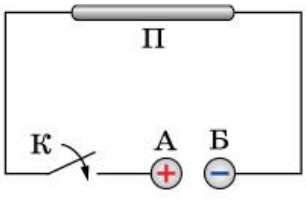


Рис. 71. Протекание электрического тока по проводнику

Рассмотрим опыт, схема которого изображена на рисунке 71. Проводник П соединён проводами с металлическими телами А и Б, которым сообщены одинаковые по модулю, но противоположные по знаку заряды. Тела А и Б

находятся близко друг к другу. Устройство К называют ключом. Оно служит для подключения проводника П к заряженным телам А и Б или отключения от них. Что же происходит с проводником при замыкании ключа?

Под действием электрического поля, создаваемого заряженными телами А и Б, свободные электроны внутри проводника (а также проводов) начинают двигаться упорядоченно, возникает электрический ток. Электрический ток в металлических проводниках — это упорядоченное движение свободных электронов.

Причина электрического тока в металлах — действие электрического поля на свободные электроны.

А что происходит с заряженными телами А и Б (см. рис. 71) при протекании электрического тока? Электроны в проводах и проводнике П движутся так, что они «сбегают» от заряженного тела Б к заряженному телу А. Это «переселение» электронов закончится тогда, когда тела А и Б разрядятся, т. е. станут электрически нейтральными. Поэтому если мы хотим поддерживать электрический ток, то нужно каким-то образом «подзаряжать» тело А положительным зарядом, а тело Б отрицательным. Устройства, называемые ***источниками электрического тока***, как раз и выполняют такую задачу.

В источниках тока совершается работа по разделению нейтральных молекул на положительно и отрицательно заряженные частицы. Эти частицы накапливаются на ***полюсах*** источника тока — местах, к которым подсоединяются проводники (полюсы источника тока подобны телам А и Б (см. рис. 71)). Один полюс источника тока называют *положительным*, другой — *отрицательным*.

На заре развития учения об электрическом токе считалось, что в металлических проводниках могут перемещаться и положительные, и отрицательные заряды. Об ионах и электронах тогда ещё не знали. Условно было принято

за направление электрического тока считать направление, по которому движутся (или могут двигаться) положительные заряды, т. е. *направление от положительного полюса источника тока к отрицательному*. Это правило действует и поныне.

Если проводник П соединить проводами не с телами А и Б (см. рис. 71), а с полюсами источника тока, то при замыкании ключа К ток по проводам и через проводник П будет течь до тех пор, пока источник тока способен разделять заряды. При этом разделении происходит превращение механической, химической, внутренней или какой-нибудь другой энергии в энергию электрического поля, которое, действуя на электроны, создаёт электрический ток.



Рис. 72. Электрофорная машина

Существует много типов источников тока. В ***электрофорной машине*** (рис. 72) механическая энергия превращается в электрическую. В ***термоэлементе*** (рис. 73) внутренняя энергия превращается в электрическую. При этом электрический ток возникает в проволоках, изготовленных из разных металлов, при нагревании места их соединения (спая). А в ***фотоэлементе*** в электрическую энергию превращается энергия излучения (рис. 74).

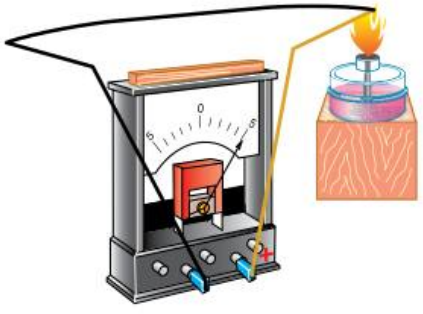


Рис. 73. Превращение внутренней энергии в электрическую

В быту часто используют источники тока, называемые ***гальваническими элементами*** (рис. 75). В гальванических элементах происходит превращение химической энергии в электрическую. Раз-

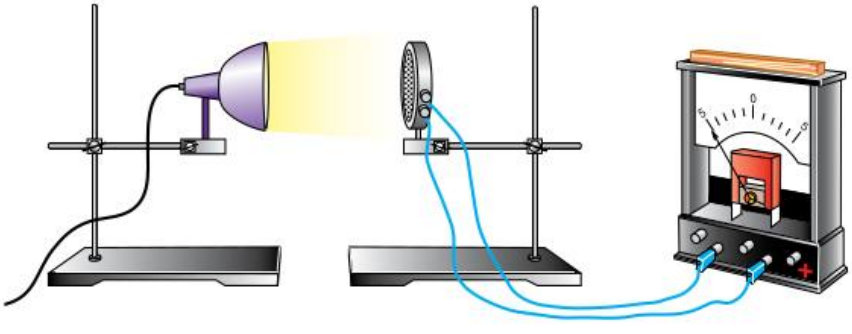


Рис. 74. Превращение энергии излучения в электрическую

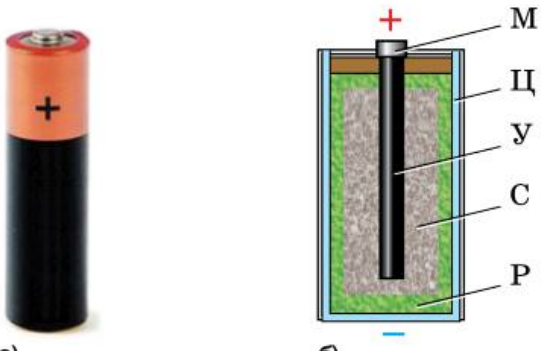


Рис. 75. Гальванический элемент (батарейка):
а — внешний вид;
б — устройство

личают гальванические элементы одноразового действия — батарейки (рис. 75, *а*) и ***аккумуляторы*** (от лат. *accumulator* — собиратель) — гальванические элементы многоразового действия (рис. 76, *а*).

Батарейка представляет собой довольно сложное устройство, которое разделяет электрические заряды в результате химических реакций. На рисунке 75, *б* изображено устройство батарейки, состоящей из цинкового сосуда Ц, в который вставлен угольный стержень У с металлической крышкой М. Угольный стержень окружён смесью оксида марганца (IV) MnO_2 и размельчённого графита С. Пространство между цинковым корпусом и смесью оксида марганца с графитом заполнено желеобразным раствором соли (хлорида аммония NH_4Cl) Р.

Химическая реакция цинка Zn с хлоридом аммония NH_4Cl приводит к тому, что цинковый сосуд становится отрицательно заряженным. Его называют *отрицательным электродом*. Смесь оксида марганца с графитом заряжается положительно, её заряд передаётся с помощью угольного стержня. Его называют *положительным электродом*. Между разноимённо заряженными электродами возникает электрическое поле. Если электроды такого источника соединить проводником, то свободные заряды в нём начнут двигаться упорядоченно, т. е. возникнет электрический ток.



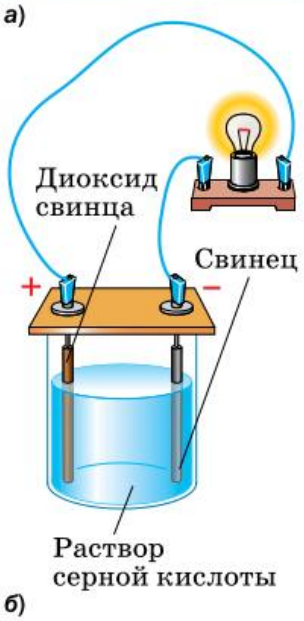


Рис. 76. Аккумулятор:
а — внешний вид;
б — принцип действия



а)



б)

Батарея аккумуляторов для питания:
а — мобильного телефона;
б — ноутбука

Рассмотрим простейший аккумулятор, который состоит из двух свинцовых пластин (электродов), помещённых в раствор серной кислоты (рис. 76, *б*). Для того чтобы аккумулятор работал как источник тока, через него вначале пропускают ток от какого-либо другого источника. При этом в результате протекания химических реакций один электрод аккумулятора становится положительно заряженным (обозначается знаком «+»), а другой — отрицательно заряженным (обозначается знаком «−»). После того, как аккумулятор разрядится, его подзаряжают тем же способом.

Чем больше площадь электродов батареек и аккумуляторов, тем больший ток они могут давать. Чтобы увеличить площадь электродов, их поверхность можно покрыть проводящими нанокристаллами. В результате активная площадь обмена заряженными частицами увеличивается в сотни раз. Аккумуляторы, пластины которых покрыты нанокристаллами, способны заряжаться всего за несколько минут.

Используются аккумуляторы для освещения автомобилей, железнодорожных вагонов, для запуска двигателей автомобилей, для питания радиопередатчиков, телефонов и другой аппаратуры.

Существуют и другие источники тока. Так, на электростанциях используют устройства, преобразующие механическую энергию в электрическую, — ***генераторы*** (от лат. *generator* — создатель, производитель). Электрический ток от таких источников применяют в промышленности, на транспорте и в быту.

1. Что такое электрический ток? **2.** Каковы условия существования электрического тока? **3.** Направление движения каких частиц в проводнике принято за направление электрического тока? **4.** От какого полюса источника тока и к какому направлен ток в проводнике, присоединённом к источнику? **5.** Какие превращения энергии происходят внутри источника тока? **6.** Каково устройство гальванического элемента? **7.** Что является положительным и отрицательным полю-

сами батарейки? **8.** Каково устройство аккумулятора? **9.** Где применяют аккумуляторы?

1. Касаясь рукой стержня электроскопа, его разрядили. Можно ли говорить о наличии электрического тока в стержне электроскопа при его разрядке?

2. Капля дождя в процессе падения на землю электризуется. Можно ли говорить о наличии электрического тока между облаком и землёй?

УПРАЖНЕНИЕ 27

1. В чём преимущество аккумулятора перед гальваническим элементом?

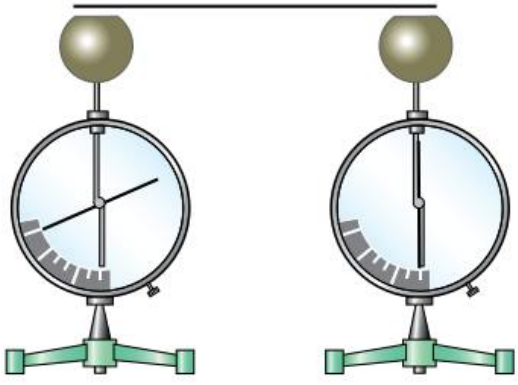


Рис. 77

2. На рисунке 77 изображены заряженный и незаряженный электрометры. Потечёт ли электрический ток по металлическому стержню, если им коснуться одновременно шариков электрометров?

3. Имеется заряженный электроскоп и металлический стержень. Что нужно сделать, чтобы по стержню потёк электрический ток?

4. В чём главное отличие электрического тока, возникающего в соединяющем полюсы гальванического элемента металлическом проводнике, от тока, возникающего при разрядке электрометра?

§ 35 ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ЦЕПЬ И ЕЁ СОСТАВНЫЕ ЧАСТИ

Для того чтобы поддерживать электрический ток, необходим проводник или несколько проводников и источник тока. Соединённые вместе, они образуют *электрическую цепь*. Всякая электрическая цепь состоит из двух частей: внутренней и внешней. Во внутреннюю цепь входит *источник тока*. Внешняя цепь включает в себя *проводники-потребители*: лампочки, электронагревательные приборы, электродвигатели, приборы для измерения параметров цепи, провода.

Электрическая энергия от источника тока к потребителю поставляется с помощью проводов.

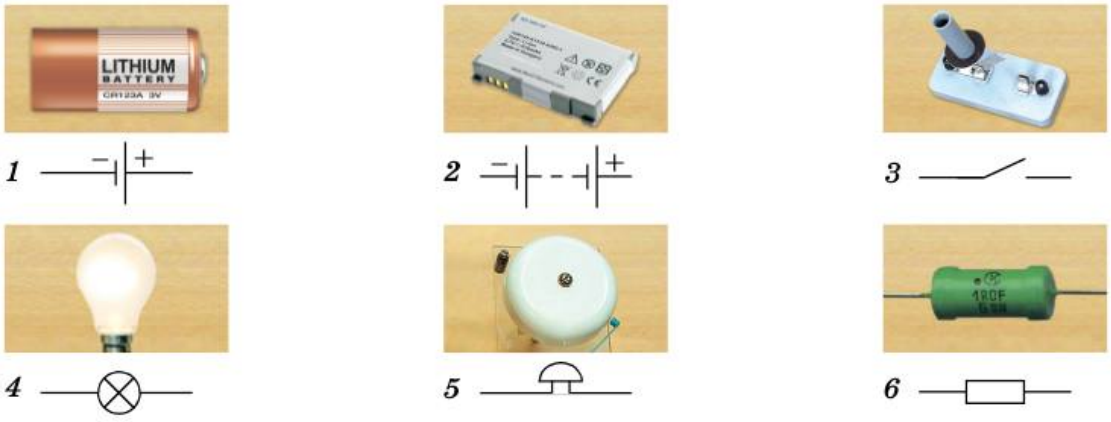


Рис. 78. Условные обозначения, применяемые на схемах:
1 — гальванический элемент или аккумулятор; *2* — батарея элементов или аккумуляторов; *3* — ключ; *4* — электрическая лампа; *5* — электрический звонок; *6* — резистор (проводник, имеющий определённое сопротивление)

Для подключения и отключения потребителей от источника тока используются *замыкающие* и *размыкающие устройства*: ключи, рубильники, кнопки, выключатели.

Электрический ток может протекать только там, где есть свободные заряды. То есть на пути протекания электрического тока должны встречаться только проводники. Поэтому всякая электрическая цепь должна быть *замкнута* для того, чтобы в ней шёл ток.

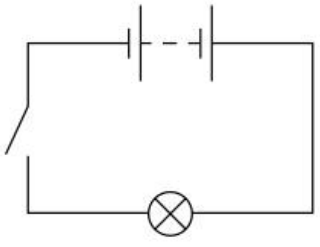


Рис. 79. Схема простейшей электрической цепи

Современные электрические установки часто состоят из такого большого количества частей, что словесное описание соединений в них заняло бы много времени. Для того чтобы показать, из каких элементов состоит электрическая цепь и как они соединены между собой, используют чертежи — *электрические схемы*. На схемах элементы цепи обозначают условными знаками (рис. 78). На рисунке 79 изображена схема простейшей электрической цепи.

1. Что такое электрическая цепь? **2.** Из каких частей состоит электрическая цепь? **3.** Приведите примеры проводников — потребителей электрической энергии. **4.** Что значит «электрическая цепь замкнута»? **5.** Почему при размыкании ключа электрический ток в цепи прекращается?

УПРАЖНЕНИЕ 28

1. Как объяснить возникновение электрического тока в цепи?
2. Покажите стрелками направление электрического тока в электрической цепи, схема которой изображена на рисунке 79. Из каких элементов состоит эта цепь?
3. Начертите схему электрической цепи карманного фонарика с тремя лампами, который работает от батарейки. Лампы зажигаются одновременно.

§ 36 ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК В МЕТАЛЛАХ

Рассмотрим процесс образования электрического тока в металлах. Металлы в твёрдом состоянии имеют кристаллическое строение. Входящие в состав атома электроны находятся на различных расстояниях от его ядра. Электроны, расположенные относительно близко к ядру, прочно связаны с ним. Наиболее удалённые от ядра электроны связаны с ним значительно слабее, чем внутренние. У металлов эти электроны так слабо связаны со своими ядрами, что они легко отрываются от ядер и становятся свободными.

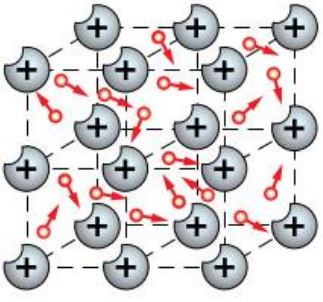


Рис. 80. Кристаллическая решётка металла

В узлах кристаллической решётки металлов расположены положительно заряженные ионы, которые совершают колебания около положений равновесия. Между ионами беспорядочно движутся свободные электроны (рис. 80). После создания в металлическом проводнике электрического поля именно свободные электроны начинают смещаться в сторону положительного полюса источника тока, образуя электрический ток, а ионы остаются на своих местах.

Тот факт, что электрический ток в металлах представляет собой движение электронов, был подтверждён экспериментально. В 1901 г. немецкий физик ***Карл Рикке*** (1845—1915) проделал следующий опыт. Три цилиндра — два медных и один алюминиевый, с тщательно отполированными торцами, ставили друг на дру-



ЛЕОНИД ИСААКОВИЧ МАНДЕЛЬШТАМ

(1879—1944)

Российский физик, академик. Один из основателей отечественной школы в области теории нелинейных колебаний и радиофизики

га (медный, алюминиевый и снова медный) и присоединяли к источнику тока. В течение года по такому проводнику пропускали электрический ток, но никаких химических изменений в цилиндрах не обнаружили. Был сделан вывод, что ток в металлах представляет собой движение частиц, не имеющих отношения к химическому составу металлов, т. е. двигались не ионы, которые у различных металлов разные, а электроны.

Затем в 1913 г. российские физики ***Леонид Исаакович Мандельштам*** и ***Николай Дмитриевич Папалекси*** (1880—1947) поставили оригинальный опыт, в котором катушку, состоявшую из большого числа витков, приводили в быстрое вращение, затем тормозили. Если в момент торможения в катушке возникает электрический ток, то он обусловлен движением свободных заряженных частиц, которые по инерции продолжают направленное движение в проводнике. Опыт показал наличие кратковременного тока при резком торможении катушки.



Модель электрического тока в металлах

Усовершенствовав этот опыт, американские физики ***Томас Стюарт*** (1895—1958) и ***Ричард Толмен*** (1881—1948) в 1916 г. по направлению тока в катушке определили знак заряда частиц — отрицательный. Кроме того, учёные вычислили отношение заряда частиц к их массе. Оно оказалось приблизительно одинаковым для всех металлов и равно такому отношению для электрона.

Таким образом, на опыте было подтверждено, что *электрический ток в металлических проводниках представляет собой упорядоченное движение свободных электронов*.

При возникновении электрического тока в проводнике свободные электроны движутся по направлению к положительному полюсу источника тока, сохраняя своё хаотическое движе-

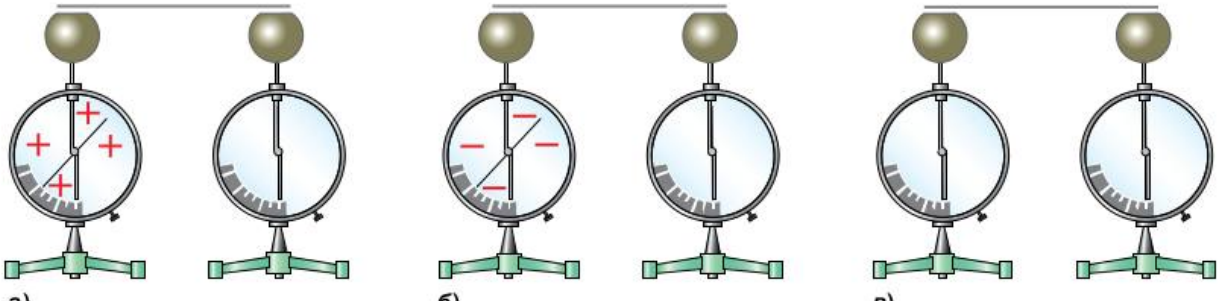
ние. Подобное движение наблюдается, когда рой беспорядочно толкущейся мошкары перемещается в определённом направлении под действием ветра. Скорость хаотического движения электронов очень велика, примерно сто километров в секунду. Скорость же возникающего направленного движения электронов мала, примерно миллиметры в секунду. Почему же, несмотря на малую скорость направленного движения электронов, электрическая лампочка зажигается сразу после замыкания цепи?

Дело в том, что электрическое поле в проводнике распространяется практически мгновенно, и движение свободных электронов возникает на всём протяжении проводника почти одновременно. Поэтому, когда говорят о скорости распространения электрического тока в проводнике, то имеют в виду скорость распространения по проводнику электрического поля.

1. Какие частицы образуют электрический ток в металлах? Почему именно они? **2.** Как движутся электроны металла при возникновении в нём электрического поля? **3.** Опишите эксперименты, установившие природу электрического тока в металлах. **4.** Скорость направленного движения электронов в проводах вашей квартиры составляет доли миллиметра в секунду. Почему же при нажатии на клавишу выключателя лампочка вспыхивает сразу?

УПРАЖНЕНИЕ 29

1. Рассмотрите рисунок 81 и укажите, в каком направлении будут двигаться электроны в металлическом стержне после соединения им электрометров. Ответ поясните.



а) *б*) *в*)

Рис. 81

2. Сравните направление электрического тока в цепи, схема которой показана на рисунке 71, и направление движения электронов.

3. В чём различие в движении свободных электронов в металлическом проводнике, когда он присоединён к источнику тока и когда отключён от него?

§ 37 ДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА

Свободные носители заряда (электроны и ионы), создающие электрический ток, очень малы, поэтому увидеть их направленное движение нельзя. О наличии электрического тока можно судить по тем явлениям, которые он вызывает. Эти явления называют ***действиями тока***.

Вам хорошо известно ***тепловое действие электрического тока***: нагревание проводника при прохождении по нему электрического тока. Такое нагревание свойственно и металлам, и электролитам.

Рассмотрим для примера металлические проводники. Под действием электрического поля свободные электроны начинают двигаться направленно, сохраняя хаотическое движение, в то время как ионы продолжают хаотически колебаться в узлах кристаллической решётки. Разогнанные электрическим полем электроны соударяются с ионами кристаллической решётки и передают им часть своей энергии.



Контактная электросварка

В результате происходит увеличение кинетической энергии ионов кристаллической решётки, т. е. увеличивается температура и внутренняя энергия проводника. Проволока, по которой проходит ток (рис. 82), нагревается, удлиняется и слегка провисает.

Тепловое действие электрического тока используется в быту, например в электронагревательных приборах. Примером использования теплового действия тока в технике может служить контактная электросварка. Свариваемые детали закрепляют между зажимами, приво-

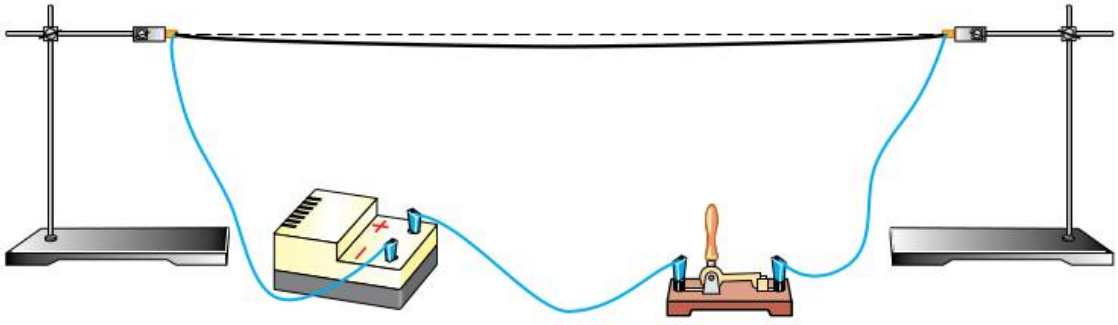


Рис. 82. Тепловое действие тока

дят в соприкосновение и пропускают через них электрический ток. В месте контакта будет выделяться наибольшее количество теплоты, в результате металл сильно нагреется. Когда он становится пластичным, ток автоматически выключается, и машина сжимает размягчённые части деталей настолько сильно, что они прочно соединяются.

Протекание электрического тока вызывает не только изменение внутренней энергии проводника (его нагревание), но и другие явления.

Рассмотрим процессы, происходящие при протекании электрического тока по расплаву поваренной соли (хлорида натрия). При сильном нагревании твёрдый хлорид натрия плавится, его кристаллическая решётка разрушается. Полученный расплав содержит положительные ионы натрия и отрицательные ионы хлора, которые могут перемещаться под действием электрического поля. Поэтому такой расплав проводит электрический ток.

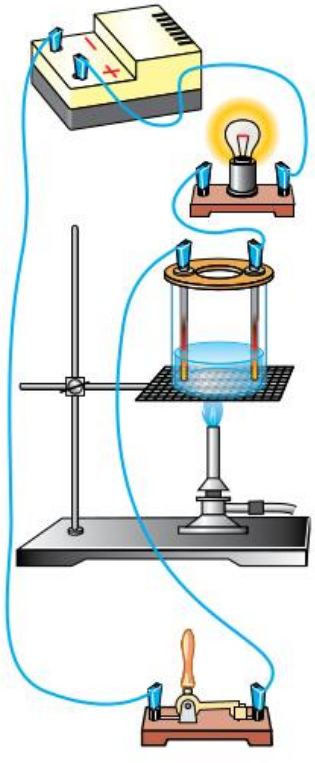


Рис. 83. Химическое действие тока

Раствор или расплав вещества, через который может идти ток, называют *электролитом* (при этом исходное вещество проводником не является). *Электрический ток в электролитах представляет собой направленное движение свободных положительных и отрицательных ионов.*

Пусть в расплаве поваренной соли находятся два угольных стержня (рис. 83), один из ко-

торых — *анод* — соединён с положительным полюсом источника тока, а другой — *катод* — с отрицательным полюсом. Электрическое поле между стержнями (электродами) заставляет положительные ионы натрия двигаться к катоду, а отрицательно заряженные ионы хлора — к аноду. В расплаве существует электрический ток, и лампочка горит (см. рис. 83).

На поверхности катода ион натрия захватывает электрон, так как у отрицательного стержня их избыток, и превращается в нейтральный атом натрия. На поверхности анода ион хлора отдаёт электрон, превращаясь в нейтральный атом хлора. На аноде выделяется хлор, на катоде — натрий. Хлорид натрия превращается в натрий и хлор, т. е. происходит химическая реакция.

Химическая реакция, протекающая на поверхности электрода, называется ***электролизом*** и является проявлением ***химического действия тока***.

Ещё одним действием тока является ***магнитное действие***. Его можно наблюдать на опыте. Возьмём железный гвоздь, намотаем на него медный провод, покрытый изоляционным материалом. Концы провода через ключ соединим с источником тока. При замыкании цепи гвоздь намагничивается (становится магнитом) и притягивает небольшие железные предметы (рис. 84): гвоздики, булавки, металлические опилки. При размыкании цепи гвоздь размагничивается и железные предметы отпадают.

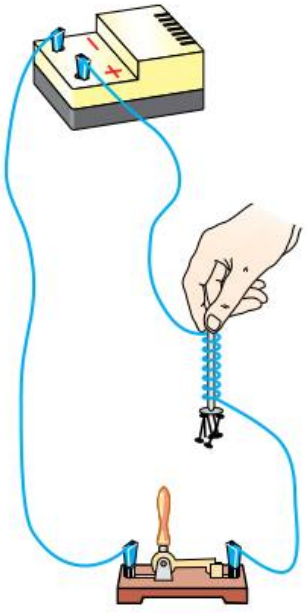


Рис. 84. Магнитное действие тока

Взаимодействие проводника (небольшой рамки) с током и магнита — также проявление магнитного действия тока. Рамку из тонкой медной проволоки подвесим на штативе. Присоединим концы проволоки к полюсам источника тока. При замкнутом ключе в проводнике существует электрический ток, рамка находится в покое (рис. 85). Поместим теперь её между

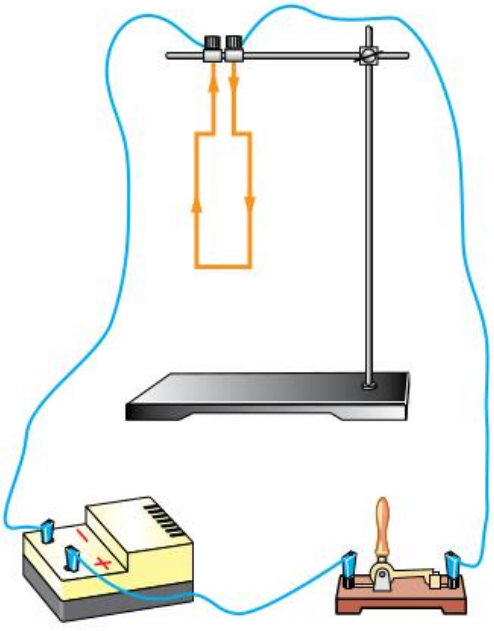


Рис. 85. Рамка с током неподвижна

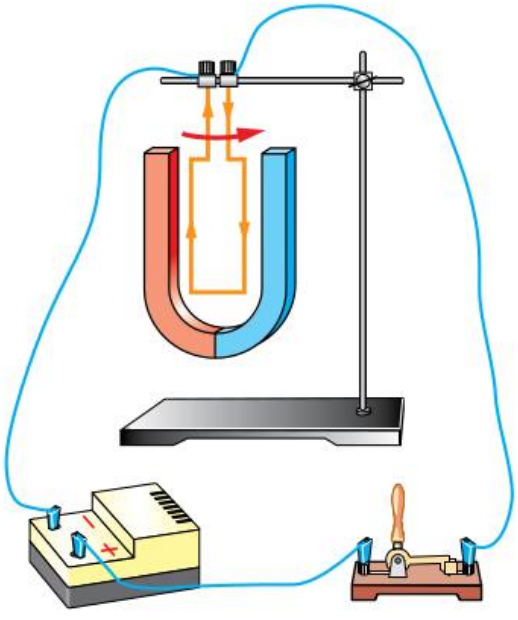
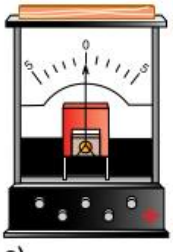


Рис. 86. Рамка с током между полюсами магнита поворачивается

полюсами магнита и снова замкнём ключ. Рамка начнёт поворачиваться (рис. 86).

На явлении взаимодействия рамки (катушки) с током и магнита основана работа прибора — ***гальванометра*** (рис. 87). При появлении тока в подвижной катушке связанная с ней стрелка прибора будет отклоняться. С помощью гальванометра можно судить о наличии электрического тока в цепи и его направлении.



а)



б)

Рис. 87. Гальванометр: *а* — внешний вид; *б* — условное обозначение на схемах

1. На каком опыте можно показать тепловое действие тока? **2.** Какие заряженные частицы образуют электрический ток в электролитах? **3.** Как называют электрод, соединённый с положительным полюсом источника тока; отрицательным полюсом источника тока? **4.** Где используют тепловое действие тока; химическое действие тока? **5.** При-

ведите примеры магнитного действия тока. **6.** Какое действие тока используют в работе гальванометра?

1. Почему нельзя гасить огонь, вызванный электрическим током, водой или жидкостным огнетушителем, а необходимо применять сухой песок или пескоструйный огнетушитель?

2. Имеет ли значение для теплового действия тока его направление?

3. Для изготовления медной копии рельефного изделия (медали, гравюры и т. д.) поступают следующим образом. С предмета делают восковой слепок и покрывают его поверхность тонким слоем графита, чтобы она стала проводящей. Затем слепок помещают в ванну с раствором медного купороса и пропускают через раствор электрический ток. В чём идея этого способа?

ЗАДАНИЕ 18

1. Возьмите батарейку: «плоскую» или «Крона». Приложите контакты батарейки к свежему срезу картофеля (рис. 88). Через несколько минут рассмотрите следы от контактов на картофеле. Опишите наблюдаемую картину.

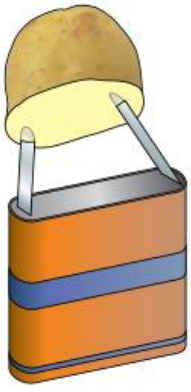


Рис. 88

2. Сделайте простейший гальванический элемент и гальваноскоп и проверьте их действие.

Возьмите кислое яблоко или солёный помидор и воткните в него две проволочки: железную и медную (вместо железной проволоки лучше взять цинковую пластинку). Гальванический элемент готов (рис. 89).

Гальваноскоп — прибор для обнаружения очень слабых токов. Для его изготовления моток тонкой изолированной проволоки прикрепите к небольшой дощечке, в середину которой вставьте иглу остриём вверх. На остриё положите маленькую магнитную стрелку (рис. 90) (можно поместить внутри мотка компас). Дайте магнитной стрелке установиться в направлении магнитного меридиана. Замкните электрическую цепь (см. рис. 90). Отклонение стрелки гальваноскопа покажет наличие электрического тока, созданного в проводнике вашим гальваническим элементом.



Рис. 89

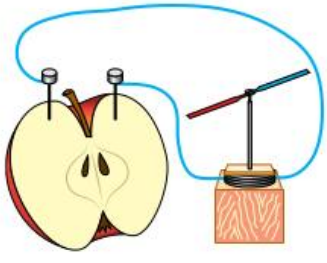


Рис. 90

Это любопытно...

Аккумуляторы

В технике широко распространены два вида аккумуляторов: *кислотные* и *щелочные*. ***Кислотные аккумуляторы*** состоят из пластин, опущенных в раствор серной кислоты (см. рис. 76, *б*). Отрицательные пластины делаются из чистого свинца с сильно разрыхлённой поверхностью; положительные пластины покрыты диоксидом свинца. При разрядке аккумулятора обе пластины постепенно покрываются сульфатом свинца. При зарядке различие в составе положительных и отрицательных пластин восстанавливается электролизом. В процессе зарядки аккумулятора ионы водорода (H^+) перемещаются в направлении тока, а ионы, образовавшиеся в результате разложения серной кислоты (SO^{2-}), движутся в противоположном направлении.

В ***щелочных аккумуляторах*** пластины и сосуды изготавливают из железа. Железные пластины опускают в раствор гидроксида калия (KOH) или гидроксида натрия (NaOH) в дистиллированной воде. И тот и другой растворы являются щелочными, поэтому и аккумуляторы называют щелочными. Они удобны при перевозке, так как не боятся сотрясений. Щелочные аккумуляторы отличаются прочностью конструкции, не выделяют в процессе работы и при зарядке вредных газов, не боятся перегрузки и могут долго оставаться в полуразряженном или разряженном состоянии. Кислотные аккумуляторы имеют большее рабочее напряжение и больший коэффициент полезного действия, чем щелочные.

Аккумуляторы используют в автомобилях, самолётах, поездах с электрическим освещением, на телефонных станциях, подводных лодках и т. д.

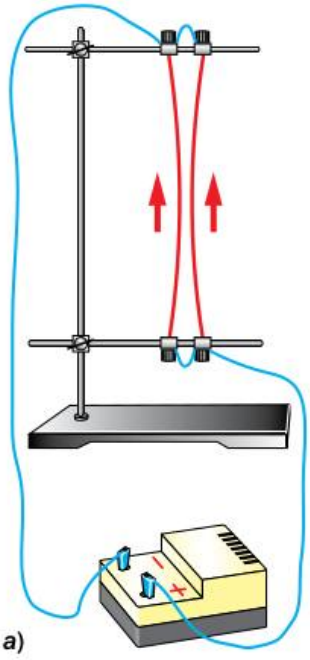
ЗАДАНИЕ 19

- В настройках вашего смартфона найдите название его модели. Используя Интернет, выясните:
относится ли аккумулятор вашего смартфона к одному из двух видов, рассмотренных выше, или же в смартфоне используется аккумулятор другого вида; какие частицы образуют электрический ток внутри этого аккумулятора и какие — во внешней цепи.

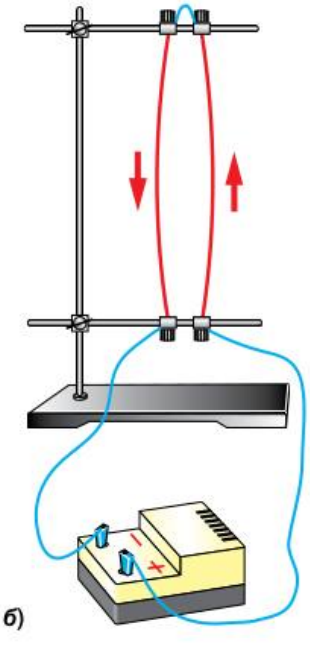
§ 38 СИЛА ТОКА. ИЗМЕРЕНИЕ СИЛЫ ТОКА

Как вам известно, электрический ток представляет собой упорядоченное движение свободных заряженных частиц. О существовании электрического тока судят по его действиям,

$$I = \frac{q}{t}$$



а)



б)

Рис. 91. Взаимодействие проводников с током

например тепловому. Интенсивность действия тока бывает разной.

Чем больше электрический заряд, перенесённый частицами через поперечное сечение проводника за некоторое время, тем интенсивнее действие тока. Для количественной характеристики электрического тока вводят величину — *силу тока*.

Физическую величину, равную отношению электрического заряда, прошедшего через поперечное сечение проводника, ко времени его прохождения, называют силой тока.

Обозначим силу тока буквой I, общий электрический заряд — q, время — t. Тогда силу тока можно определить по формуле:

$$I = \frac{q}{t}.$$

Если с течением времени сила тока и его направление не изменяются, то ток называют *постоянным электрическим током*.

Единицу силы тока можно установить по единице заряда. Вы знаете, что единицей заряда в СИ является кулон. Однако не будем торопиться использовать эту единицу, поскольку её физический смысл пока не ясен.

На IX Генеральной конференции по мерам и весам в 1948 г. единицу силы тока решили определять по явлению взаимодействия двух проводников с током (рис. 91).

По двум проводникам, расположенным параллельно друг другу, пропускают электрический ток. В зависимости от направления тока в проводниках они либо притягиваются (рис. 91, *а*), либо отталкиваются (рис. 91, *б*). При изменении силы тока в проводниках сила взаимодействия между ними также меняется: чем больше сила тока, тем сильнее они притягиваются или отталкиваются. Эту силу можно измерить.



АНДРЕ МАРИ АМПЕР

(1775—1836)

Французский физик и математик, создал первую теорию, которая выражала связь электрических и магнитных явлений. Ввёл в физику понятие «электрический ток»

Как было подтверждено экспериментально, сила взаимодействия проводников зависит не только от силы тока в них, но ещё от расстояния между проводниками, их длины и среды, в которой они находятся. Если взять гибкие, тонкие и очень длинные проводники, расположить их параллельно друг другу на расстоянии 1 м в вакууме, то при одинаковой силе тока в проводниках сила их взаимодействия будет иметь определённое значение.

За единицу силы тока приняли силу такого тока, протекание которого по двум тонким длинным параллельным проводникам, находящимся в вакууме на расстоянии 1 м *друг от друга, вызывает их взаимодействие с силой* $2 \cdot 10^{-7}$ Н, *приходящейся на каждый метр длины проводников.*

Единицу силы тока в СИ назвали *ампером* **(А)** в честь французского учёного ***Андре Ампера***.

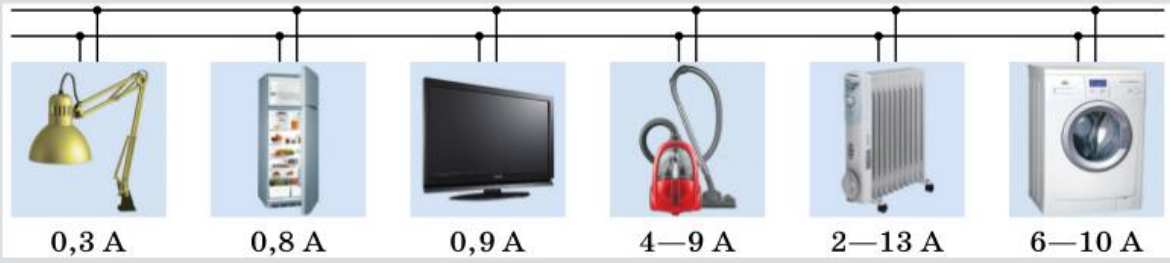
В настоящее время точность определения ампера на основе взаимодействия проводников с током оказалась недостаточной. В 2019 г. вступило в силу новое определение ампера, основанное на дискретности электрического заряда. Согласно этому определению, 1 А — *это сила тока, соответствующего потоку* $\frac{1}{1{,}602176634 \cdot 10^{-19}}$ *элементарных зарядов в секунду.*

Благодаря развитию современных технологий оказалось возможным создать аппаратуру, позволяющую воспроизводить ампер в соответствии с новым определением.

$1\ А = 10^3\ мА$
$1\ А = 10^6\ мкА$
$1\ А = 10^{-3}\ кА$

На практике используются дольные и кратные единицы силы тока: *миллиампер* **(мА)**, *микроампер* **(мкА)**, *килоампер* **(кА)**.

$$1\ мА = 0{,}001\ А = 10^{-3}\ А;$$
$$1\ мкА = 0{,}000001\ А = 10^{-6}\ А;$$
$$1\ кА = 1000\ А = 10^3\ А.$$



Сила тока в различных потребителях электроэнергии

Для человеческого организма безопасной считается сила тока до 1 мА, сила тока больше 100 мА приводит к поражениям организма.

Единицу заряда — кулон — устанавливают по единице силы тока.

Из формулы $I = \frac{q}{t}$ выразим электрический заряд:

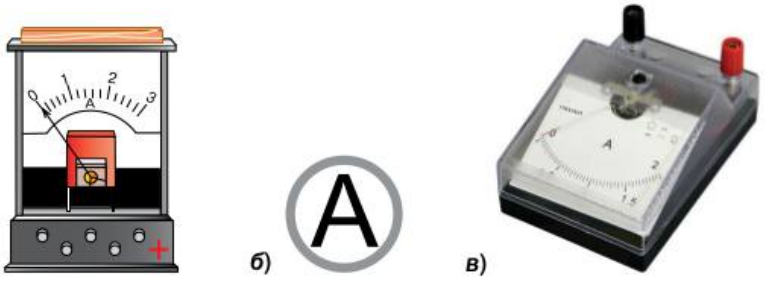
$$q = It.$$

1 Кл — *это электрический заряд, проходящий через поперечное сечение проводника за* 1 с *при силе тока в проводнике* 1 А.

$$1\ \text{Кл} = 1\ \text{А} \cdot \text{с}.$$

Обратим внимание, что современное определение ампера фиксирует значение элементарного заряда равным в точности $1{,}602176634 \cdot 10^{-19}$ Кл.

На практике силу тока в цепи измеряют ***амперметром***. По принципу действия и устройству амперметр похож на гальванометр. Чтобы различать эти приборы, на шкале амперметра ставят букву А (рис. 92). Амперметр, включённый в электрическую цепь, почти не меняет в ней силу тока.



а) б) в)

Рис. 92. Амперметр:
а — демонстрационный;
б — условное обозначение на схемах;
в — лабораторный

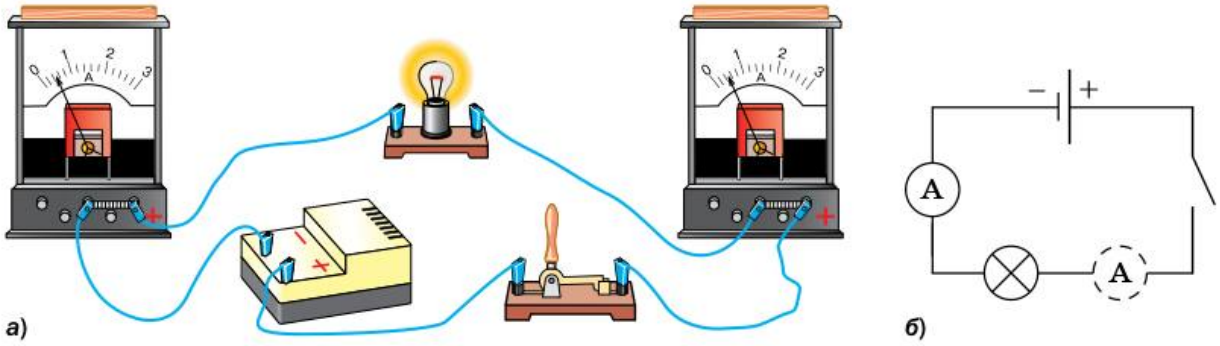


Рис. 93. Измерение силы тока на разных участках электрической цепи

Включается амперметр в цепь так, что конец одного проводника соединяется с началом другого. Такое включение называют *последовательным*. Клемму амперметра со знаком «+» надо соединять с проводом, идущим от положительного полюса источника тока (рис. 93, *а*). При этом заряд, проходящий через любое поперечное сечение проводника в единицу времени, одинаков, поскольку заряд нигде не накапливается. Поэтому амперметр можно включать в любой участок последовательной цепи (рис. 93, *б*).

1. Что называют силой тока? **2.** По какой формуле можно определить силу тока? **3.** Как называют единицу силы тока? Как читаются названия единиц, обозначаемых 1 мА, 1 мкА, 1 кА? **4.** Как определить электрический заряд, зная силу тока в проводнике и время его прохождения? **5.** Каким прибором измеряют силу тока? **6.** Как включают в цепь амперметр?

Как правильно подключить элементы электрической цепи (см. рис. 93, *а*) при изменении полярности подключения источника тока?

УПРАЖНЕНИЕ 30

1. На цоколе электрической лампочки от карманного фонарика написано: «0,28 А». Что это означает?
2. Через спираль электроплитки за 2 мин прошёл электрический заряд 600 Кл. Какова сила тока в спирали?
3. Через поперечное сечение проводника за 2 с проходит $6 \cdot 10^{19}$ электронов. Какова сила тока в проводнике?
4. Сколько времени длится пуск стартёра автомобиля, если при силе тока 100 А за это время в цепи стартёра протекает электрический заряд 1000 Кл?

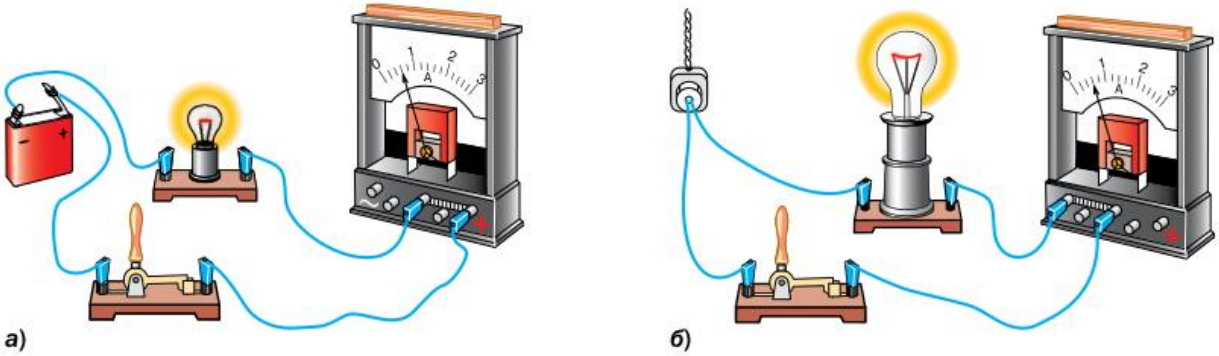
5. Две лампы соединены последовательно. Через первую лампу за 1,5 мин прошёл электрический заряд 90 Кл. Найдите силу тока через вторую лампу.

6. Какой электрический заряд проходит через поперечное сечение проводника за 1 с при силе тока 1 мА? Сколько электронов должно проходить через это сечение за 1 с, чтобы создать такую силу тока?

§ 39 ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ НАПРЯЖЕНИЕ. ИЗМЕРЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЯ

Как вы знаете, электрический ток представляет собой упорядоченное движение заряженных частиц. А движутся заряженные частицы в проводнике под действием сил со стороны электрического поля. При этом поле совершает работу. В результате энергия электрического поля превращается в другие виды энергии, например механическую, внутреннюю и т. п.

Соберём электрическую цепь, изображённую на рисунке 94, *а*. Замкнём ключ и увидим свечение лампочки. Рядом соберём другую цепь (рис. 94, *б*) и замкнём её. Обратим внимание на то, что показания амперметров в этих цепях одинаковы, значит, силы тока в лампах равны. Сравним свечение этих ламп: вторая горит ярче. Значит, несмотря на то, что за одно и то же время через каждую лампу проходит одинаковый заряд, во втором случае работа поля больше.



а) *б*)

Рис. 94. Различное свечение ламп при одной и той же силе тока:
а — источник тока — батарейка; *б* — источник тока — городская сеть

$$U = \frac{A}{q}$$

Чем больше время протекания тока, тем больше работа поля и перенесённый заряд. При этом *отношение* работы поля к перенесённому заряду не зависит от заряда. Оно является энергетической характеристикой самого электрического поля. Эту физическую величину называют ***электрическим напряжением*** (или просто *напряжением*).

Отношение работы электрического поля по перемещению электрического заряда между двумя точками цепи к этому заряду называют напряжением между данными точками.



АЛЕССАНДРО ВОЛЬТА

(1745—1827)

Итальянский физик, один из основателей учения об электрическом токе, создал первый гальванический элемент

Обозначим напряжение буквой U, работу — A, электрический заряд — q. Тогда напряжение можно вычислить по формуле:

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

Напряжение показывает, какую работу совершает электрическое поле при перемещении из одной точки в другую заряда, равного 1 Кл.

В СИ единица напряжения — *вольт* **(В)**. Она названа в честь итальянского физика ***Алессандро Вольты***.

Напряжение между двумя точками цепи равно 1 В, *если работа электрического поля по перемещению между этими точками заряда* 1 Кл *равна* 1 Дж.

$$1\ \text{В} = 1\ \frac{\text{Дж}}{\text{Кл}}.$$

$1\ \text{В} = 10^3\ \text{мВ}$
$1\ \text{В} = 10^{-3}\ \text{кВ}$

На практике используются также дольные и кратные единицы напряжения: *милливольт* **(мВ)** и *киловольт* **(кВ)**.

$$1\ \text{мВ} = 0{,}001\ \text{В} = 10^{-3}\ \text{В};$$
$$1\text{кВ} = 1000\ \text{В} = 10^3\ \text{В}.$$

Возьмите в руки батарейку, вы увидите, что на ней написано 1,5 В; 4,5 В; 9 В. Это значение напряжения, которое создают батарейки. По-

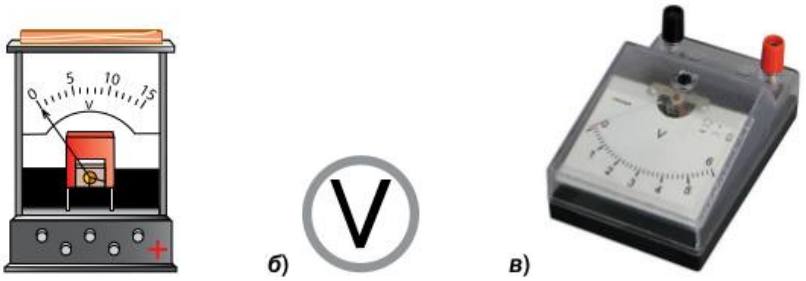


Рис. 95. Вольтметр:
а — демонстрационный;
б — условное обозначение на схемах;
в — лабораторный

купая электрические лампочки, вы также интересуетесь напряжением, на которое они рассчитаны.

Из формулы для расчёта напряжения получим:

$$A = Uq, \quad q = \frac{A}{U}.$$

Как вам известно, в источнике тока происходит разделение положительных и отрицательных зарядов. Вследствие этого на полюсах источника существует напряжение. Когда полюсы источника тока соединяют проводником, напряжение возникает на концах проводника. Этим обеспечивается существование в проводнике электрического тока. Если в цепи нет напряжения, следовательно, в ней нет тока, а это указывает на отсутствие электрического поля.

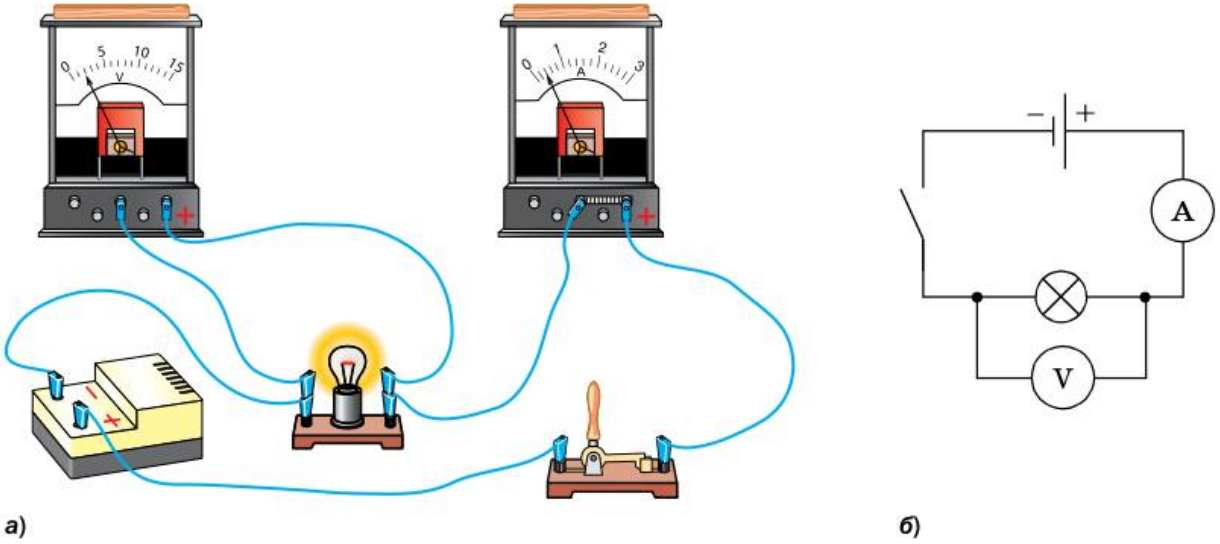


Рис. 96. Подключение вольтметра и амперметра в цепь

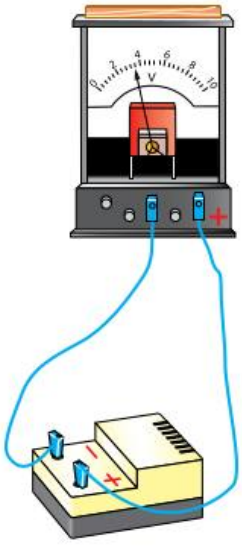


Рис. 97. Подключение вольтметра к источнику тока

Высокое напряжение опасно для жизни человека. Безопасным для человека считается напряжение до 36 В, если работа ведётся в сухом помещении, и до 12 В, если работа ведётся в сыром помещении.

Измеряется напряжение ***вольтметром*** (рис. 95), принцип работы и устройство которого похожи на гальванометр и амперметр. Шкала вольтметра градуируется в вольтах, на ней ставят букву V. Вольтметр измеряет напряжение на участке цепи, *параллельно* которому он подключён.

При параллельном соединении проводников все они одним концом подсоединяются к одной точке цепи, а другим концом — к другой её точке (рис. 96). Клемму вольтметра со знаком «+» надо соединить с проводом, идущим от положительного полюса источника тока. Чтобы измерить напряжение на источнике тока, вольтметр подключают к клеммам источника (рис. 97).

1. Какой вывод можно сделать из опыта, показанного на рисунке 94? **2.** Что характеризует напряжение? **3.** Какова единица напряжения? **4.** Каким прибором измеряют напряжение? **5.** Как включают вольтметр в цепь? **6.** Как включить вольтметр для измерения напряжения на полюсах источника тока?

УПРАЖНЕНИЕ 31

1. Электрическая лампочка от карманного фонарика и электрическая лампа, применяемая в осветительной сети, рассчитаны на потребление силы тока около 0,28 А. Однако вторая лампа излучает значительно больше света и тепла, чем первая. Почему?

2. Напряжение на лампочке карманного фонарика 3,5 В. Что это означает?

3. При прохождении одинакового электрического заряда в одном проводнике совершается работа 80 Дж, а в другом — 300 Дж. На каком проводнике напряжение больше? Во сколько раз?

4. Каково напряжение на автомобильной лампочке, если при прохождении через неё электрического заряда 100 Кл совершена работа 1,2 кДж?

5. На одном участке электрической цепи при перемещении по нему электрического заряда 100 Кл была совершена такая же работа, как при перемещении заряда 600 Кл на другом участке. На концах какого участка цепи напряжение больше и во сколько раз?

§ 40 ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ ПРОВОДНИКА. ЗАКОН ОМА ДЛЯ УЧАСТКА ЦЕПИ

Как вам уже известно, причиной существования электрического тока является действие на свободные заряды электрического поля. Характеристиками электрического тока и электрического поля являются соответственно сила тока и напряжение. Можно предположить, что сила тока и напряжение связаны между собой.

Проверим эту гипотезу экспериментально для металлического проводника. Воспользуемся электрической цепью, показанной на рисунке 98. Цепь состоит из регулируемого источника тока (позволяет обеспечить разные напряжения), амперметра, проводника, присоединённого к нему вольтметра и ключа. Амперметр показывает силу тока, проходящего по проводнику, вольтметр — напряжение на концах проводника. Будем изменять подаваемое напряжение и отмечать показания вольтметра и амперметра.

В таблице приведены результаты опытов по изучению зависимости силы тока от напряжения для двух различных металлических проводников.

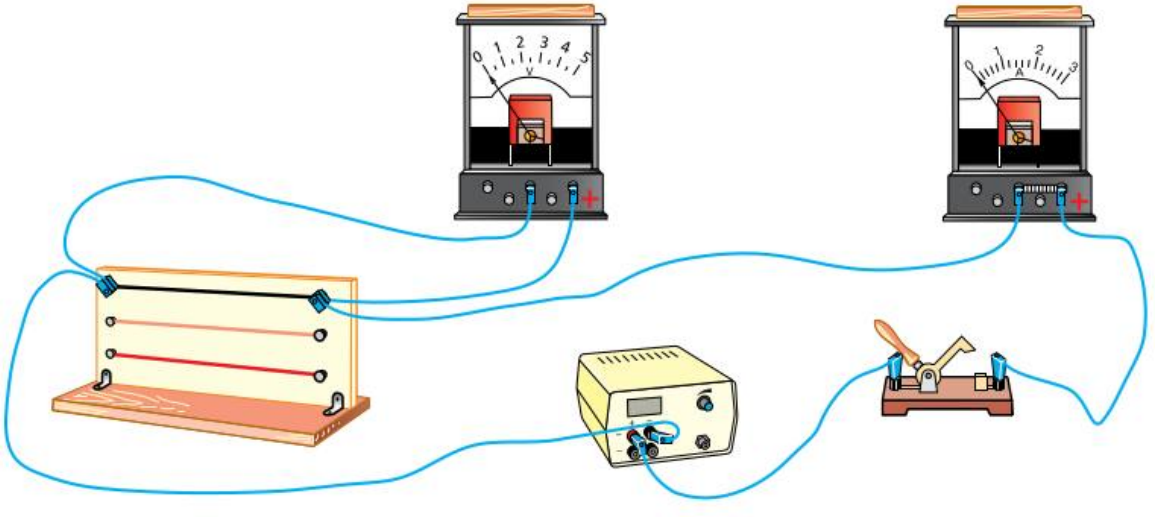


Рис. 98. Определение зависимости силы тока от напряжения

Проводник 1			Проводник 2		
U, В	I, А	$\frac{U}{I}$, $\frac{\text{В}}{\text{А}}$	U, В	I, А	$\frac{U}{I}$, $\frac{\text{В}}{\text{А}}$
1	0,5	2	1	0,2	5
2	1	2	2	0,4	5
3	1,5	2	3	0,6	5
4	2	2	4	0,8	5

Как видно из таблицы, при увеличении подаваемого напряжения сила тока растёт, причём отношение напряжения к силе тока остаётся постоянным для данного проводника. Для первого проводника оно равно $2\ \frac{\text{В}}{\text{А}}$, для второго — $5\ \frac{\text{В}}{\text{А}}$. Следовательно, отношение $\frac{U}{I}$ является характеристикой самого проводника.

$$R = \frac{U}{I}$$

При одном и том же напряжении сила тока во втором проводнике меньше, чем в первом. Говорят, что второй проводник оказывает большее *сопротивление* прохождению электрического тока, чем первый.

Физическую величину, равную отношению напряжения U на концах проводника к силе тока I, проходящего по нему, называют электрическим сопротивлением R проводника.

$$R = \frac{U}{I}.$$



ГЕОРГ ОМ

(1789—1854)

Немецкий физик. Вывел теоретически и подтвердил на опыте закон, выражающий связь между силой тока в цепи, напряжением и сопротивлением

Сопротивление характеризует свойство проводника препятствовать прохождению электрического тока.

В СИ единица сопротивления — *ом* (**Ом**). Она названа в честь немецкого учёного ***Георга Ома***.

Сопротивлением 1 Ом *обладает проводник, в котором сила тока*

равна 1 А *при напряжении на концах проводника* 1 В.

$$1\ \text{Ом} = 1\ \frac{\text{В}}{\text{А}}.$$

1 Ом = 10^3 мОм
1 Ом = 10^{-3} кОм
1 Ом = 10^{-6} МОм

На практике используются дольные и кратные единицы сопротивления: *миллиом* (**мОм**), *килоом* (**кОм**), *мегаом* (**МОм**).

$$1\ \text{мОм} = 0{,}001\ \text{Ом} = 10^{-3}\ \text{Ом};$$
$$1\ \text{кОм} = 1000\ \text{Ом} = 10^{3}\ \text{Ом};$$
$$1\ \text{МОм} = 1\,000\,000\ \text{Ом} = 10^{6}\ \text{Ом}.$$

Сопротивления соединительных проводов составляют обычно сотые или тысячные доли ома. Сопротивления электроприборов намного больше. Так, сопротивление нити накала электрической лампы (когда нить накалена) более 500 Ом.

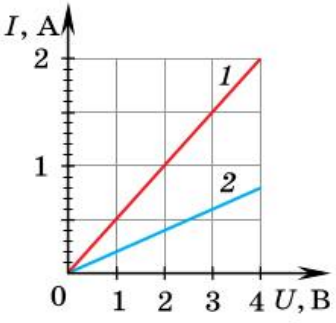


Рис. 99. График зависимости силы тока в проводнике от напряжения

Сопротивления проводников, которые использовались в опытах (см. рис. 98), равны 2 и 5 Ом. На рисунке 99 представлены графики зависимости силы тока от напряжения для каждого из них. Данную зависимость называют *вольт-амперной характеристикой*. Сила тока I прямо пропорциональна напряжению U, а коэффициентом пропорциональности является $\frac{1}{R}$.

Закон, устанавливающий зависимость силы тока от напряжения на концах участка цепи и сопротивления этого участка, называют ***законом Ома для участка цепи***:

сила тока на участке цепи прямо пропорциональна напряжению на концах этого участка и обратно пропорциональна сопротивлению участка.

$$I = \frac{U}{R}.$$

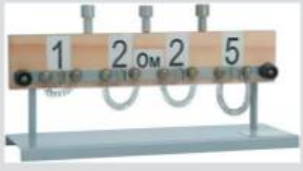
Он был открыт экспериментально Омом в 1826 г. Закон Ома с хорошей точностью выполняется для металлов и электролитов, он очень важен для расчёта электрических цепей в электротехнике.

$$I = \frac{U}{R}$$

Зная силу тока и сопротивление проводника, используя закон Ома, можно определить напряжение на участке цепи:

$$U = IR.$$

Согласно закону Ома, при заданном напряжении сила тока тем меньше, чем больше сопротивление проводника. Следовательно, увеличение сопротивления означает увеличение помех, которые испытывают заряженные частицы, двигаясь по проводнику.



Магазин сопротивлений

Чем вызваны эти помехи? Двигаясь упорядоченно, свободные электроны сталкиваются с ионами, расположенными в узлах кристаллической решётки металла. Этими столкновениями, затрудняющими перемещение электронов, и объясняется свойство проводника препятствовать прохождению тока.

Можно предположить, что сопротивление должно зависеть от материала проводника, его формы и размеров. Изучением этого вопроса мы займёмся в следующем параграфе.

1. Расскажите об экспериментальном способе установления зависимости силы тока в проводнике от напряжения на его концах. **2.** Что значит «сопротивление проводника равно 1 Ом»? **3.** Какие кратные и дольные единицы сопротивления используют на практике? **4.** Сформулируйте закон Ома для участка цепи. **5.** Как выразить напряжение на участке цепи, зная силу тока в нём и его сопротивление? **6.** В чём причина сопротивления проводника?

1. Согласно МКТ, ионы кристаллической решётки металла и свободные электроны совершают тепловое движение. Объясните, почему и как сопротивление проводника зависит от температуры.

2. Ученик включал в электрическую цепь различные проводники с известными сопротивлениями и записывал показания амперметра и вольтметра. По результатам исследования он построил график (рис. 100), но забыл обозначить координатные оси. Восстановите обозначения на осях. Определите напряжение в цепи, если значения величин на графике указаны в единицах СИ.

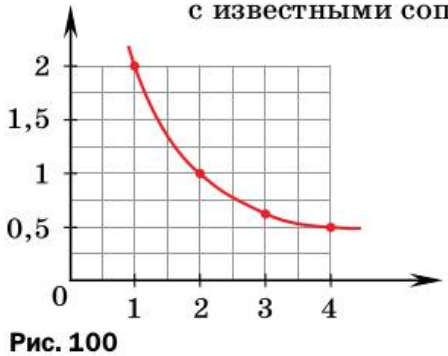


Рис. 100

3*. Принцип действия вольтметра, изображённого на рисунке 98, такой же, как и амперметра: угол поворота стрелки прямо пропорционален силе тока. Градуируют такой вольтметр на осно-

ве закона Ома для участка цепи. Означает ли это, что рассмотренный в параграфе опыт (см. рис. 98) нельзя считать доказательством справедливости закона Ома? Какие приборы вы предложили бы использовать для экспериментальной проверки закона Ома?

УПРАЖНЕНИЕ 32

1. Какова сила тока в проводнике, если напряжение на его концах 4,5 В, а сопротивление 15 Ом?
2. Каким сопротивлением должен обладать проводник, чтобы при напряжении на его концах 220 В сила тока в нём была 1 мА?

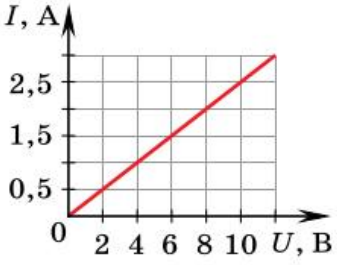


Рис. 101

3. Сила тока в проводнике сопротивлением 6 Ом равна 2 А. Каково напряжение на концах проводника? Как изменится сила тока в данном проводнике, если напряжение на его концах увеличится в 4 раза?
4. Используя вольт-амперную характеристику проводника (рис. 101), определите его сопротивление.
5. При напряжении 110 В сила тока в резисторе равна 5 А. Какова будет сила тока в этом же резисторе, если напряжение на нём увеличить на 10 В?

Это любопытно...

Почему электрический ток опасен для человека?

Многие процессы, происходящие в человеческом организме, объясняются электрическими взаимодействиями. Электрическими взаимодействиями обусловлены все нормальные функции организма: работа мышц, дыхание, сердцебиение и др. Информация, получаемая различными органами чувств, передаётся в мозг с помощью электрических сигналов. Хотя электрические токи и участвуют в функционировании организма, токи от внешних источников при прохождении через жизненно важные органы могут вызвать их повреждение или даже смерть человека.

Внутриклеточная жидкость является электролитом, т. е. содержит ионы и хорошо проводит электрический ток. Наименьшими проводящими свойствами, т. е. наибольшим сопротивлением, обладают поверхностные слои кожи. При сухой коже сопротивление между крайними точками тела (от ноги до руки или от одной руки до другой) около 10^5 Ом. Полное сопротивление между потными руками уменьшается до 1500 Ом.

Наиболее чувствительными к электрическому току частями организма являются мозг, грудные мышцы и нервные центры, которые контролируют дыхание и сердце. Считают, что электрический ток вызывает паралич сердца. Обычно смерть наступает тогда, когда сила тока, проходящего через человеческое тело, достигает 0,05—0,1 А.

Опасность подстерегает нас не только тогда, когда мы касаемся обоих подводящих ток проводов. Однополюсное прикосновение также опасно, если человек стоит, например, босой на влажной земле. Техника безопасности обязывает во всех промышленных установках заземлять доступные части машин и приборов. В этом случае напряжения между человеком, стоящим на земле, и металлом, соединённым с землёй, нет. И опасность поражения электрическим током устранена.

Интересно, что опасность поражения электрическим током возможна не только от технических устройств, но и от живых организмов. Так, например, электрический скат парализует жертву электрическим током, вырабатывая напряжение от 8 до 220 В.



Почему вблизи того места, где оборванный провод высокого напряжения соприкасается с землёй, рекомендуется стоять на одной ноге или уходить очень мелкими шагами?

§ 41 РАСЧЁТ СОПРОТИВЛЕНИЯ ПРОВОДНИКА. УДЕЛЬНОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ

Вы уже знаете, что при прохождении электрического тока по металлическому проводнику свободные электроны сталкиваются с ионами кристаллической решётки. Это замедляет движение электронов и препятствует прохождению тока. Величиной, характеризующей свойство проводника препятствовать прохождению тока, является сопротивление.

От чего зависит сопротивление и как его рассчитать? Этот вопрос исследовал Ом. Он экспериментально установил, что сопротивление однородного металлического проводника прямо пропорционально его длине и обратно пропорционально площади его поперечного сечения. Кроме того, сопротивление должно зависеть от вещества, из которого изготовлен проводник. Действительно, ионы кристаллической решётки различных металлов имеют разные заряды, они находятся на разных расстояниях друг от друга, а значит, свободные электроны по-разному с ними взаимодействуют при движении по проводнику.

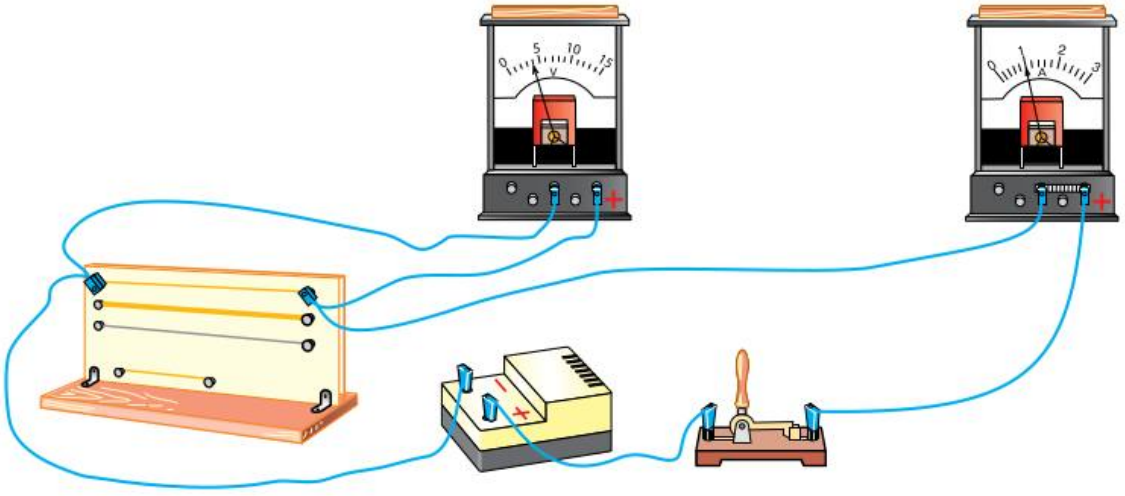


Рис. 102. Определение зависимости сопротивления проводника от его размеров и рода вещества

Для проверки зависимостей сопротивления от рода вещества, длины и площади поперечного сечения проводника проделаем опыт (рис. 102). На доске натянуты четыре разных проводника. Используя закон Ома для участка цепи, определим и сравним сопротивления следующих проводников:

— двух проводников с одинаковой площадью поперечного сечения (толщиной), состоящих из одного вещества (никеля), но разной длины;

— двух проводников одинаковой длины, состоящих из одного вещества (никеля), но с разной площадью поперечного сечения;

— двух проводников одинаковой длины, с одинаковой площадью поперечного сечения, но состоящих из различных веществ (никеля и нихрома).

Результаты опыта подтверждают выводы Ома. Сопротивление проводника:

1) прямо пропорционально его длине;

2) обратно пропорционально площади поперечного сечения;

3) зависит от рода вещества, из которого изготовлен проводник.

Физическую величину, показывающую, каким сопротивлением обладает проводник длиной 1 м, площадью поперечного сечения 1 м^2, изготовленный из данного вещества, называют удельным сопротивлением.

Удельное сопротивление обозначают греческой буквой ρ («ро»).

Теперь можно записать формулу для расчёта сопротивления проводника:

$$R = \frac{\rho l}{S},$$

$R = \frac{\rho l}{S}$

где l — длина проводника, S — площадь его поперечного сечения.

Выразим из неё удельное сопротивление:

$$\rho = \frac{RS}{l}.$$

Эта формула позволяет определить единицу удельного сопротивления. Так как единицей сопротивления является Ом, единицей площади поперечного сечения — м^2, а единицей длины — м, то единицей удельного сопротивления будет **Ом · м** (*ом-метр*).

Площадь поперечного сечения часто измеряют в мм^2, поэтому используют и другую единицу удельного сопротивления — $\frac{\text{Ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}}$.

В таблице 9 приведены удельные сопротивления некоторых веществ.

Таблица 9. Удельное электрическое сопротивление некоторых веществ (при t = 20 °С)

Вещество	ρ, $\frac{\text{Ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}}$	Вещество	ρ, $\frac{\text{Ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}}$	Вещество	ρ, $\frac{\text{Ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}}$
Серебро	0,016	Никелин (сплав)	0,40	Нихром (сплав)	1,1
Медь	0,017				
Золото	0,024	Манганин (сплав)	0,43	Фехраль (сплав)	1,3
Алюминий	0,028				
Вольфрам	0,055	Константан (сплав)	0,50	Графит	13
Железо	0,10			Фарфор	10^{17}
Свинец	0,21	Ртуть	0,96	Эбонит	10^{20}

1. Как зависит сопротивление проводника от его длины и от площади поперечного сечения? **2.** Объясните выбор проводников в опыте, изображённом на рисунке 102. **3.** Что показывает удельное сопротивление проводника? **4.** По какой формуле можно рассчитать сопротивление проводника? **5.** Какова единица удельного сопротивления?

Удельное сопротивление меди равно $1{,}7 \cdot 10^{-8}$ Ом · м. Что это означает?

УПРАЖНЕНИЕ 33

1. Каково сопротивление нихромовой проволоки длиной 1 м, если её площадь поперечного сечения 1 мм^2?
2. Имеется два проводника одинакового сечения, изготовленных из одного материала. Длина одного 10 см, другого 60 см. Какой проводник имеет большее сопротивление и во сколько раз?
3. Имеется два медных проводника одинаковой длины. У одного площадь поперечного сечения 1 мм^2, у другого — 5 мм^2. У какого проводника сопротивление меньше и во сколько раз?
4. Имеется два проводника одинаковой площади поперечного сечения и длины: медный и вольфрамовый. Какой проводник имеет большее сопротивление и во сколько раз?
5. Кусок проволоки без изоляции разрезали пополам и половинки свили вместе. Изменилось ли сопротивление проволоки и во сколько раз?
6. Сколько метров вольфрамового провода площадью поперечного сечения 0,1 мм^2 потребуется для изготовления резистора сопротивлением 180 Ом?
7. Провод стационарного телефона состоит из 20 медных проволочек площадью поперечного сечения 0,05 мм^2 каждая. Определите сопротивление 1,5 м такого провода.

ЗАДАНИЕ 20

1. Проанализируйте данные таблицы 9 и выскажите предположение, какие вещества из приведённых в таблице являются хорошими проводниками, а какие — совершенно точно диэлектрики. Проверьте себя, используя данные Интернета.
2. Из металлической фольги изготовьте проводники с различным сопротивлением так, чтобы их сопротивления отличались в 2, 3, 5, 10 раз. Обоснуйте правильность выполнения задания.

Это любопытно...

Из истории учения об электричестве

Изучением электрического тока занимался немецкий физик Георг Ом. Исследуя сопротивление проводников, он включал в цепь отрезки проволоки из одного и того же металла, но различной длины и толщины и определял, как меняется при этом сила тока в цепи. На основании таких опытов учёный заключил, что сопротивление проводника прямо пропорционально его длине и обратно пропорционально площади его поперечного сечения.

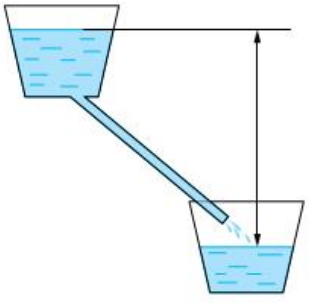


Рис. 103. Гидродинамическая аналогия

Ом проводил аналогию между электрическим током и током воды в трубе. По наклонной трубе, например, жидкость течёт под действием силы тяжести. Чем больше разница между уровнем верхнего сосуда, из которого вода вытекает (рис. 103), и нижнего, куда она течёт, тем быстрее вода движется. Одновременно чем больше сопротивление, встречаемое водой при движении по трубе, тем скорость меньше, и, наоборот, при уменьшении сопротивления увеличивается скорость течения.



Как вы думаете, каким величинам в рассмотренной механической модели аналогичны напряжение между концами проводника с током и сила тока?

§ 42 ПРИМЕРЫ НА РАСЧЁТ СОПРОТИВЛЕНИЯ ПРОВОДНИКА, СИЛЫ ТОКА И НАПРЯЖЕНИЯ

Пример 1. Чему равно сопротивление алюминиевого провода длиной 400 м и площадью поперечного сечения 4 мм^2?

Удельное сопротивление алюминия находим в таблице 9.

Запишем условие задачи и решим её.

Дано:

$l = 400$ м

$S = 4$ мм^2

$\rho = 0{,}028 \frac{\text{Ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}}$

R — ?

Решение:

Сопротивление проводника выражается формулой:

$$R = \frac{\rho l}{S},$$

$$R = 0{,}028 \frac{\text{Ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}} \cdot \frac{400 \text{ м}}{4 \text{ мм}^2} = 2{,}8 \text{ Ом}.$$

Ответ: $R = 2{,}8$ Ом.

Пример 2. Напряжение на концах константановой проволоки длиной 20 м и площадью поперечного сечения 1,25 мм^2 равно 40 В. Рассчитайте силу тока в проволоке.

Запишем условие задачи и решим её.

Дано:	**Решение:**
$l = 20$ м $S = 1{,}25$ мм^2 $U = 40$ В $\rho = 0{,}5 \frac{\text{Ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}}$	Силу тока определим по закону Ома для участка цепи: $I = \frac{U}{R}$. Сопротивление проводника найдём по формуле: $R = \frac{\rho l}{S}$.
I — ?	

Подставив значения величин, получим:

$$R = 0{,}5 \frac{\text{Ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}} \cdot \frac{20 \text{ м}}{1{,}25 \text{ мм}^2} = 8 \text{ Ом},$$

$$I = \frac{40 \text{ В}}{8 \text{ Ом}} = 5 \text{ А}.$$

Ответ: $I = 5$ А.

Пример 3. Катушка состоит из нихромовой проволоки длиной 150 м и площадью поперечного сечения 0,75 мм^2. Определите напряжение на её концах, если сила тока в катушке 40 мА.

Запишем условие задачи и решим её.

Дано:	**СИ**	**Решение:**
$l = 150$ м $S = 0{,}75$ мм^2 $I = 40$ мА $\rho = 1{,}1 \frac{\text{Ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}}$	0,04 А	Напряжение можно найти по закону Ома для участка цепи: $I = \frac{U}{R} \Rightarrow U = IR$. Сопротивление проводника определим по формуле:
U — ?		

$$R = \frac{\rho l}{S}.$$

Учитывая это выражение, получим формулу для расчёта напряжения:

$$U = I\frac{\rho l}{S} = \frac{I\rho l}{S}.$$

Мы решили задачу в общем виде, получив для напряжения расчётную формулу. Проверим её правильность через единицы физических величин. В правую часть формулы вместо буквенных обозначений величин подставим обозначения их единиц и посмотрим, получится ли единица напряжения — вольт. Если не получится, то это будет означать, что в решении допущены ошибки.

$$\frac{\text{А} \cdot \text{Ом} \cdot \text{мм}^2 \cdot \text{м}}{\text{м} \cdot \text{мм}^2} = \text{А} \cdot \text{Ом} = \text{В}.$$

Итак, мы получили обозначение единицы искомой величины. Подставим значения величин и найдём напряжение:

$$U = 0{,}04 \cdot 1{,}1 \cdot \frac{150}{0{,}75} = 8{,}8\ (\text{В}).$$

Ответ: $U = 8{,}8$ В.



Решите пример 2 из параграфа в общем виде и проверьте полученную формулу через единицы физических величин.



УПРАЖНЕНИЕ 34

1. Ученик заменил перегоревшую медную спираль на стальную такой же площади поперечного сечения и длины. Во сколько раз изменилась сила тока, если напряжение на концах стальной спирали такое же, какое было на медной? Удельное сопротивление стали $0{,}12\ \frac{\text{Ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}}$.
2. Определите сопротивление медного провода площадью поперечного сечения 2,5 мм^2 и длиной 40 м.
3. Напряжение на никелиновом проводнике длиной 12 м и площадью поперечного сечения 0,1 мм^2 равно 200 В. Какова сила тока в проводнике?
4. Сварочный аппарат подсоединяют в сеть медными проводами длиной 100 м и площадью поперечного сечения 50 мм^2. Определите напряжение на проводах, если сила тока в них 125 А.

5. Длина медного провода, подводящего ток к потребителю, равна 120 м. Какую площадь поперечного сечения имеет провод, если при силе тока 10 А напряжение на его концах равно 4 В?

6. Из какого материала изготовлен проводник длиной 2 км и площадью поперечного сечения 20 мм^2, если сила тока, проходящего по проводнику, равна 2 А при напряжении на его концах 220 В?

ЗАДАНИЕ 21

- Предложите способ определения длины проволоки в катушке, не разматывая её. Какие приборы для этого вам понадобятся?

§ 43 РЕОСТАТЫ

Существуют приборы, сопротивление которых можно менять. Одним из таких приборов является ***реостат***.

Простейшим реостатом может служить проволока, натянутая между двумя изолированными штативами и подключённая к источнику тока через контакты A и C последовательно с амперметром (рис. 104). Необходимо использовать проволоку из материала с большим удельным сопротивлением, например никелиновую или нихромовую. Включив такую проволоку в электрическую цепь и передвигая по ней подвижный контакт C, можно изменять длину

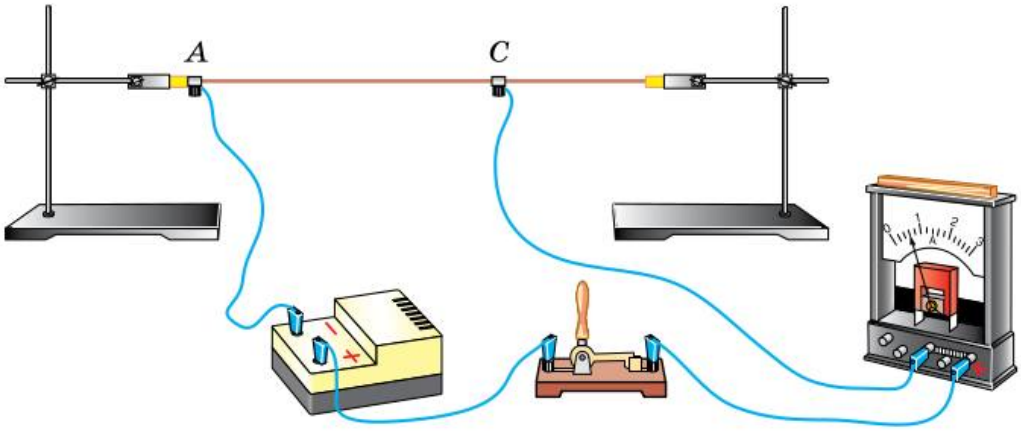
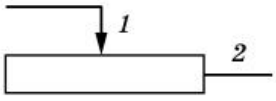


Рис. 104. Изменение длины проводника, включённого в электрическую цепь



а)



б)

Рис. 105. Реостат: *а* — внешний вид; *б* — условное обозначение на схемах

включённого в цепь участка AC. При этом будет увеличиваться или уменьшаться сопротивление цепи, а следовательно, и сила тока в ней.

В школе часто применяется *ползунковый реостат*, изображённый на рисунке 105. В нём на изолирующий цилиндр (керамический) намотана проволока, покрытая тонким слоем окалины, изолирующей витки друг от друга. Над цилиндром расположен металлический стержень, по которому перемещается ползунок. Его контакты прижаты к проволоке, и в результате трения слой окалины стирается, обеспечивая электрический контакт обмотки цилиндра и ползунка. От верхней клеммы ток по металлическому стержню проходит к ползунку и от него по виткам проволоки на цилиндре к нижней клемме. Вся эта конструкция закрепляется на изолирующей подставке.



Реостат (переменный резистор)

При перемещении ползунка реостата изменяется число витков проволоки, которые подключены в цепь. Значит, изменяется длина проводника и, следовательно, его сопротивление. Так, при перемещении ползунка реостата, изображённого на рисунке 105, *а*, влево (к верхней клемме) его сопротивление увеличивается. Поэтому реостат ещё называют переменным резистором. Таким образом, с помощью реостата регулируется сила тока в цепи. Каждому реостату соответствует максимальное сопротивление и допустимая сила тока, которые указываются на его корпусе.

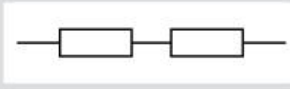
1. Каково назначение реостата в электрической цепи? **2.** Объясните по рисунку 105, *а*, как устроен ползунковый реостат. Каково условное обозначение реостата на схеме? **3.** Почему реостаты изготавливают из проволоки, удельное сопротивление которой велико? **4.** Для каких величин указывают на реостате их допустимые значения?

УПРАЖНЕНИЕ 35

- Определите силу тока, проходящего через реостат, изготовленный из никелиновой проволоки длиной 50 м и площадью поперечного сечения 1 мм^2, если напряжение на зажимах реостата равно 45 В.

§ 44 ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЕ СОЕДИНЕНИЕ ПРОВОДНИКОВ

На практике используются электрические цепи, которые обычно состоят из нескольких потребителей электрической энергии. Все они по-разному соединены между собой.

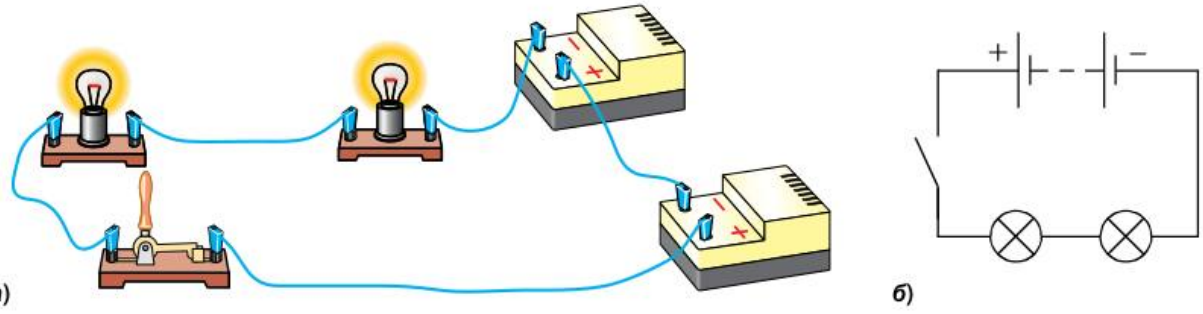


Последовательное соединение резисторов

Проводники могут соединяться ***последовательно***, как показано на рисунке 106. При таком соединении весь электрический заряд, прошедший через первый проводник, должен пройти и через все остальные, а это означает, что сила тока в последовательно соединённых проводниках одинакова.

Вы знаете, что напряжение показывает, какую работу совершает электрическое поле по перемещению единичного заряда из одной точки поля в другую. За определённое время через поперечное сечение каждого из последовательно соединённых проводников проходит одинаковый заряд. При этом общая работа электрического поля по перемещению заряда равна сумме работ в каждом проводнике, а значит, и общее напряжение на нескольких соединённых последовательно проводниках равно сумме напряжений на каждом из них.

Чтобы убедиться в этом, соберём электрическую цепь по схеме, изображённой на рисунке 107. Она состоит из источника тока, двух резисторов, амперметра, соединённых последовательно, и вольтметра. Как проверить, что сила тока, протекающего на всех участках последовательной цепи, одинакова? Для этого надо



а) б)

Рис. 106. Последовательное включение электрических ламп и источников тока

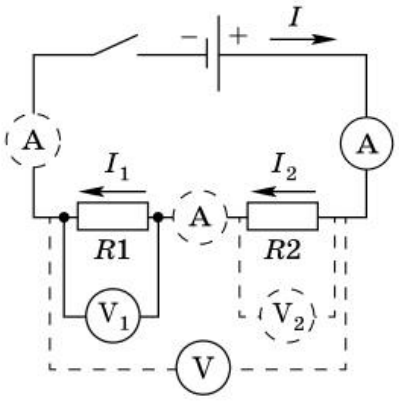


Рис. 107. Последовательное соединение проводников

подключить амперметр последовательно в различных участках цепи (см. рис. 107).

Амперметр будет показывать одно и то же значение, т. е. **сила тока на всех участках цепи при последовательном соединении одинакова:**

$$I = I_1 = I_2.$$

Этот вывод является следствием закона сохранения электрического заряда. Через любое поперечное сечение проводника за единицу времени проходит один и тот же электрический заряд, поскольку новые заряды в проводнике не образуются и его полный заряд не меняется.

$I = I_1 = I_2$

Чтобы выяснить распределение напряжения на участках (резисторах) последовательной цепи, необходимо подключать параллельно к каждому резистору вольтметр, затем этим же вольтметром надо измерить общее напряжение на двух резисторах, как показано на рисунке 107. Опыт показывает, что **общее напряжение в последовательной цепи равно сумме напряжений на её отдельных участках:**

$$U = U_1 + U_2.$$

$U = U_1 + U_2$

Чем больше сопротивление участка последовательной цепи, тем больше напряжение на нём.

Действительно, применив закон Ома для участка цепи $I = \frac{U}{R}$ и учитывая, что $I_1 = I_2$, получим:

$$\frac{U_1}{R_1} = \frac{U_2}{R_2},$$

или

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{R_1}{R_2}.$$

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{R_1}{R_2}$$

Напряжения на последовательно включённых проводниках прямо пропорциональны их сопротивлениям.

Из соотношения $U = U_1 + U_2$ и закона Ома следует:

$$IR = IR_1 + IR_2,$$

или

$$\boldsymbol{R = R_1 + R_2.}$$

$$\boldsymbol{R = R_1 + R_2}$$

Таким образом, **общее сопротивление нескольких последовательно соединённых проводников равно сумме сопротивлений каждого из них.**

Полученный результат можно проиллюстрировать простым рассуждением. Рассмотрим несколько последовательно соединённых одинаковых проводников. Их площадь поперечного сечения одинакова, а длина равна сумме всех длин. Мы знаем, что при увеличении длины проводника его сопротивление увеличивается. Сопротивление нескольких соединённых последовательно проводников больше, чем сопротивление любого из них.

Пример. Электрическая цепь состоит из двух последовательно соединённых проводников сопротивлениями 10 и 20 Ом. Найдите силу тока в цепи и напряжение на каждом проводнике, если напряжение на концах цепи равно 6 В.

Запишем условие задачи и решим её.

Дано:	**Решение:**
$R_1 = 10$ Ом $R_2 = 20$ Ом $U = 6$ В	При последовательном соединении проводников: сила тока в цепи $I = I_1 = I_2,$ общее сопротивление цепи $R = R_1 + R_2.$
I — ? U_1 — ? U_2 — ?	

Согласно закону Ома:

$$I = \frac{U}{R}, \quad I = \frac{U}{R_1 + R_2}.$$

$$I = \frac{6\ \text{В}}{10\ \text{Ом} + 20\ \text{Ом}} = 0{,}2\ \text{А}.$$

Напряжение на каждом из проводников:

$$U_1 = IR_1, \quad U_1 = 0{,}2\ \text{А} \cdot 10\ \text{Ом} = 2\ \text{В};$$
$$U_2 = IR_2, \quad U_2 = 0{,}2\ \text{А} \cdot 20\ \text{Ом} = 4\ \text{В}.$$

Ответ: $I = 0{,}2$ А, $U_1 = 2$ В, $U_2 = 4$ В.



1. Какое соединение проводников называют последовательным? Начертите схему такого соединения. **2.** Какая физическая величина одинакова для всех проводников, соединённых последовательно? Объясните почему. **3.** Как найти напряжение на участке цепи, состоящем из последовательно соединённых проводников, зная напряжение на каждом? **4.** Как найти общее сопротивление последовательно соединённых проводников, зная сопротивление каждого?



При исследовании электрической цепи ученик установил, что сила тока в одном резисторе равна 2 А, напряжение на его концах 4 В. На другом резисторе напряжение 10 В, сила тока 2 А. Он измерил напряжение на двух резисторах, и оно оказалось равным 14 В. Можно ли сказать, что резисторы соединены последовательно?



УПРАЖНЕНИЕ 36

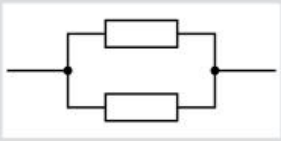
1. Участок электрической цепи содержит три резистора сопротивлением 10, 20 и 30 Ом, соединённых последовательно. Найдите силу тока в каждом резисторе и напряжение на концах каждого участка цепи, если напряжение на втором резисторе равно 40 В.

2. Сколько одинаковых резисторов было соединено последовательно, если каждый из них имеет сопротивление 100 Ом, а их общее сопротивление равно 700 Ом?

3. Общее сопротивление трёх обмоток телефонных реле, соединённых последовательно, равно 3200 Ом. Сопротивление одной из них равно 600 Ом, другой — 1200 Ом. Вычислите сопротивление третьей обмотки.

4*. Сила тока в электрической цепи, содержащей проводник сопротивлением 12 Ом, равна 0,06 А. После того как к проводнику последовательно присоединили стальной провод площадью поперечного сечения 1 мм^2, сила тока в цепи стала 0,04 А. Определите длину провода. Удельное сопротивление стали 0,12 $\frac{\text{Ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}}$.

§ 45 ПАРАЛЛЕЛЬНОЕ СОЕДИНЕНИЕ ПРОВОДНИКОВ



Параллельное соединение двух резисторов

Наряду с последовательным существует и другой способ соединения проводников, также применяемый на практике, — ***параллельное*** соединение (рис. 108). При таком соединении один конец всех проводников соединяют в точке A (рис. 108, *б*), а другой конец — в точке B.

Для изучения параллельного соединения проводников соберём электрическую цепь, состоящую из источника тока, двух резисторов, вольтметра, амперметра и ключа (рис. 109). Поскольку при параллельном соединении проводники подключены к одним и тем же двум точкам, **напряжение на всех параллельно соединённых резисторах одинаково:**

$$U = U_1 = U_2$$

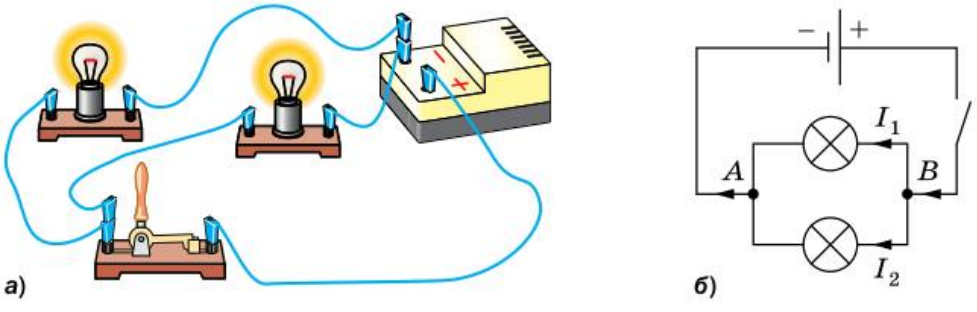
$$U = U_1 = U_2.$$

Для того чтобы понять, как распределяется сила тока при параллельном соединении проводников, будем подключать амперметр последовательно с каждым резистором и в неразветвлённую часть цепи (см. рис. 109).

Опыт показывает, что **сила тока в неразветвлённой части цепи равна сумме сил токов на её отдельных участках:**

$$I = I_1 + I_2$$

$$I = I_1 + I_2.$$



а) *б*)

Рис. 108. Параллельное соединение электрических ламп

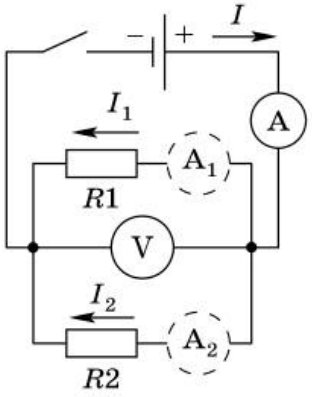


Рис. 109. Параллельное соединение проводников

Этот экспериментальный результат объясняется тем, что новые заряды в проводнике не образуются, а в точке разветвления проводников происходит лишь разделение потока свободных электронов на части, что соответствует закону сохранения электрического заряда.

Согласно закону Ома, напряжение на участке цепи $U = IR$. Так как при параллельном соединении $U_1 = U_2$, то можно записать:

$$I_1 R_1 = I_2 R_2.$$

Отсюда

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

Таким образом, *чем больше сопротивление участка цепи, тем меньше сила тока в нём.*

Если два проводника соединены параллельно, то их общее сопротивление меньше сопротивления каждого из них. Параллельное соединение как бы увеличивает сечение проводника. Общее сопротивление двух параллельно соединённых проводников можно определить из формулы

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2},$$

откуда

$$R = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}.$$

Сравним параллельное и последовательное соединения проводников.

Напряжение на параллельных участках цепи одинаково, сила тока в каждом участке «своя». При параллельном соединении приборов каждый прибор в цепи работает независимо от другого. Отключение одного прибора не влияет на работу других, поэтому все бытовые электроприборы в квартире включены параллельно.

Сила тока в последовательно соединённых проводниках одна и та же. Напряжение на каждом участке цепи «своё», поэтому в цепь можно

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

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$$

включать приборы, рассчитанные на меньшее напряжение. Однако при последовательном соединении, если выходит из строя один участок цепи (перегорает лампочка), отключается вся цепь.

Последовательное соединение используется при соединении ламп освещения в трамваях. Напряжение в сети трамвая 600 В. Лампы, рассчитанные на 120 В, включают последовательно по 5 ламп. Последовательно включены лампочки ёлочной гирлянды, поэтому при выходе из строя одной из них гаснет вся гирлянда.

Дверные контакты лифта всех этажей включены последовательно в цепь прибора, управляющего включением электродвигателя, поднимающего кабину. Поэтому, на каком бы этаже дверь ни оказалась открытой, цепь будет разомкнута и двигатель не включится. Он сможет включиться только тогда, когда закрыты все двери и замкнута цепь, проходящая через дверные контакты всех этажей. Пусковые же кнопки внутри кабины в общей схеме управления соединены параллельно. Поэтому, нажав на любую из них, можно включить двигатель лифта.

Пример. Два проводника сопротивлениями 3 и 9 Ом соединены параллельно и включены в электрическую цепь напряжением 27 В. Найдите силу тока в каждом проводнике и в неразветвлённой части цепи.

Запишем условие задачи и решим её.

Дано:

$R_1 = 3$ Ом

$R_2 = 9$ Ом

$U = 27$ В

I — ?

I_1 — ?

I_2 — ?

Решение:

Напряжение при параллельном соединении на отдельных проводниках одинаковое $U_1 = U_2 = U$, поэтому по закону Ома для участка цепи сила тока в каждом проводнике:

$$I_1 = \frac{U}{R_1}, \quad I_1 = \frac{27\ \text{В}}{3\ \text{Ом}} = 9\ \text{А};$$

$$I_2 = \frac{U}{R_2}, \quad I_2 = \frac{27\ \text{В}}{9\ \text{Ом}} = 3\ \text{А}.$$

Сила тока в неразветвлённой части цепи:

$I = I_1 + I_2$,

$I = 9\ \text{А} + 3\ \text{А} = 12\ \text{А}$.

Ответ: $I_1 = 9\ \text{А}$, $I_2 = 3\ \text{А}$, $I = 12\ \text{А}$.

1. Какое соединение проводников называют параллельным? Изобразите его на схеме. **2.** Какая из физических величин одинакова для всех проводников, соединённых параллельно? Объясните почему. **3.** Как определить силу тока в неразветвлённой части цепи, если известны силы тока в каждом её участке? **4.** Как изменяется общее сопротивление участка цепи после увеличения числа проводников, соединённых параллельно? **5.** Как соединены лампы в люстре? Ответ обоснуйте.

Используя закон Ома для участка цепи, получите формулу для определения общего сопротивления параллельно соединённых проводников.

УПРАЖНЕНИЕ 37

1. Начертите схему электрической цепи, содержащей источник тока, две электрические лампы, два ключа и один звонок, так, чтобы звонок звонил, когда какая-нибудь из ламп горит.
2. Два резистора сопротивлением 2 и 4 Ом соединены параллельно. Напряжение на резисторах равно 4 В. Найдите силу тока в общей цепи и в каждом резисторе.
3. Два резистора, сопротивления которых 15 и 25 Ом, подключены параллельно к батарейке. Сила тока в первом резисторе 0,2 А. Найдите силу тока во втором резисторе.
4. Два разных проводника, соединённых параллельно, подключены к источнику тока. Амперметр, подключённый к первому проводнику, показал 0,8 А, а ко второму — 0,4 А. Во сколько раз различаются сопротивления проводников?
5. Начертите схему такого соединения проводов в вашей квартире, при котором одновременно с выключением лампы в одной комнате загорается лампа в другой.

ЗАДАНИЕ 22

- Возьмите две лампочки для карманного фонарика и подключите их к батарейке сначала параллельно, затем последовательно. Вместо проводов можете использовать алюминиевую фольгу. Вам потребуются и другие материалы, возможно, картон, пластилин. Расскажите о результатах вашей конструкторской работы. Сравните яркость горения лампочек при параллельном и последовательном соединении.

§ 46 РАБОТА И МОЩНОСТЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА

Вы уже знаете, что при прохождении электрического заряда q по участку цепи, напряжение на котором равно U, электрическое поле совершает работу

$$A = Uq.$$

Работу сил электрического поля, создающего электрический ток, принято называть *работой электрического тока*.

Поскольку заряд, прошедший по участку цепи за время t,

$$q = It,$$

$A = UIt$

то работу электрического тока можно найти следующим образом:

$$\boldsymbol{A = UIt.}$$

Работа электрического тока на участке цепи равна произведению напряжения на концах этого участка, силы тока и времени прохождения тока.

Единицей работы, как вы знаете, является *джоуль* (**Дж**). Пользуясь формулой работы тока, эту единицу можно записать через единицы напряжения, силы тока и времени:

$$\mathbf{1\ Дж = 1\ В \cdot А \cdot с.}$$

Для измерения работы электрического тока можно воспользоваться тремя приборами: вольтметром, амперметром и часами или же специальным прибором — *счётчиком электрической энергии*.

Напомним, что мощность — это работа, которая совершается в единицу времени. Мощность электрического тока обозначают буквой P. Из формулы $A = UIt$ можем получить выражение для мощности электрического тока:

$P = UI$

$$P = \frac{A}{t} \text{ или}$$

$$\boldsymbol{P = UI.}$$

Мощность электрического тока равна произведению напряжения и силы тока в цепи.

В СИ единица мощности тока — *ватт* (**Вт**).

$$\mathbf{1\ Вт = 1\ В \cdot А.}$$

На практике используют кратные и дольные единицы мощности: *гектоватт* (**гВт**), *киловатт* (**кВт**), *мегаватт* (**МВт**).

$$1\ гВт = 100\ Вт = 10^2\ Вт;$$

$$1\ кВт = 1000\ Вт = 10^3\ Вт;$$

$$1\ МВт = 1\ 000\ 000\ Вт = 10^6\ Вт.$$

$1\ Вт = 10^{-2}\ гВт$
$1\ Вт = 10^{-3}\ кВт$
$1\ Вт = 10^{-6}\ МВт$

Измерить мощность электрического тока можно с помощью вольтметра и амперметра или специального прибора — *ваттметра*.

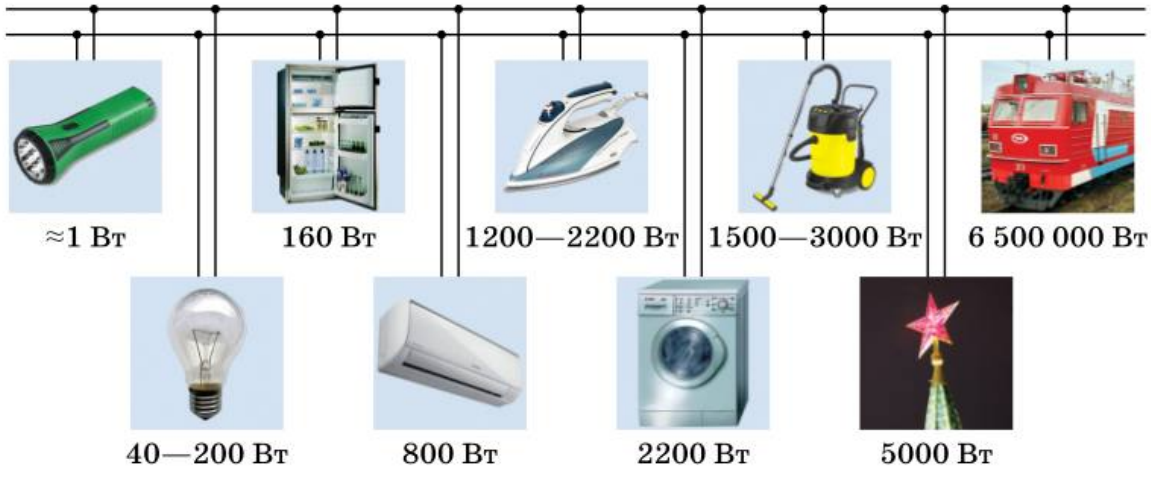
Из формулы для расчёта мощности тока получим:

$$A = Pt,$$

откуда

$$\mathbf{1\ Дж = 1\ Вт \cdot с.}$$

На практике часто используют другие единицы работы электрического тока: *ватт-час*



Мощность, потребляемая некоторыми приборами и устройствами



В конце месяца
011706

В начале месяца
010982

Израсходовано
724 кВт · ч

Тариф
5 р. за 1 кВт · ч

Стоимость
5 × 724 = 3620 р.

Снятие показаний электросчётчика и расчёт потребляемой электроэнергии

(Вт • ч), *гектоватт-час* **(гВт • ч)**, *киловатт-час* **(кВт • ч)**.

$$1\ \text{Вт} \cdot \text{ч} = 3600\ \text{Дж};$$
$$1\ \text{гВт} \cdot \text{ч} = 100\ \text{Вт} \cdot \text{ч} = 360\,000\ \text{Дж};$$
$$1\ \text{кВт} \cdot \text{ч} = 1000\ \text{Вт} \cdot \text{ч} = 3\,600\,000\ \text{Дж}.$$

Пример. Электрическая плитка работает при силе тока 5 А и напряжении 120 В в течение 5 ч. Определите работу тока и стоимость израсходованной электроэнергии, считая, что тариф составляет 5 р. за 1 кВт • ч.

Запишем условие задачи и решим её.

Дано:

$I = 5$ А

$U = 120$ В

$t = 5$ ч

Тариф $= 5\ \frac{\text{р.}}{\text{кВт} \cdot \text{ч}}$

A — ?

Стоимость — ?

Решение:

Работа электрического тока:

$A = UIt$,

$A = 120\ \text{В} \cdot 5\ \text{А} \cdot 5\ \text{ч} =$

$= 3000\ \text{Вт} \cdot \text{ч} = 3\ \text{кВт} \cdot \text{ч}.$

Стоимость $= 5\ \frac{\text{р.}}{\text{кВт} \cdot \text{ч}} \times$

$\times\ 3\ \text{кВт} \cdot \text{ч} = 15$ р.

Ответ: $A = 3$ кВт • ч, стоимость = 15 р.

1. Как, зная напряжение, силу тока и время, рассчитать работу электрического тока? **2.** Какие единицы работы электрического тока вы знаете? **3.** Какими приборами измеряют работу электрического тока? **4.** Как рассчитать мощность электрического тока? **5.** Какова единица мощности электрического тока? **6.** Как можно измерить мощность электрического тока?

Докажите, что 1 Вт • ч = 3600 Дж.

УПРАЖНЕНИЕ 38

1. Чему равна работа, совершённая электрическим током за 5 мин в резисторе, рассчитанном на напряжение 24 В? Сила тока в резисторе 2 А.
2. Определите мощность тока в электрической лампе, если при напряжении 5 В сила тока в ней 100 мА.
3. Определите работу электрического тока, совершённую за 30 мин электрической плиткой мощностью 660 Вт.
4. Электрический паяльник мощностью 120 Вт рассчитан на напряжение 220 В. Найдите силу тока в обмотке паяльника и её сопротивление.

5. Электрическая печь, сопротивление которой 100 Ом, рассчитана на силу тока 2 А. Определите потребляемую электроэнергию за 4 ч непрерывной работы печи.

6. Используя рисунок на с. 170, вычислите сопротивление кондиционера, включённого в городскую сеть напряжением 220 В.

7*. Две лампы рассчитаны на напряжение 220 В каждая и потребляют мощности 25 и 40 Вт. Какую мощность будут потреблять эти лампы, если их включить в электрическую цепь напряжением 220 В: а) последовательно; б) параллельно?

§ 47 НАГРЕВАНИЕ ПРОВОДНИКОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ТОКОМ. ЗАКОН ДЖОУЛЯ—ЛЕНЦА

$$Q = I^2Rt$$

Выделение энергии — одно из основных явлений, сопровождающих прохождение электрического тока в проводниках. В результате опытов было установлено, что количество теплоты, выделяющееся в проводнике при прохождении по нему электрического тока, зависит от сопротивления проводника, квадрата силы тока и времени его прохождения. Этот физический закон был впервые установлен в 1844 г. русским академиком ***Эмилием Христиановичем Ленцем*** и, независимо от него, английским физиком Джоулем (в честь него названа единица энергии), поэтому называется ***законом Джоуля—Ленца***.



ЭМИЛИЙ ХРИСТИАНОВИЧ ЛЕНЦ

(1804—1865)

Русский физик, один из основоположников электротехники. С его именем связано открытие закона, определяющего тепловое действие тока, и закона, определяющего направление индукционного тока

Количество теплоты, выделяющееся при прохождении тока в проводнике, равно произведению квадрата силы тока, сопротивления проводника и времени прохождения тока.

$$Q = I^2Rt.$$

Увеличение внутренней энергии проводников при протекании по ним электрического тока происходит из-за столкновений упорядоченно движущихся заряженных частиц с дру-



ДЖЕЙМС ПРЕСКОТТ ДЖОУЛЬ

(1818—1889)

Английский физик. Обосновал на опытах закон сохранения энергии. Установил закон, определяющий тепловое действие электрического тока. Вычислил скорость движения молекул газа и установил её зависимость от температуры

гими частицами вещества. Так, в металлах свободные электроны, разгоняемые электрическим полем, сталкиваются с ионами кристаллической решётки и передают им часть своей энергии.

Из закона сохранения энергии мы можем получить закон Джоуля—Ленца, не прибегая к эксперименту.

Работа по перемещению электрического заряда $A = Uq$, а заряд $q = It$. Отсюда:

$$A = UIt.$$

Из закона Ома для участка цепи $I = \frac{U}{R}$ получим формулу для вычисления напряжения: $U = IR$. Если предположить, что вся работа электрического поля пошла на нагревание проводника, получим:

$$A = Q = I^2Rt.$$

Закон Джоуля—Ленца можно записать иначе:

$$Q = \frac{U^2}{R}t.$$

Нагревание проводников при прохождении по ним электрического тока широко используется в электронагревательных приборах.

1. По какой формуле можно рассчитать количество теплоты, выделяющееся в проводнике с током? **2.** Сформулируйте закон Джоуля—Ленца. **3.** Как можно объяснить нагревание проводника электрическим током? **4.** Пользуясь законом сохранения энергии и законом Ома для участка цепи, выразите количество теплоты, выделяющееся в проводнике с током, через силу тока, сопротивление проводника и время.

УПРАЖНЕНИЕ 39

1. Как изменится количество теплоты, выделяющееся за время t в данном проводнике, если сила тока увеличится в 2 раза?
2. Сила тока, протекающего по цепи сопротивлением 100 Ом, равна 2 А. Какое количество теплоты выделится в цепи за 15 мин?

3. Два резистора сопротивлением 5 и 10 Ом включены в цепь последовательно. Какое количество теплоты выделится в каждом резисторе за 5 мин, если напряжение на втором резисторе 20 В?

4. Два резистора сопротивлением 4 и 8 Ом включены в цепь параллельно. Сила тока в первом резисторе 2 А. Какое количество теплоты выделяется в обоих резисторах за 20 с?

5*. Электрический кипятильник со спиралью сопротивлением 150 Ом помещён в сосуд, содержащий воду массой 0,5 кг при температуре 20 °С, и включён в сеть напряжением 220 В. Через 30 мин спираль выключили. Сколько граммов воды выкипело, если коэффициент полезного действия кипятильника 80%?

§ 48 ЛАМПА ОСВЕЩЕНИЯ. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ НАГРЕВАТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ

В 1876 г. в Лондоне на выставке точных физических приборов русский изобретатель ***Павел Николаевич Яблочков*** демонстрировал перед посетителями необыкновенную электрическую свечу. Похожая по форме на обычную стеариновую, она горела ослепительно ярким светом. В том же году свечи Яблочкова появились на улицах Парижа, а затем и Лондона. Помещённые в белые матовые шары, они давали яркий приятный свет. Новый свет назвали «русским светом». Газеты западноевропейских стран писали: «Свет приходит к нам с востока — из России», «Россия — родина света».

Что же представляла собой свеча Яблочкова? Она состояла из двух угольных стержней, расположенных параллельно друг другу и разделённых изолирующей прослойкой. Концы стержней соединялись угольной пластинкой. При пропускании тока пластинка сгорала, и между концами угольных стержней появлялось яркое свечение, имеющее форму дуги. По мере сгорания углей изолирующая прослойка испарялась и светящаяся дуга не затухала.

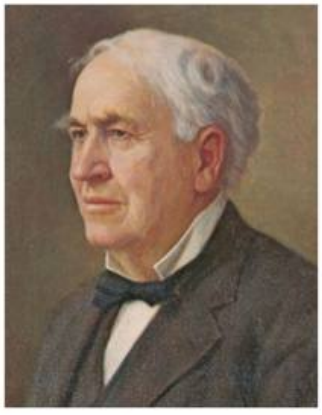


АЛЕКСАНДР НИКОЛАЕВИЧ ЛОДЫГИН

(1847—1923)

Русский электротехник, изобретатель лампы накаливания. Впервые применил их для уличного освещения города

Примерно в то же время другой русский изобретатель ***Александр Николаевич Лодыгин*** предложил лампу накаливания. В лампе Лодыгина свет давал раскалённый уголь-



ТОМАС ЭДИСОН

(1847—1931)

Американский изобретатель, основатель крупных электротехнических компаний. Усовершенствовал телеграф, телефон, лампу накаливания для промышленного производства

ный стержень, помещённый в стеклянный баллон. Такими лампами в 1873 г. была освещена одна из улиц Петербурга.

Американский изобретатель ***Томас Эдисон*** усовершенствовал лампу накаливания Лодыгина, заменив угольный стержень тонкой угольной нитью. Им же были изобретены винтовой цоколь лампы, поворотный выключатель, предохранитель с плавкой вставкой и штепсельное соединение. Лампа накаливания стала использоваться для освещения жилых помещений, фабричных и заводских цехов.

Основной частью современной лампы накаливания (рис. 110) является спираль из тугоплавкого металла (обычно из вольфрама). Баллон лампы наполняют инертными газами (обычно азотом и аргоном), что предотвращает окисление спирали и препятствует её испарению.

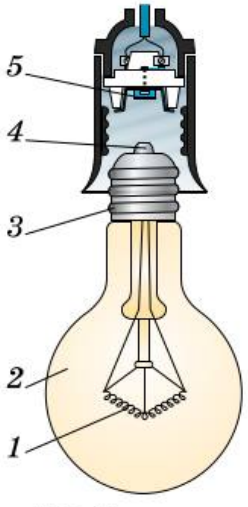


Рис. 110. Лампа накаливания:
1 — спираль; *2* — стеклянный баллон; *3* — цоколь; *4* — изолированное основание цоколя; *5* — пружинящий контакт патрона

Сегодня лампы накаливания всё чаще заменяют газоразрядными и светодиодными лампами, способствующими экономии электроэнергии. В таких лампах электрический ток протекает через газ (в газоразрядной лампе) или через выращенный специальным образом полупроводниковый кристалл (в светодиодной лампе).

Что представляет собой электрический ток в газах? При нормальных условиях газы состоят из электрически нейтральных атомов и молекул и не проводят ток. Именно поэтому, поворачивая выключатель и создавая воздушный промежуток между двумя точками электрической цепи, мы размыкаем её. Однако в результате воздействия определённых факторов, называемых *ионизаторами* (нагревание, действие рентгеновских лучей и др.), может происходить *ионизация газа* — распад его молекул на электроны и ионы. Если ионизированный газ поместить в созданное между электродами электрическое поле, то возникнет на-

правленное движение свободных заряженных частиц — электрический ток. Таким образом, *электрический ток в газе представляет собой направленное движение положительных ионов к катоду, а отрицательных ионов и электронов к аноду*. Электрический ток в газе иначе называют *газовым разрядом*.

Оказывается, если газовый промежуток находится под достаточно высоким напряжением, для возникновения газового разряда внешний ионизатор не требуется. При нормальных условиях газ является диэлектриком, однако в нём присутствует небольшое количество свободных электронов. В электрическом поле эти электроны будут двигаться к аноду, сталкиваясь на своём пути с нейтральными атомами. В сильном поле электрон разгоняется до такой скорости, что при столкновении с атомом ионизирует его. В результате образуется положительный ион и ещё один свободный электрон. Теперь уже два электрона налетают на новые атомы, ионизируя их и порождая новые электроны, и т. д. Число заряженных частиц очень быстро возрастает (рис. 111), вследствие чего возрастает сила тока. Если газ достаточно разрежен, то время между столкновениями увеличивается и электроны могут достичь необходимой для ионизации энергии в более слабом поле.

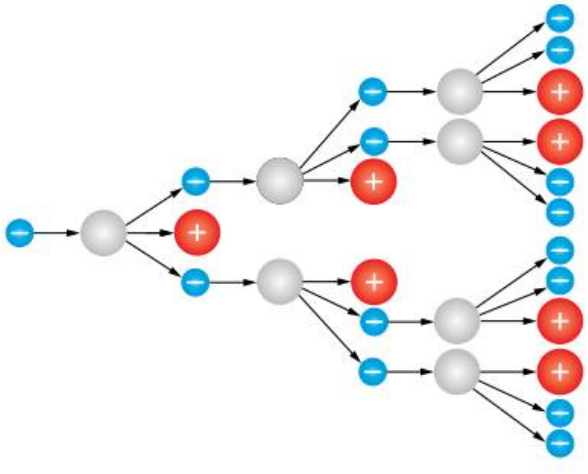


Рис. 111. Лавинообразное увеличение числа свободных заряженных частиц

На рисунке 112 показана современная энергосберегающая газоразрядная лампа, которая используется для освещения помещений. Она состоит из колбы, наполненной парами ртути, и пускорегулирующего устройства. Протекание тока в парах ртути вызывает появление невидимого ультрафиолетового излучения. На внутреннюю поверхность колбы нанесено специальное вещество — люминофор,

которое под действием ультрафиолетового излучения начинает светиться.

Обратим внимание, что газоразрядной лампой можно назвать и свечу Яблочкова: её ослепительное свечение обеспечивается существованием газового разряда между концами угольных стержней.

В конце XIX в. в металлургии получила распространение электрическая печь — камера, облицованная высокоогнеупорным материалом. Разогревается печь электрическим током, проходящим или через специальные нагревательные элементы, или непосредственно через руду, которую необходимо расплавить. В некоторых случаях действие электрических печей основано на применении газового разряда.



Рис. 112. Энергосберегающая лампа:
1 — пускорегулирующее устройство;
2 — стеклянная колба, покрытая люминофором;
3 — цоколь

В быту используется много различных электронагревательных приборов: электрический камин даёт дополнительное тепло в той части комнаты, где оно вам необходимо; электрические чайники служат для нагревания воды; на электроплитах быстро готовится пища; мокрые волосы сушит поток сухого горячего воздуха, создаваемый электрическим феном; выстиранное бельё гладят электрическим утюгом и т. п. Остановимся подробно на отдельных приборах.



Электронагревательные приборы

В современных квартирах на кухнях устанавливают электрические плиты. Они заменили плиты, работающие на твёрдом топливе, и газовые, так как являются экологически более чистыми: нет продуктов сгорания твёрдого топлива (золы, шлака, дыма), не происходит загрязнения окружающей среды. Электрические плиты имеют также технические преимущества: они снабжены системой автоматического регулирования температуры, которая позволяет при достижении нужной температуры автоматически отключать от электрической сети весь прибор или его часть (электронагревательный элемент или конфорки). При остывании электронагревательного элемента прибор автоматически включается в сеть.

1. Пользуясь рисунком 110, расскажите, как устроена лампа накаливания. **2.** Что такое ионизация газа? **3.** Что представляет собой электрический ток в газах? **4.** Пользуясь рисунком 112, расскажите, как устроена энергосберегающая лампа. **5.** Приведите примеры использования теплового действия тока. **6.** Какими свойствами должен обладать металл, из которого изготавливают спирали электроплит?

Если не касаться заряженного электроскопа, его заряд долгое время остаётся неизменным. Поместим рядом с шаром электроскопа зажжённую спичку — его листочки опадут. Как это объяснить?

УПРАЖНЕНИЕ 40

1. Какая основная часть присутствует у всех электронагревательных приборов? Какое действие тока в них используется?
2. Почему электрическую лампу накаливания (см. рис. 110) можно использовать как электронагревательный прибор?
3. Почему провод, с помощью которого настольная лампа включается в сеть, практически не нагревается, в то время как нить лампы раскаляется добела?
4. Степень нагревания элементов электроплит может регулироваться. Как этого достигают?

Это любопытно...

Молния

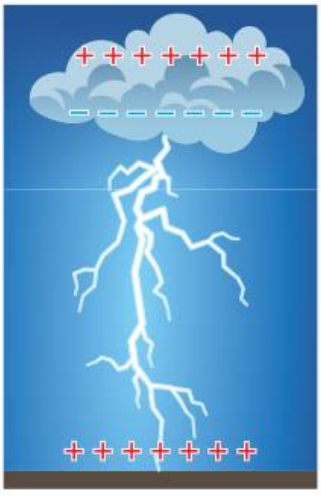


Рис. 113. Молния — пример электрического тока в газах

Газовый разряд в природе явление отнюдь не редкое. Ежегодно наблюдается около 15 миллионов электрических разрядов в атмосфере. Догадались, о чём идёт речь? Конечно! Ярким проявлением газового разряда является молния, которая наблюдается обычно во время грозы и сопровождается яркой вспышкой света и громом. Молния возникает между облаками или между облаком и землёй. Сила тока в молнии может достигать сотен тысяч ампер, а напряжение между облаком и землёй — миллиарда вольт. Энергия средней молнии такова, что с её помощью можно было бы вскипятить 1000 чайников воды!

Причиной молнии является электризация облаков. Чаще всего нижняя часть облака имеет отрицательный заряд, а верхняя — положительный.

При этом под облаком на поверхности Земли возникает положительный заряд (объясните почему) (рис. 113). Между облаком и землёй создаётся электрическое поле. Если его напряжённость становится достаточно большой $\left(3 \cdot 10^6 \frac{\text{Н}}{\text{Кл}} \text{ при нормальных условиях}\right)$, происходит газовый разряд. Температура газа при разряде молнии может превышать 100 000 °С.

Молния таит в себе огромную разрушительную силу. Удары молний очень опасны и могут приводить к разрушению различных устройств, зданий, вызывать пожары.



Зона защиты громоотвода представляет собой конус

Средство для защиты высоких зданий от удара молнии первым предложил американский учёный и государственный деятель ***Бенджамин Франклин*** (1706—1790). Он рекомендовал устанавливать на высоких зданиях громоотводы — высокие металлические острия, изолированные от здания и соединённые проводником с землёй. Защищённое громоотводом пространство можно приблизительно определить конусом, радиус основания которого равен высоте громоотвода. Все предметы внутри этого конуса всегда защищены от удара молнии. Громоотводы устанавливают для защиты домов, городских сооружений, сельских построек.

Когда громоотводы стали активно использовать для защиты от молний, некоторые офицеры пытались обезопасить себя от удара молнии высоко подняв шпагу. Как вы думаете, правильно ли это?

ЗАДАНИЕ 23

1. Составьте правила безопасного поведения во время грозы.
2. Найдите в вашем населённом пункте здания, защищённые громоотводом.

§ 49 КОРОТКОЕ ЗАМЫКАНИЕ. ПРЕДОХРАНИТЕЛИ

Для всех электрических цепей есть максимально допустимая сила тока. Она рассчитывается по нагрузке (приборам и потребителям), включаемой в цепь. Для электропроводки специально подбирают площадь поперечного сечения подводящих проводов и их изоляцию. Бывают случаи, когда в цепь включают одно-

временно много потребителей, больше, чем рассчитывали. Тогда сила тока резко возрастает, и в цепи возникает перегрузка. Подводящие провода сильно нагреваются, что может привести к пожару.

Резкое возрастание силы тока так же возможно, если при параллельном соединении один из потребителей обладает очень маленьким сопротивлением. Например, если из-за повреждения изоляции образуется контакт между проводами, идущими к лампе. Такую ситуацию называют ***коротким замыканием***. При этом происходит резкое уменьшение полного сопротивления цепи.

Короткое замыкание может возникнуть, например, при ремонте проводки под напряжением или при случайном соприкосновении оголённых проводов. В таких случаях говорят: «Провода закоротили». Во всех случаях, когда в цепи резко возрастает сила тока, провода могут перегреться и стать причиной пожара.

Чтобы этого не произошло, в электрическую цепь включают ***предохранители***, назначение которых — мгновенно обесточить электрическую цепь, если сила тока в ней окажется выше допустимой нормы. Предохранители бывают разных типов, у многих из них есть главная часть, которая при резком возрастании силы тока сильно нагревается. У *плавкого предохранителя* (рис. 114, *а*) это проволока из легкоплавкого сплава, которая при нагревании плавится. В результате цепь размыкается.



а)



б)

Рис. 114. Предохранитель:
а — плавкий;
б — пробка-автомат

Так же широко применяются предохранители, действие которых основано на расширении тел при нагревании. Основной элемент в них — биметаллическая пластина. Такие предохранители получили название *автоматическая пробка* (рис. 114, *б*). Как же они работают?

Ток, проходя по биметаллической пластине, нагревает её. Если сила тока в цепи превышает допустимое значение, биметаллическая пла-

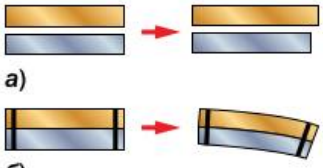


Рис. 115. При нагревании биметаллическая пластина изгибается

стина сильно нагревается и изгибается, что приводит к размыканию цепи.

Биметаллическая пластина состоит из двух одинаковых по размеру пластин из разных металлов, скреплённых вместе. При нагревании они изменяют свою длину по-разному (рис. 115, *а*), и поэтому биметаллическая пластина изгибается (рис. 115, *б*). После остывания пластины предохранитель вновь готов к использованию. Такие предохранители не перегорают и не требуют замены.

1. По какой причине может значительно увеличиться сила тока в цепи? **2.** В чём причина короткого замыкания? **3.** Чем объяснить, что при коротком замыкании сила тока в цепи может достигнуть огромного значения? **4.** Каково назначение предохранителей, включаемых в цепь?

1. Почему нить накала в современных лампах делают из вольфрама?

2. В какой лампе тоньше нить — в более или в менее мощной? Почему?

УПРАЖНЕНИЕ 41

1. Спираль утюга мощностью 1 кВт изготовлена из нихромовой проволоки площадью поперечного сечения 0,1 мм^2. Утюг включается в сеть напряжением 220 В. Определите длину проволоки.
2. Как изменилась мощность тока в электроплите, если при ремонте проволоку её нагревательного элемента укоротили в 3 раза? Ответ обоснуйте.
3. Две лампы имеют одинаковую мощность. По номиналу одна лампа рассчитана на напряжение 220 В, а вторая — на 127 В. Отличаются ли сопротивления ламп? Во сколько раз?
4. Перегоревшую спираль электрического утюга мощностью 1,5 кВт укоротили на треть. Какой при этом стала мощность утюга?

ИТОГИ ГЛАВЫ

Вы познакомились с отличным от вещества видом материи — электрическим полем. Знаете, как его обнаружить, значит, можете доказать, что оно существует.

Понимаете, в чём заключается явление электризации, что такое электрический ток. Можете назвать и объяснить действия электрического тока, рассказать, что представляет собой электрический ток в различных средах.

Знаете закон Кулона и закон сохранения электрического заряда. Можете рассчитать силу тока, напряжение, работу и мощность тока, сопротивление проводника. Знаете, какими приборами эти величины измерить и как включить их в электрическую цепь. Можете применить закон Ома для расчёта электрических цепей с последовательным и параллельным соединением проводников, закон Джоуля—Ленца для определения количества теплоты, выделяемого в проводнике при прохождении по нему тока.

ОБСУДИМ?

Ученик Ваня Петров приехал к бабушке на зимние каникулы. Его попросили нарядить ёлку, выдали игрушки и старую гирлянду. Когда Ваня включил гирлянду в сеть напряжением 220 В, одна из лампочек на ней особенно ярко вспыхнула и гирлянда погасла. Рассмотрев гирлянду, Ваня обнаружил, что её лампочки соединены последовательно и одна из них почернела изнутри. Немного подумав, он предложил другую схему соединения ламп гирлянды, более удобную для эксплуатации.

Какую схему нарисовал Иван? Предложите варианты соединения ламп, при которых гирлянда будет работать даже при перегоревшей лампочке и при включении не будет перегорать. Аргументируйте своё предложение.

ПРОЕКТЫ И ИССЛЕДОВАНИЯ

1. «Модели строения атома» (возможная форма: презентация, макет, плакат).
2. «Статическое электричество, я тебя знаю!» (возможная форма: презентация, реферат, опыт, викторина).
3. «Фруктовые гальванические элементы, или сколько нужно лимонов, чтобы загорелась лампочка» (возможная форма: презентация, опыт).

Глава 3 ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ЯВЛЕНИЯ

§ 50 ПОСТОЯННЫЕ МАГНИТЫ

Каждый из вас знает о существовании магнитов. С помощью магнитов в закрытом положении удерживаются дверцы кухонных полок, шкафов и холодильников. На письменном столе магнит удерживает металлические скрепки и прочую мелочь, содержащую железо. Используются магниты и на производстве в устройстве различных механизмов.

Тела, способные длительное время сохранять свойство притягивать железо или его сплавы, называют ***постоянными магнитами*** или просто ***магнитами***.



Рис. 116. Притяжение металлических тел естественным магнитом

Слово «магнит» происходит от названия региона Магнисия в Фессалии в Центральной Греции, который в древности был богат залежами минералов, способных притягивать железные предметы (рис. 116). Такие минералы, например магнитный железняк, являются природными, *естественными магнитами*.

Со временем люди научились создавать и *искусственные магниты*. Так, было установлено, что если стальную спицу положить на магнит, то она сама станет магнитом или, как говорят, *намагнитится*. Некоторое время спица будет оставаться в таком состоянии, сохраняя способность притягивать железные опилки, гвозди и др.

Возьмём два стержня одинакового размера — стальной и железный — и поместим их вблизи одного и того же магнита. В присутст-



Рис. 117. Постоянные магниты

вии магнита стержни приобретут способность притягивать железные предметы, т. е. намагнитятся. Уберём магнит. Железный стержень почти полностью размагнитится, а стальной сохранит значительную часть магнитных свойств. Поэтому для изготовления искусственных магнитов используют некоторые сорта стали, а не железо.

Магниты могут быть различной формы, например полосовыми или дугообразными (подковообразными) (рис. 117). Те места магнита, вблизи которых обнаруживается наиболее сильное магнитное действие, называют *полюсами магнита* (рис. 118).

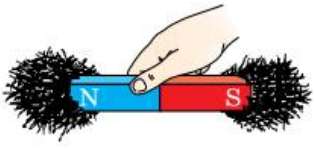


Рис. 118. Полюсы магнита

Магнит имеет два полюса: *северный магнитный* и *южный магнитный*. Северный полюс обозначают латинской буквой N и окрашивают в синий цвет, а южный обозначают буквой S и окрашивают в красный. Если подвесить полосовой магнит за середину на нити, то независимо от начального положения он повернётся так, что одним полюсом будет указывать на север, а другим — на юг. Отсюда и названия полюсов. Магнитная стрелка компаса — это маленький полосовой магнит.



Рис. 119. Взаимодействие магнитных стрелок

Приблизим магнитную стрелку к другой такой же стрелке. Они повернутся и установятся противоположными полюсами друг против друга (рис. 119). Стрелка будет таким же образом взаимодействовать с любым магнитом.

Проведём другой опыт. Возьмём два полосовых магнита и будем приближать их друг к другу сначала одноимёнными, затем разноимёнными полюсами. В первом случае почувствуем отталкивание, а во втором — притяжение. Можно сделать вывод: *магниты отталкиваются одноимёнными полюсами и притягиваются разноимёнными*. В этом опыте также можно заметить, что с уменьшением расстояния между полюсами магнитов сила их взаимодействия возрастает и, наоборот, с увеличением расстояния сила уменьшается.

Магниты могут как притягиваться, так и отталкиваться подобно электрическим зарядам. Но вот что интересно. Если отрицательные заряды можно отделить от положительных (например, при электризации), то отделить северный полюс магнита от южного невозможно. Другими словами, нельзя получить магнит с одним полюсом. Так, если взять полосовой магнит и разрезать его посередине, то получится два магнита с двумя полюсами (северным и южным) у каждого. В этом можно убедиться с помощью магнитной стрелки.

Наша планета Земля является гигантским магнитом. Именно поэтому магнитная стрелка, которая может свободно поворачиваться, устанавливается в направлении север—юг, если рядом с ней нет других магнитов. Более подробно о земном магнетизме вы узнаете из § 54.

1. Какие тела называют постоянными магнитами? **2.** Что называют магнитными полюсами магнита? **3.** Как взаимодействуют между собой постоянные магниты? **4.** Можно ли изготовить магнит, имеющий только один полюс?

1. Притяжение магнитов напоминает притяжение наэлектризованных тел. Приведите аргументы в пользу того, что взаимодействие магнитов не является электрическим.

2*. Магнитный конструктор содержит детали треугольной формы. Экспериментируя с конструктором, ученики установили, что детали притягиваются, какими бы сторонами их друг к другу ни подносили. Как это можно объяснить?

УПРАЖНЕНИЕ 42

- Почему металлические опилки, притянувшиеся к одному полюсу магнита, расходятся своими концами?

ЗАДАНИЕ 24

- Прикрепите магнитную стрелку к пробке и опустите в воду. Как будет вести себя стрелка? Поднесите к стрелке постоянный магнит. Что изменится в поведении стрелки?

§ 51 МАГНИТНОЕ ПОЛЕ



ХАНС КРИСТИАН ЭРСТЕД

(1777—1851)

Датский физик. Обнаружил действие электрического тока на магнитную стрелку, что привело к возникновению новой области физики — электромагнетизма

Познакомившись с действиями электрического тока, вы узнали о существовании магнитного действия тока. Вспомните, что гвоздь, обмотанный проводником с током, приобретает магнитные свойства (см. рис. 84). Поэтому можно предположить, что магнитное действие тока существует из-за того, что электрические и магнитные явления связаны между собой. В 1820 г. датский учёный ***Ханс Кристиан Эрстед*** впервые установил такую связь.

Проделаем опыт. Соберём электрическую цепь, показанную на рисунке 120. Установим магнитную стрелку на подставке, дадим ей успокоиться. Поместим над стрелкой параллельно её оси проводник и замкнём цепь. Стрелка повернётся, стремясь расположиться перпендикулярно проводнику (см. рис. 120). Именно это наблюдал Эрстед. Значит, электрический ток действует на магнитную стрелку на расстоянии!

Вскоре после открытия Эрстеда было обнаружено, что и магниты действуют на проводники с током, а два параллельных проводника с током

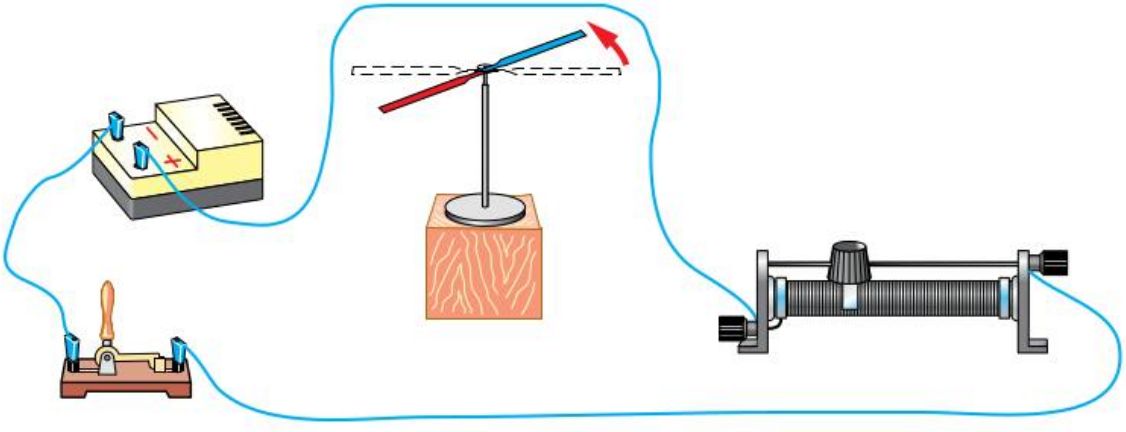
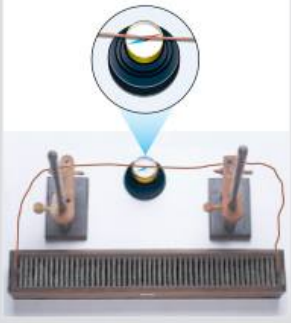


Рис. 120. Взаимодействие проводника с током и магнитной стрелки

взаимодействуют друг с другом подобно магнитам — притягиваются или отталкиваются (см. рис. 91).

Наблюдаемые взаимодействия объясняются тем, что намагниченное тело и проводник с током порождают в окружающем пространстве ***магнитное поле***, действующее на другие намагниченные тела и проводники с током с некоторой силой. Её называют ***магнитной силой***.

Если изменить направление тока в проводнике, то магнитная стрелка повернётся на 180°. Следовательно, направление магнитной силы зависит от направления тока.



Опыт Эрстеда

Магнитное поле возникает вокруг намагниченных тел и проводников с током, подобно тому, как вокруг наэлектризованных тел возникает электрическое поле. Магнитное поле материально, его можно обнаружить по действию на намагниченные тела и проводники с током.

До Эрстеда магнитные и электрические явления рассматривались как раздельные, независимые друг от друга. Заслуга Эрстеда заключается в том, что он установил связь между магнитными и электрическими явлениями.

Узнав об открытии Эрстеда и проведя ряд опытов, Ампер предположил, что действие постоянного магнита объясняется существованием внутри него замкнутых микроскопических электрических токов. Если токи расположены хаотически по отношению друг к другу, тело не обнаруживает магнитных свойств. Если же токи расположены согласованно, так что их действия усиливают друг друга, тело является магнитом (рис. 121). Как показало дальнейшее развитие науки, гипотеза Ампера оказалась справедливой.

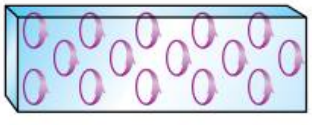


Рис. 121. Иллюстрация гипотезы Ампера

Итак, *магнитное поле существует вокруг движущихся электрических зарядов (токов) и оказывает силовое действие только на движущиеся заряды.*

1. В чём состоит опыт Эрстеда? **2.** Какие физические объекты создают магнитное поле? **3.** На какие физические объекты действует магнитное поле? **4.** В чём заключается гипотеза Ампера?

1. Во времена Ампера строение атома не было известно, и природа микроскопических токов оставалась непонятной. Используя знания о планетарной модели атома, выдвиньте гипотезу о том, что могут представлять собой токи Ампера.

2*. Магнитная стрелка, помещённая около провода, отклонилась при пропускании по нему электрического тока. За счёт какой энергии совершена работа, необходимая для поворота стрелки?

ЗАДАНИЕ 25

- Через середину листа картона пропустите прямой проводник (например, полоску фольги). Насыпьте на картон железные опилки или мелко настриженные волосы. Пропустите электрический ток через проводник от батарейки. Слегка постукивая по картону, наблюдайте расположение опилок вокруг проводника.

  Поставьте на картон магнитную стрелку (компас), заметьте её расположение. Измените направление тока в проводнике. Меняется ли направление магнитной стрелки? Опишите свои наблюдения.

Это любопытно...

Из истории электромагнетизма

21 июля 1820 г. в Копенгагене вышла на латинском языке брошюра «Опыты, касающиеся действия электрического конфликта на магнитную стрелку». Автор брошюры, профессор Копенгагенского университета Эрстед, разослал её во все учебные учреждения и физические журналы и этим актом подчеркнул важность своего открытия. И действительно, открытие Эрстеда произвело впечатление научной сенсации и вызвало столь мощный резонанс, что можно без преувеличения сказать: произошло второе рождение электричества.

В чём была причина шумного успеха такого простого опыта? Как выяснилось, до Эрстеда уже были известны факты намагничивания стальных игл электрической искрой, размагничивания компасов молнией. Но эти факты носили характер случайных наблюдений и не только не обобщались, но даже и не описывались сколько-нибудь точно. Например, русские поморы, опытным путём открывшие «магнитные бури» компаса «на зорях» (т. е. северных сияниях), также могли претендовать на приоритет в открытии электромагнетизма.

Заслуга Эрстеда заключается, прежде всего, в том, что он понял важность и новизну своего открытия и привлёк к нему внимание учёного мира.

Принципиальная важность открытия Эрстеда состояла в том, что было открыто новое взаимодействие — электромагнитное. Выявленное электромагнитное взаимодействие открывало широкие возможности технических приложений, о которых вы узнаете позже.

ЗАДАНИЕ 26

- Спланируйте и проведите опыт Эрстеда в домашних условиях. Снимите домашний эксперимент на видео или сделайте фотографии.

§ 52 МАГНИТНОЕ ПОЛЕ ПРОВОДНИКОВ С ТОКОМ И ПОСТОЯННЫХ МАГНИТОВ. МАГНИТНЫЕ ЛИНИИ

Как вы уже знаете, вокруг проводника с током существует магнитное поле, которое оказывает действие на магнитную стрелку. Для исследования магнитного поля тока будем использовать железные опилки. Они намагничиваются и ведут себя в магнитном поле как маленькие магнитные стрелки.

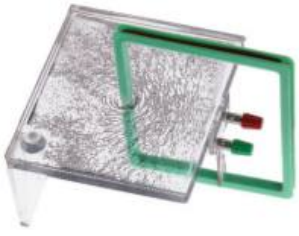


Рис. 122. Картина магнитного поля прямого проводника с током

Исследуем поведение опилок в магнитном поле, созданном прямым проводником с током. Для этого расположим проводник вертикально, пропустив его сквозь лист картона, вокруг проводника на картон насыплем тонкий слой железных опилок. При включении электрического тока в проводнике железные опилки придут в движение и расположатся в определённом порядке (рис. 122). Они образуют окружности разного радиуса с одним центром (концентрические окружности), через который проходит проводник.

Линии, вдоль которых в магнитном поле располагаются оси маленьких магнитных стрелок, называют магнитными линиями.

Направление, которое указывает северный полюс магнитной стрелки в каждой точке поля, принято за *направление магнитной линии* (линии магнитного поля).

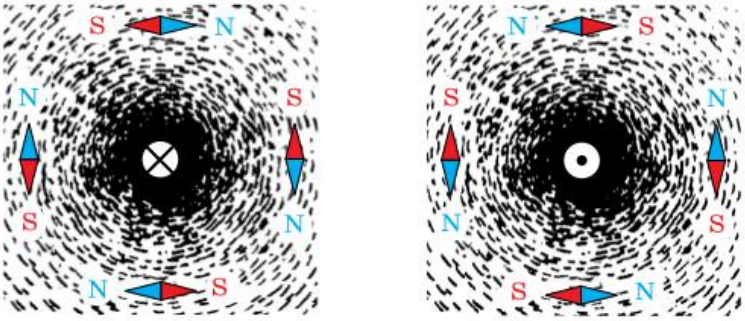


Рис. 123. Расположение магнитных стрелок вокруг проводника с током

Экспериментально мы определили форму магнитных линий прямого проводника с током. Выясним теперь, связано ли направление магнитных линий с направлением тока в проводнике. Проведём аналогичный опыт (см. рис. 122), дополнительно поместив вокруг проводника с током на одинаковом расстоянии от него несколько магнитных стрелок (рис. 123)[1].

При включении тока магнитные стрелки повернутся так, что их оси расположатся вдоль магнитной линии, т. е. по касательным к окружности, в центре которой расположен проводник (рис. 123, *а*).

Изменим направление тока в проводнике. Все магнитные стрелки повернутся на 180° (рис. 123, *б*).

Таким образом, опыт показал, что *направление магнитных линий связано с направлением тока в проводнике.*

Эта связь может быть выражена ***правилом буравчика*** (или *правилом правого винта*) (рис. 124): **если направление поступательно-**

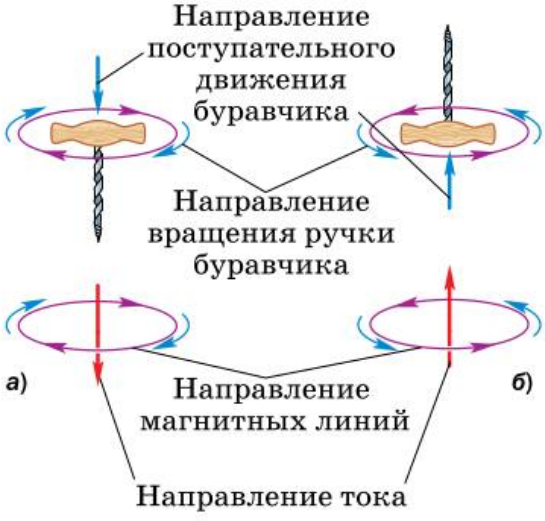


Рис. 124. Применение правила буравчика: проводник с током расположен в плоскости чертежа

[1] Если проводник с током расположен перпендикулярно плоскости чертежа (на него смотрят сверху), кружком показывают сечение проводника. Направление тока обозначают точкой, если ток направлен на наблюдателя, и крестиком, если ток направлен от наблюдателя.

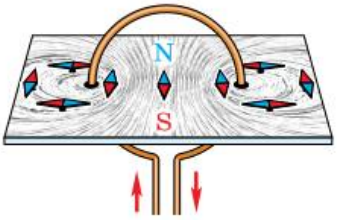


Рис. 125. Картина магнитного поля кругового витка с током

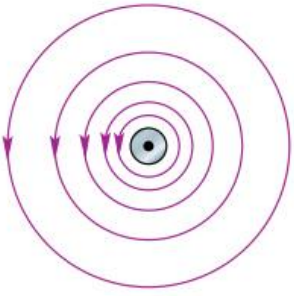
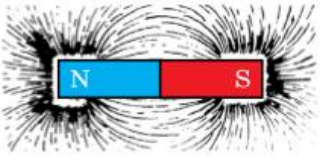
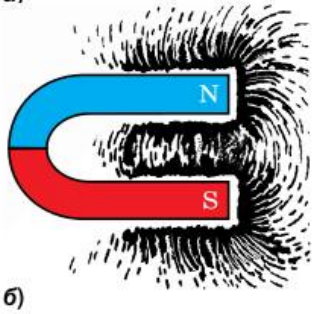


Рис. 126. Магнитные линии магнитного поля, созданного прямым проводником с током



а)



б)

Рис. 127. Магнитные линии поля полосового и дугообразного магнитов

го движения буравчика совпадает с направлением тока в проводнике, то направление вращения ручки буравчика совпадает с направлением линий магнитного поля тока.

С помощью правила буравчика по направлению тока можно определить направление линий магнитного поля, создаваемого током, а по направлению линий магнитного поля — направление тока, создающего поле.

На рисунке 125 показана полученная с помощью железных опилок картина магнитного поля, создаваемого витком с током. Магнитные линии и в этом случае представляют собой замкнутые кривые.

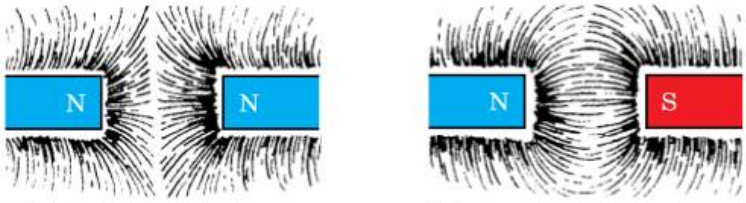
Форма магнитных линий может быть разной. Она зависит от формы проводника, по которому течёт ток. Но, независимо от формы, *магнитная линия всегда замкнута*.

Магнитную линию можно провести через любую точку пространства, где есть магнитное поле. Изображая магнитное поле с помощью магнитных линий, их проводят гуще в той области, где действие поля сильнее. Например, по мере удаления от прямого проводника с током действие магнитного поля ослабевает: чем дальше от проводника расположена магнитная стрелка, тем медленнее она поворачивается при включении тока. Поэтому вдали от проводника магнитные линии проводят реже (рис. 126).

Воспользуемся железными опилками, чтобы получить представление о картине магнитного поля постоянных магнитов (рис. 127).

Линии магнитного поля постоянного магнита — замкнутые, как и линии магнитного поля тока. Вне магнита они выходят из северного полюса магнита и входят в южный, замыкаясь внутри магнита.

На рисунке 128, *а* показаны линии магнитного поля двух магнитов, обращённых друг



а) б)

Рис. 128. Магнитные линии поля двух магнитов

к другу одноимёнными полюсами, а на рисунке 128, *б* — двух магнитов, обращённых друг к другу разноимёнными полюсами.

1. Почему для изучения магнитного поля можно использовать железные опилки? **2.** Как располагаются железные опилки в магнитном поле прямого проводника с током? **3.** Что называют магнитной линией? **4.** Опишите опыт, позволяющий показать, что направление магнитных линий связано с направлением тока в проводнике. **5.** Сформулируйте правило буравчика. **6.** Как можно получить представление о магнитном поле постоянного магнита?

УПРАЖНЕНИЕ 43

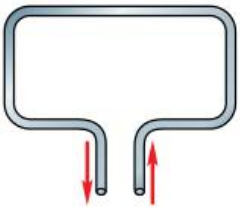


Рис. 129

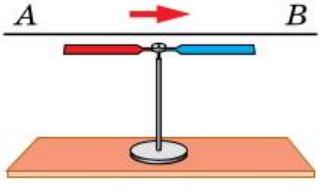


Рис. 130

1. На рисунке 129 изображён проволочный прямоугольник, направление тока в нём показано стрелками. Перечертите рисунок в тетрадь и, пользуясь правилом буравчика, начертите вокруг каждой из его четырёх сторон по одной магнитной линии, указав стрелкой её направление.
2. Каким полюсом повернётся к наблюдателю магнитная стрелка, если ток в проводнике направлен от *A* к *B* (рис. 130)? Изменится ли ответ, если стрелку поместить над проводом?
3. На полу лаборатории под линолеумом проложен прямой провод. Как определить место нахождения провода, не вскрывая линолеума?

§ 53 МАГНИТНОЕ ПОЛЕ КАТУШКИ С ТОКОМ. ЭЛЕКТРОМАГНИТЫ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ

В предыдущем параграфе вы познакомились с магнитным полем прямого тока и витка с током. Рассмотрим теперь другой случай, кото-

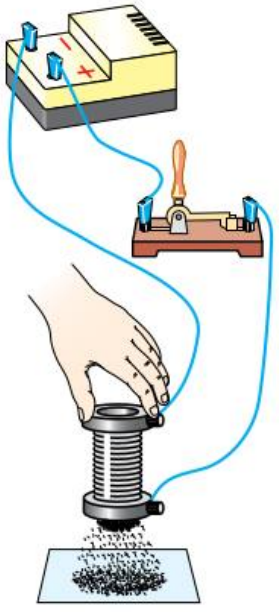


Рис. 131. Притяжение железных опилок катушкой с током

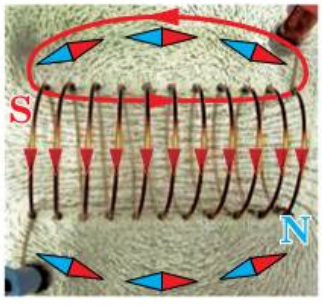


Рис. 132. Магнитные линии катушки с током



Рис. 133. Определение направления линий магнитного поля внутри соленоида

рый представляет наибольший практический интерес: магнитное поле, создаваемое катушкой с током.

Устройство, изображённое на рисунке 131, называют *соленоидом* или катушкой. Она состоит из большого числа витков провода, намотанного вплотную на цилиндрический каркас, изготовленный из диэлектрика. При протекании тока по катушке вокруг неё возникает магнитное поле, железные опилки притягиваются к её концам, т. е. катушка с током становится магнитом. При отключении тока опилки отпадают.

С помощью магнитных стрелок или железных опилок можно найти форму магнитных линий катушки (рис. 132). Как и у витка с током, линии магнитного поля катушки с током представляют собой замкнутые кривые. Внутри катушки магнитные линии почти параллельны друг другу, а снаружи они искривляются и замыкаются.

Магнитное поле катушки с током подобно полю постоянного полосового магнита. Как и магнит, катушка с током имеет два полюса — северный и южный, расположенных на её торцах. Вне катушки магнитные линии направлены от северного полюса к южному. Две катушки или катушка и магнит взаимодействуют подобно двум магнитам.

Для определения направления линий магнитного поля соленоида удобно пользоваться ***правилом правой руки*: если обхватить соленоид ладонью правой руки, направив четыре пальца по направлению тока в витках, то отставленный большой палец покажет направление линий магнитного поля внутри соленоида** (рис. 133).

Зная направление тока в соленоиде, по правилу правой руки можно определить направление магнитных линий поля внутри него, а зна-

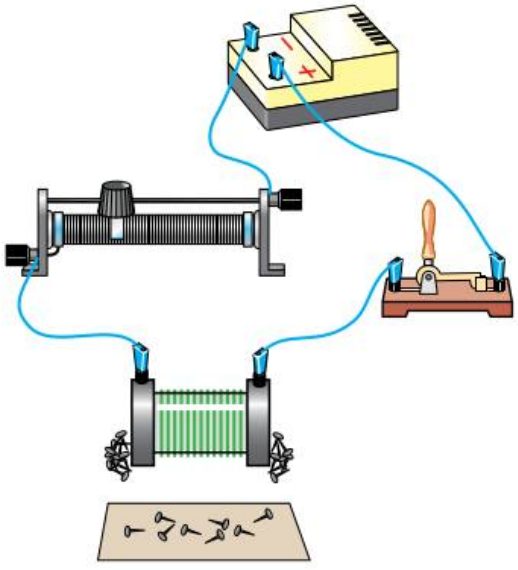


Рис. 134. Действие магнитного поля катушки

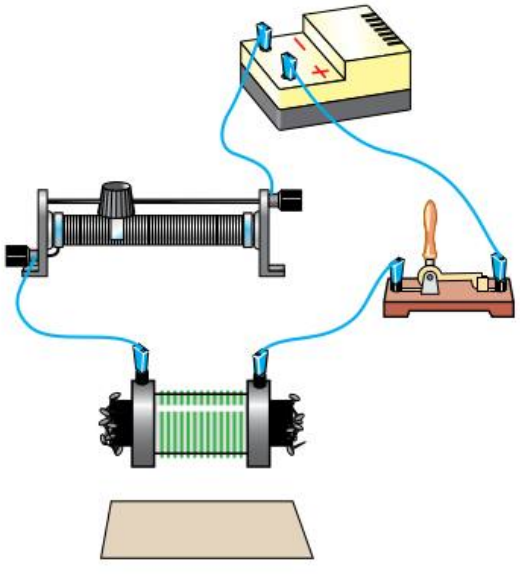


Рис. 135. Действие магнитного поля катушки с железным сердечником

чит, и его магнитные полюсы. И наоборот, по направлению магнитных линий поля внутри соленоида или расположению его полюсов можно определить направление тока в витках соленоида.

Как можно усилить магнитное действие катушки? Опыт показывает, что при одинаковой силе тока катушка с бóльшим числом витков притягивает больше железных опилок, чем катушка с меньшим числом витков. Следовательно, *магнитное действие катушки с током тем сильнее, чем больше число витков в ней.*

Магнитное действие катушки зависит и от силы тока в ней. Для выяснения этой зависимости соберём электрическую цепь, изображённую на рисунке 134. Силу тока в цепи будем изменять реостатом. Судить о действии магнитного поля катушки с током можно по количеству гвоздиков, притянувшихся к ней. Опыт показывает, что *при увеличении силы тока действие магнитного поля катушки с током усиливается, при уменьшении — ослабляется.*

Можно усилить магнитное действие катушки с током, вставив в неё железный стержень — сердечник (рис. 135). Следовательно, *магнитное действие катушки с сердечником сильнее, чем той же катушки без сердечника.*

Катушку с железным сердечником называют электромагнитом.

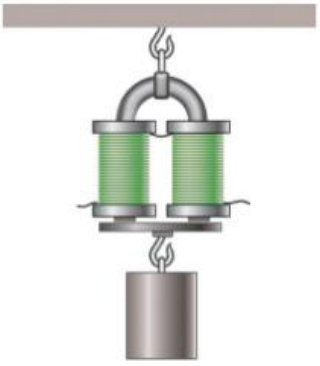


Рис. 136. Дугообразный электромагнит



Рис. 137. Применение электромагнитов

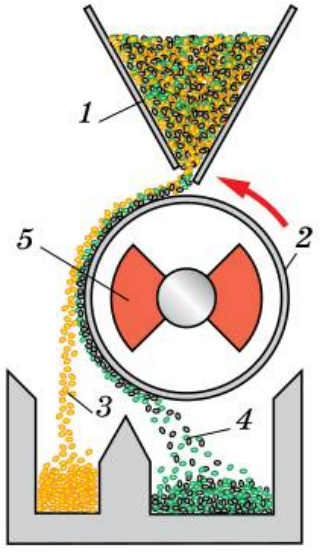


Рис. 138. Магнитный сепаратор

Электромагнит (рис. 136) притягивает железные предметы лишь тогда, когда в его катушках течёт ток. Поэтому электромагнитом легко управлять — нужно лишь замкнуть или разомкнуть его электрическую цепь. Удобно, что, изменяя силу тока, можно регулировать магнитное действие электромагнита.

В зависимости от назначения электромагниты можно изготавливать самых различных размеров. Электромагниты, обладающие большой подъёмной силой, используют на заводах для переноски тяжёлых стальных или чугунных изделий, стружек, слитков (рис. 137).

На рисунке 138 показан в разрезе *магнитный сепаратор* для зерна. С помощью сепаратора отделяют полезные зёрна злаковых культур от семян сорняков. Для этого в смесь семян сорняков и полезных злаков добавляют магнитный порошок. Зёрна злаков гладкие, а семена сорняков шероховатые, поэтому к сорнякам прилипают частички магнитного порошка. Эту смесь *1* высыпают из бункера на вращающийся барабан *2*, внутри которого находится неподвижный электромагнит *5*. Семена сорняков *4* с частичками порошка притягиваются магнитом.

При повороте барабана семена сорняков вместе с частицами порошка и зёрна злаков *3* разделяются и попадают в разные ёмкости. Так зерно полезных злаков очищают от ненужных примесей.

Существуют магнитные сепараторы, которые используются и в других областях промышленности: в цехах по производству стекла и пластмассы, химической и деревообрабатывающей промышленности, на предприятиях, которые занимаются утилизацией и переработкой твёрдых бытовых отходов.

1. Как показать, что магнитное поле катушки с током подобно магнитному полю полосового магнита? **2.** Сформулируйте правило правой руки. **3.** Перечислите способы, которыми можно усилить магнит-

ное действие катушки с током. **4.** Что называют электромагнитом? **5.** Для каких целей используют на заводах электромагниты? **6.** Как устроен магнитный сепаратор для зерна?

1. В каком направлении устанавливается катушка с током, подвешенная на длинных тонких проводниках?

2. Когда нет перемещения тела, то, как вы уже знаете, работа не совершается. На что, по вашему мнению, расходуется энергия, подводимая к электромагниту, когда он «держит» груз?

3. Почему при повороте барабана (см. рис. 138) семена сорняков и частички порошка отпадают, а не остаются на его поверхности?

УПРАЖНЕНИЕ 44

1. Определите направление тока в катушке и полюсы источника тока (рис. 139), если при прохождении тока в катушке возникают указанные на рисунке магнитные полюсы.

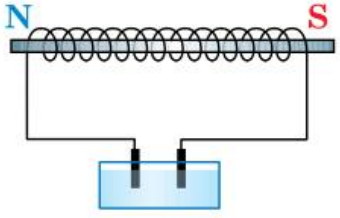


Рис. 139

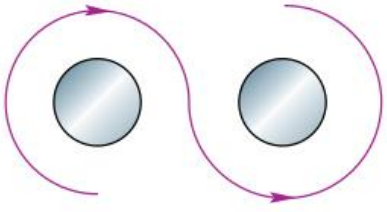


Рис. 140

2. Направление тока в витках обмотки подковообразного электромагнита показано стрелками (рис. 140). Определите полюсы электромагнита.

Это любопытно...

Реле и их применения в технике

В различных областях техники, особенно в автоматике, широко применяются электромагнитные приборы, называемые *реле*.

Основной частью всякого реле является электромагнит. Когда по обмотке электромагнита проходит ток, якорь *1* притягивается к электромагниту, а скреплённая с ним пластина *2* замыкает контакты *3* (рис. 141). Цепь электромагнита называют первичной цепью реле, а цепь, замыкаемую контактами, — вторичной.

Когда в первичной цепи реле тока нет, пружина *4* оттягивает якорь, и контакты *3* размыкаются.

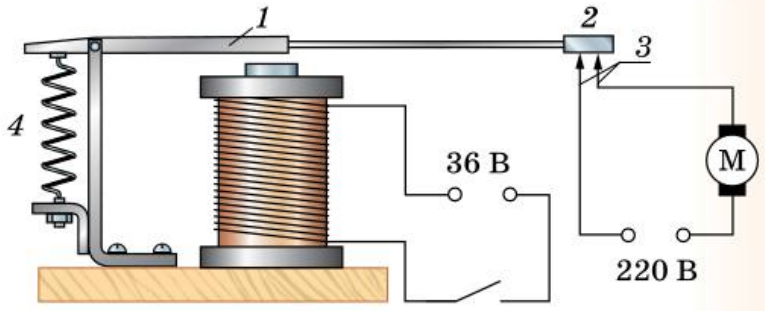


Рис. 141. Устройство реле

Применение реле даёт возможность управлять довольно сложными процессами на расстоянии, например, пускать и останавливать электродвигатели различных машин, открывать и закрывать краны на трубопроводах, регулировать нагрев печей и т. п. Причём напряжение в первичной цепи может быть малым, что экономически очень выгодно.



Какие изменения произойдут в работе реле, если заменить пружину *4* (см. рис. 141) пружиной большей жёсткости?

§ 54 МАГНИТНОЕ ПОЛЕ ЗЕМЛИ

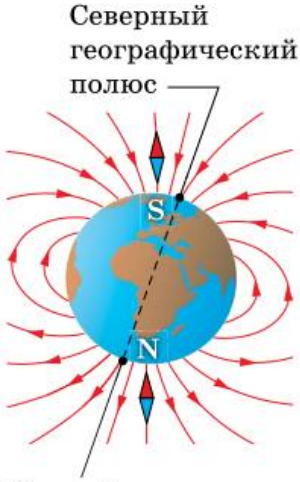


Рис. 142. Линии магнитного поля Земли

Из курса географии вам известно, что Земля имеет собственное магнитное поле (рис. 142). Упрощённо её можно рассматривать как большой полосовой магнит.

Магнитные полюсы Земли определяются как условные точки (небольшие области), в которых магнитные линии перпендикулярны земной поверхности. Южный магнитный полюс Земли находится вблизи Северного географического полюса, а северный магнитный полюс — вблизи Южного географического полюса (см. рис. 142). Поскольку географические и магнитные полюсы Земли не совпадают, стрелка компаса (рис. 143) только приблизительно указывает направление на север.

Исследования показывают, что положения магнитных полюсов Земли медленно изменяются со временем, причём скорости дрейфа



Рис. 143. Компас

южного и северного магнитных полюсов различаются. По данным на 2020 г. северный и южный магнитные полюсы имели соответственно координаты 64,1° ю. ш., 135,9° в. д. и 86,5° с. ш., 162,9° в. д.

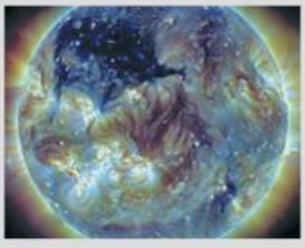
Земля обладает магнитным полем в основном благодаря своей структуре и процессам, происходящим в её ядре, — конвекции жидких металлов во внешнем ядре Земли, где текут электрические токи. Магнитное поле Земли простирается на несколько тысяч километров и создаёт защиту от потока заряженных частиц, испускаемых Солнцем.

Огромное значение имеет магнитное поле для систем навигации судов, летательных аппаратов и космических кораблей.

Как вы знаете, во многих местах Земли имеются залежи железной руды, которая представляет собой природный магнит. Если залежи железной руды на небольшой глубине значительны, то в этих областях магнитная стрелка существенно отклоняется от направления на магнитные полюсы Земли. Поэтому такие области называют областями ***магнитной аномалии*** (в пер. с греч. «отклонение, неправильность»). Известны Бразильская, Канадская, Восточно-Сибирская, Курская (одна из крупнейших) магнитные аномалии.



а)



б)

Магнитные бури:
а — на Солнце;
б — на Земле

Отклонения магнитной стрелки от ожидаемого направления могут быть не только постоянными, как в областях магнитных аномалий, но и кратковременными. Это происходит из-за изменений магнитного поля Земли в результате взаимодействия с ним заряженных частиц, выбрасываемых Солнцем в период своей активности. Такие изменения магнитного поля Земли называют ***магнитными бурями***. Они сопровождаются не только красивыми полярными сияниями, но и неприятными сбоями в работе радиоэлектронной аппаратуры, систем связи и навигации.

За состоянием магнитного поля Земли ведётся постоянное наблюдение наземными средствами и гидрометеорологическими спутниками.

Магнитное поле имеется и у других планет, например у Сатурна и Юпитера. Магнитное поле Юпитера в 20 раз сильнее, чем поле Земли. Межпланетное магнитное поле примерно в 1000 раз слабее магнитного поля Земли. У Солнца магнитное поле примерно в 200 раз сильнее, чем у Земли. Но обнаружены звёзды, у которых магнитные поля в сотни и десятки тысяч раз сильнее, чем у Солнца.

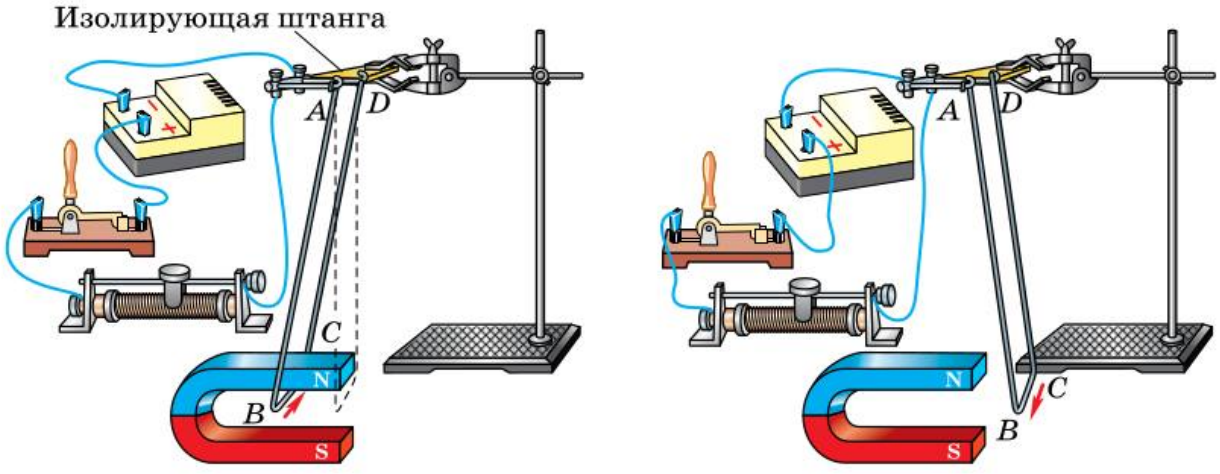
1. Чем объяснить, что магнитная стрелка устанавливается в данном месте Земли в определённом направлении? **2.** Где находятся магнитные полюсы Земли? **3.** Остаются ли неизменными положения южного и северного магнитных полюсов Земли? **4.** Что такое магнитная аномалия? Приведите примеры таких областей в России. **5.** Чем объясняют появление магнитных бурь?

УПРАЖНЕНИЕ 45

1. Каково устройство и принцип действия компаса?
2. При подготовке первых полётов самолётов к Северному полюсу много внимания инженеры уделяли вопросу ориентации самолёта вблизи полюса, так как там обыкновенные магнитные компасы работают очень плохо и практически непригодны. Почему?
3. В каком месте Земли магнитная стрелка обоими концами показывает на юг?

§ 55 ДЕЙСТВИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ПРОВОДНИК С ТОКОМ. ПРАВИЛО ЛЕВОЙ РУКИ

Вы уже знаете, что на проводник с током, помещённый в магнитное поле, действует некоторая сила. Определим, от чего зависит направление этой силы. Возьмём трёхстороннюю рамку $ABCD$, изготовленную из медной проволоки, и подвесим так, чтобы она могла свободно отклоняться от вертикали, а её сторона BC находилась между полюсами магнита.



а) б)

Рис. 144. Действие магнитного поля на проводник с током

При замыкании ключа в цепи возникает электрический ток, и рамка отклоняется от вертикали (рис. 144, *а*).

Изменим направление тока в цепи. При этом изменится и направление движения проводника *BC* (рис. 144, *б*), а значит, и направление действующей на него силы.

Направление силы изменится и в том случае, если, не меняя направления тока, поменять местами полюсы магнита (рис. 145), т. е. изменить направление линий магнитного поля.

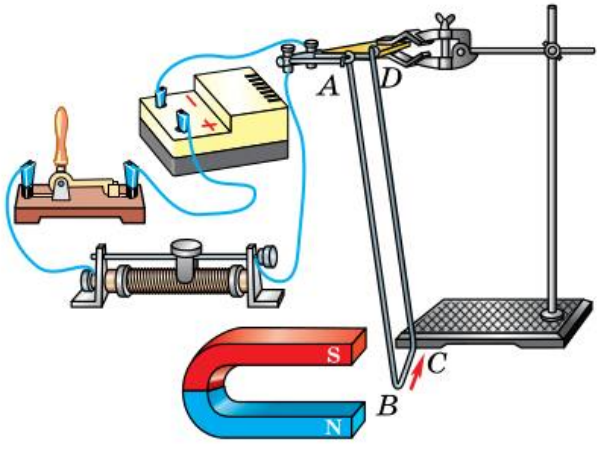


Рис. 145. Направление силы, действующей в магнитном поле на проводник с током, зависит от направления линий магнитного поля

Следовательно, *направление тока в проводнике, направление линий магнитного поля и направление силы, действующей на проводник, связаны между собой.*

Направление силы, действующей на проводник с током в магнитном поле, можно определить, пользуясь ***правилом левой руки.***

В наиболее простом случае, когда проводник расположен в плоскости, перпендикуляр-

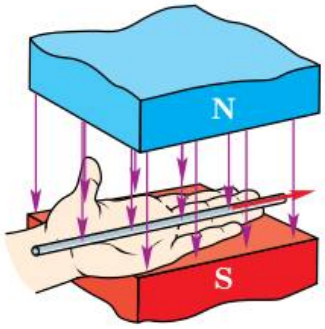


Рис. 146. Применение правила левой руки к проводнику с током

ной линиям магнитного поля, это правило заключается в следующем (рис. 146): **если левую руку расположить так, чтобы линии магнитного поля входили в ладонь перпендикулярно ей, а четыре пальца были направлены по току, то отставленный на 90° большой палец покажет направление действующей на проводник силы.**

Как вы знаете, электрический ток — это упорядоченное движение заряженных частиц. Действие магнитного поля на проводник с током есть результат его действия на движущиеся заряженные частицы внутри проводника.

С помощью правила левой руки можно определить направление силы, с которой магнитное поле действует на отдельно взятые движущиеся в нём частицы, как положительно, так и отрицательно заряженные.

Для наиболее простого случая, когда частица движется в плоскости, перпендикулярной магнитным линиям, это правило формулируется следующим образом (рис. 147): **если левую руку расположить так, чтобы линии магнитного поля входили в ладонь перпендику-**

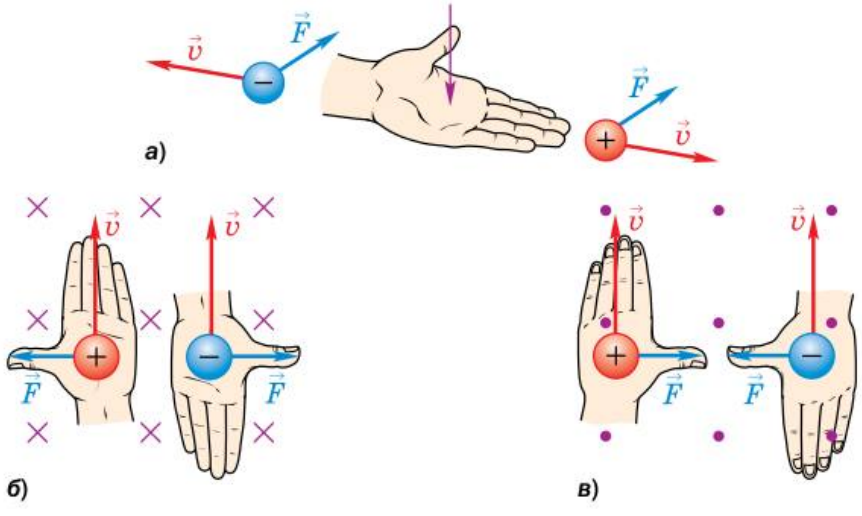


Рис. 147. Применение правила левой руки к заряженным частицам, движущимся в магнитном поле[1]

[1] Если магнитные линии расположены перпендикулярно плоскости рисунка и направлены от нас, их изображают крестиками, а если к нам — точками.

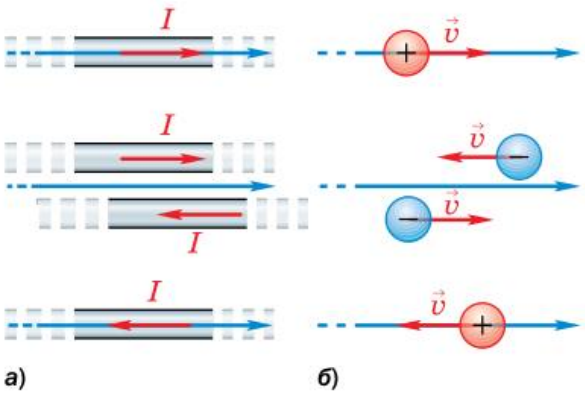


Рис. 148. Магнитное поле не действует в случаях, если прямолинейный проводник с током или скорость движущейся заряженной частицы параллельны линиям магнитного поля или совпадают с ними

лярно ей, а четыре пальца были направлены по движению положительно заряженной частицы (или против движения отрицательно заряженной), то отставленный на 90° большой палец покажет направление действующей на частицу силы.

Следует отметить, что сила действия магнитного поля на проводник с током или движущуюся заряженную частицу равна нулю, если направление тока в проводнике или скорость частицы совпадают с линией магнитного поля или параллельна ей (рис. 148).

1. Какой опыт позволяет обнаружить наличие силы, действующей на проводник с током в магнитном поле? **2.** От чего зависит направление силы, действующей на проводник с током в магнитном поле? **3.** Сформулируйте правило левой руки для находящегося в магнитном поле проводника с током; для движущейся в этом поле заряженной частицы. **4.** В каком случае сила действия магнитного поля на проводник с током или движущуюся заряженную частицу равна нулю?

1. Объясните, как, используя правило левой руки, определить направление тока (если знаем, как направлены магнитные линии и действующая на проводник сила); направление магнитных линий (если известны направления тока и силы); знак заряда движущейся частицы (по направлению магнитных линий, силы и скорости движения частицы).

2*. Воспользовавшись правилами буравчика и левой руки, попробуйте объяснить, почему параллельные проводники (см. рис. 91) притягиваются, если токи в них направлены одинаково и отталкиваются, если токи в них проходят в противоположных направлениях.

УПРАЖНЕНИЕ 46

1. В какую сторону покатится лёгкая алюминиевая трубочка при замыкании цепи (рис. 149)?

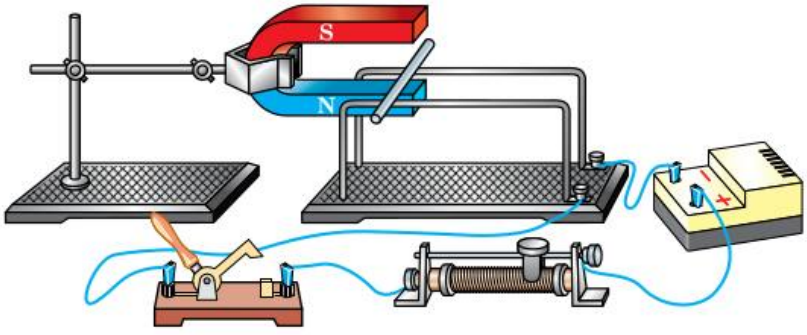


Рис. 149

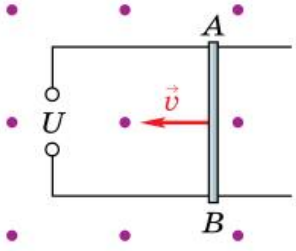


Рис. 150

2. На рисунке 150 изображены два оголённых проводника, соединённых с источником тока, и лёгкая алюминиевая трубочка AB. Вся установка находится в магнитном поле.

   Определите направление тока в трубочке AB, если в результате взаимодействия этого тока с магнитным полем трубочка катится по проводникам в направлении, указанном на рисунке. Какой полюс источника тока является положительным, а какой — отрицательным?

3. Между полюсами магнитов (рис. 151) расположены четыре проводника с током. Определите направление силы, действующей на каждый из них.

4. Отрицательно заряженная частица движется со скоростью $\vec{v}$ в магнитном поле (рис. 152). Укажите направление силы, с которой поле действует на частицу.

5. Магнитное поле действует с силой $\vec{F}$ на частицу, движущуюся со скоростью $\vec{v}$ (рис. 153). Определите знак заряда частицы.

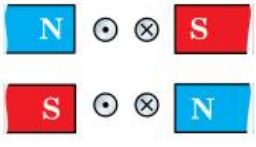


Рис. 151

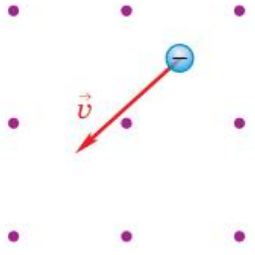


Рис. 152

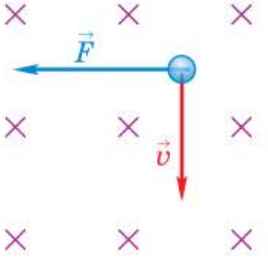


Рис. 153

§ 56 ИНДУКЦИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

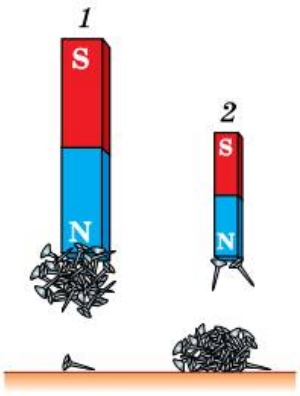


Рис. 154. Магнитное поле первого магнита сильнее, чем второго

Многие из вас наверняка замечали, что одни магниты создают в пространстве более сильные поля, чем другие. Например, поле первого магнита, изображённого на рисунке 154, сильнее, чем поле второго. Действительно, при одном и том же расстоянии до гвоздей, рассыпанных на столе, сила притяжения к первому магниту оказалась достаточной для преодоления силы тяжести большого количества гвоздей, а сила притяжения ко второму — недостаточной.

Какой же величиной можно охарактеризовать магнитное поле?

Для описания магнитного поля вводят силовую характеристику, подобную вектору напряжённости $\vec{E}$ электрического поля. Эту векторную физическую величину обозначают символом $\vec{B}$ и называют ***индукцией магнитного поля*** (или вектором магнитной индукции).

Поясним, что это за величина.

Напомним, что магнитное поле может действовать с определённой силой на помещённый в него проводник с током. Поместим прямолинейный участок проводника AB с током в магнитное поле перпендикулярно его магнитным линиям (рис. 155). При показанном на рисунке направлении тока в проводнике и расположении полюсов магнита действующая на проводник сила, согласно правилу левой руки, будет направлена вниз. Определить эту силу можно, вычислив вес гирьки, которую приходится добавлять на правую чашу весов для их уравновешивания.

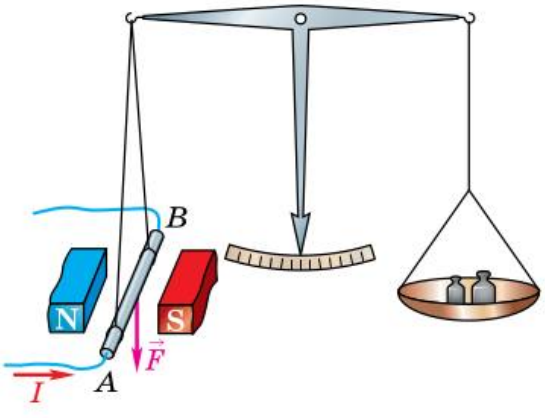


Рис. 155. Опыт по измерению силы, действующей на помещённый в магнитное поле проводник с током

Опыты показывают, что модуль действующей на проводник силы зависит от самого́ магнитного по-

ля — более мощный магнит действует на данный проводник с большей силой. Кроме того, сила действия магнитного поля на проводник прямо пропорциональна длине l этого проводника и силе тока I в нём. Сила также зависит от ориентации проводника с током относительно магнитных линий. В случае, когда проводник с током перпендикулярен магнитным линиям, при прочих равных условиях сила максимальна F_{max}.

Отношение же модуля силы F_{max} к длине проводника l и силе тока I $\left(\text{т. е. } \frac{F_{max}}{Il}\right)$ не зависит ни от длины проводника, ни от силы тока в нём. Оно зависит только от магнитного поля и может служить его количественной характеристикой.

$$B = \frac{F_{max}}{Il}$$

Эта величина и принимается за модуль вектора магнитной индукции.

Модуль вектора магнитной индукции B равен отношению модуля силы F_{max}, с которой магнитное поле действует на расположенный перпендикулярно магнитным линиям проводник с током, к силе тока I в проводнике и его длине l.

$$B = \frac{F_{max}}{Il}.$$

В СИ единица магнитной индукции названа *тесла* (**Тл**) в честь электротехника сербского происхождения ***Николы Теслы*** (1856—1943).

Установим взаимосвязь между единицей магнитной индукции и единицами других величин СИ:

$$1\ \text{Тл} = 1\ \frac{\text{Н}}{\text{А} \cdot \text{м}}.$$

За направление вектора магнитной индукции в данной точке принимают направление,

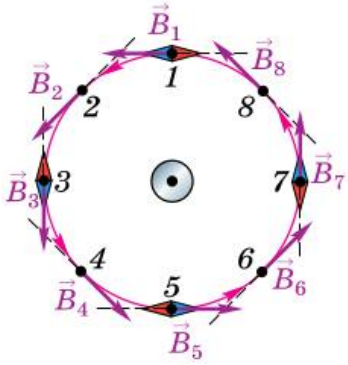


Рис. 156. Вектор магнитной индукции направлен по касательной к магнитной линии в каждой точке поля

которое указывает северный полюс магнитной стрелки, помещённой в эту точку. Таким образом, в каждой точке пространства вектор магнитной индукции направлен по касательной к магнитной линии в направлении этой линии (рис. 156). Поэтому более точное название магнитных линий — ***линии магнитной индукции*** (или ***линии индукции магнитного поля***).

Если направление и модуль вектора магнитной индукции $\vec{B}$ одинаковы во всех точках некоторой области пространства (рис. 157), то магнитное поле в этой области называют ***однородным***. В противном случае поле называют ***неоднородным***.

Однородным можно считать магнитное поле внутри соленоида, длина которого намного больше диаметра. Сравним это поле с двумя неоднородными магнитными полями: полем постоянного полосового магнита (рис. 158, *а*) и полем тока, протекающего по прямолинейному участку проводника (рис. 158, *б*).

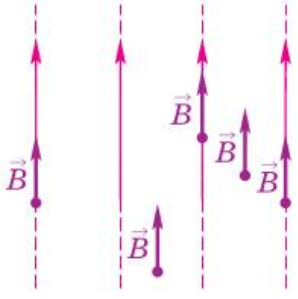


Рис. 157. Однородное магнитное поле

Легко заметить, что в неоднородном поле, в отличие от однородного, вектор магнитной индукции меняется от точки к точке. Например, в каждом из рассматриваемых неоднородных полей (см. рис. 158) при переходе из точки *1* в точку *2* вектор магнитной индукции меняется по модулю, при переходе из точки *1*

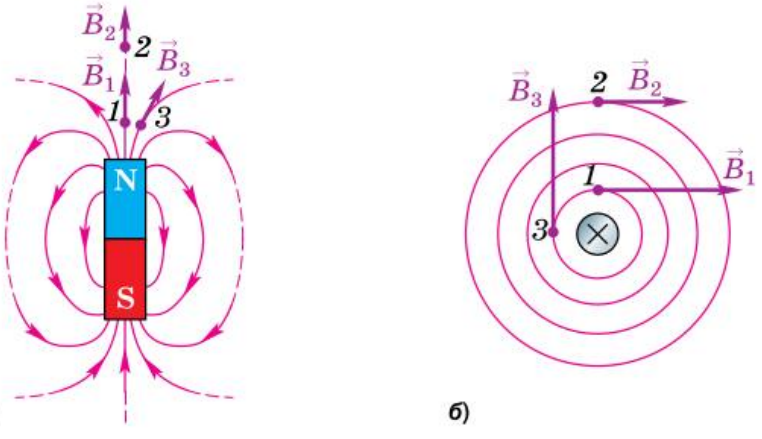


Рис. 158. В разных точках неоднородного магнитного поля вектор магнитной индукции может быть различным как по модулю, так и по направлению

в точку *3* — по направлению, при переходе из точки *2* в точку *3* вектор магнитной индукции меняется как по модулю, так и по направлению.

1. Как называют векторную величину, которая является характеристикой магнитного поля? **2.** По какой формуле определяется модуль вектора магнитной индукции? **3.** Куда направлен вектор магнитной индукции? **4.** В каком случае магнитное поле называют однородным, а в каком — неоднородным?

Как зависит сила, действующая в данной точке магнитного поля на магнитную стрелку или движущийся заряд, от магнитной индукции в этой точке?

УПРАЖНЕНИЕ 47

1. В однородное магнитное поле перпендикулярно линиям магнитной индукции поместили прямолинейный проводник. Сила тока в проводнике 4 А. Определите индукцию этого поля, если оно действует с силой 0,2 Н на каждые 10 см длины проводника.
2. Проводник с током поместили в однородное магнитное поле перпендикулярно линиям магнитной индукции B. Через некоторое время силу тока в проводнике уменьшили в 2 раза. Изменилась ли при этом индукция B магнитного поля, в которое был помещён проводник? Сопровождалось ли уменьшение силы тока изменением какой-либо другой физической величины? Если да, то что это за величина и как она изменилась?

§ 57 ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ДВИГАТЕЛЬ

Движение проводника с током в магнитном поле лежит в основе работы ***электрического двигателя*** (электродвигателя).

Рассмотрим принцип работы электродвигателя, используя прибор, изображённый на рисунке 159. Лёгкая прямоугольная рамка $ABCD$, насаженная на вертикальную ось, может вращаться между полюсами магнита. К концам рамки прикреплены металлические *полукольца 2*.

Для соединения источника тока и рамки служат металлические пластинки — *щётки 1*. К каждой щётке прижимается полукольцо.

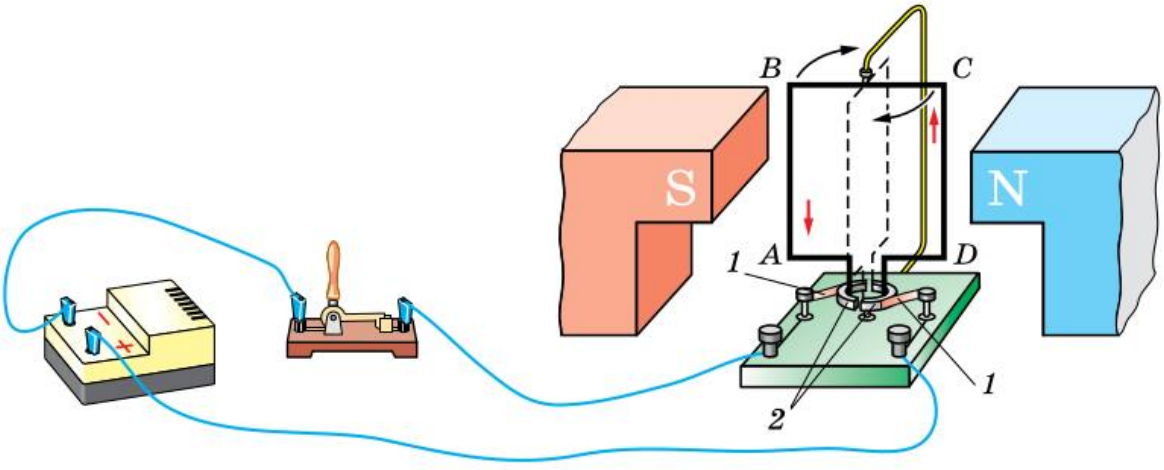


Рис. 159. Вращение рамки с током в магнитном поле

Одна щётка всегда соединена с положительным полюсом источника тока, а другая — с отрицательным.

Поскольку рамка с током помещена в магнитное поле, то возникают силы, с которыми магнитное поле действует на проводник с током (рамку). Правило левой руки позволяет определить направления этих сил.

Так как рамка представляет собой замкнутый контур, по которому течёт электрический ток, то в сторонах рамки AB и DC (см. рис. 159) ток идёт в противоположных направлениях. При этом в начале наблюдения сила, действующая на сторону AB рамки, будет направлена от нас, а сила, действующая на сторону DC, — на нас. Поэтому стороны рамки AB и DC будут перемещаться в противоположные стороны и рамка повернётся по ходу часовой стрелки, если смотреть сверху. При этом вместе с рамкой повернутся полукольца и каждое прижмётся к другой щётке. Ток в рамке изменит направление на противоположное. Это обеспечивает продолжение вращения рамки в прежнем направлении.

В реальных электродвигателях обмотка состоит из большого числа витков проволоки. Их укладывают в пазы (прорези), сделанные вдоль

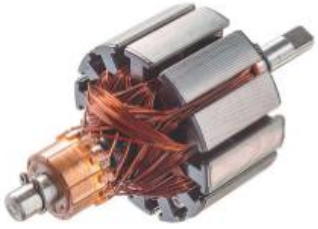


Рис. 160. Якорь электродвигателя

боковой поверхности железного цилиндра. Этот цилиндр нужен для усиления магнитного поля. Такое устройство называют ***якорем электродвигателя*** (рис. 160). Магнитное поле двигателя создаётся сильным электромагнитом. Он подключён к тому же источнику тока, что и обмотка якоря.

Проходящий по центральной оси железного цилиндра вал двигателя соединяют с прибором, который приводится двигателем во вращение.



БОРИС СЕМЁНОВИЧ ЯКОБИ

(1801—1874)

Русский физик, изобретатель в области электротехники. Прославился открытием гальванопластики. Построил первый практически пригодный электродвигатель, телеграфный аппарат, печатающий буквы

Один из первых в мире электрических двигателей, пригодных для практического применения, был изобретён русским учёным ***Борисом Семёновичем Якоби*** в 1834 г.

Электрические двигатели получили широкое применение. По сравнению с тепловыми двигателями, электрические при той же мощности имеют меньшие размеры. Они не загрязняют окружающую среду, так как не выделяют газов, дыма и пара. Им не нужен запас топлива и воды. Электрические двигатели могут быть любой мощности: от нескольких ватт (в электробритвах, электрических точилках для ножей) до сотен и тысяч киловатт (на кораблях, экскаваторах, прокатных станах). Коэффициент полезного действия мощных электрических двигателей может достигать 98%.

1. На каком физическом явлении основана работа электрического двигателя? **2.** Используя рисунок 159, опишите принцип действия электродвигателя. **3.** Приведите примеры использования электрических двигателей. Каковы их преимущества по сравнению с тепловыми двигателями? **4.** Кто и когда изобрёл первый электродвигатель, пригодный для практического применения?

Пусть рамка с током (см. рис. 159) повернулась на угол 90° и приняла положение, показанное пунктиром. Укажите направления сил, действующих в этот момент на стороны рамки. Почему рамка не останавливается в этом положении, а продолжает вращение?

Вам уже известно, что на проводник с током действует магнитное поле, в результате чего он приходит в движение. Это позволяет сделать вывод о связи электрических и магнитных явлений друг с другом. Для того чтобы изучить эту взаимосвязь более подробно, необходимо познакомиться с новой физической величиной.

На рисунке 161, *а* изображён проволочный контур, помещённый в однородное магнитное поле. Говорят, что контур в магнитном поле пронизывается определённым ***магнитным потоком* Ф**, или ***потоком вектора магнитной индукции***.

Строгое определение магнитного потока выходит за рамки нашего курса, однако наглядно магнитный поток можно представить себе как величину, прямо пропорциональную числу линий магнитной индукции, пронизывающих площадь, ограниченную контуром.

Допустим, что индукция магнитного поля, пронизывающего ограниченную контуром площадь, стала больше. Это могло произойти, например, в результате увеличения силы тока, создающего это магнитное поле, или при перемещении контура в другое, более сильное поле.

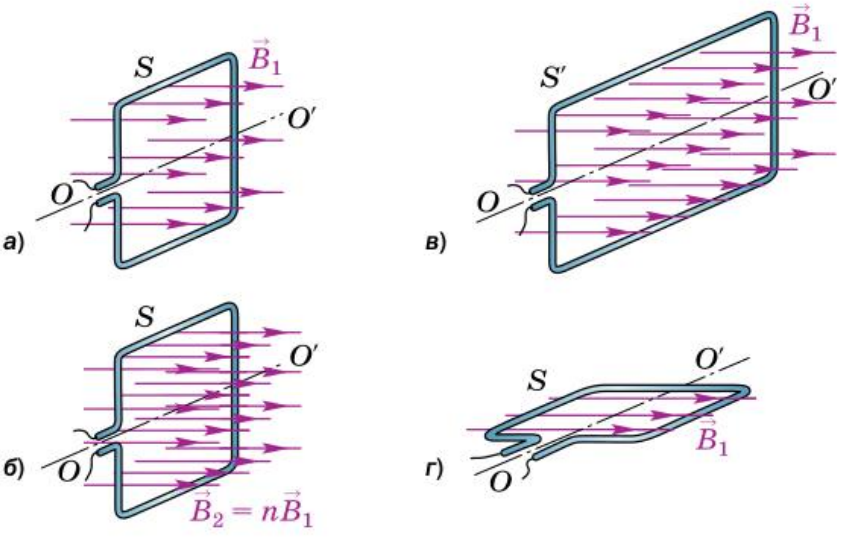


Рис. 161. Зависимость магнитного потока, пронизывающего площадь контура, от модуля вектора магнитной индукции, площади контура и от ориентации плоскости контура по отношению к линиям магнитной индукции

Поскольку линии магнитной индукции проводят так, чтобы густота линий была прямо пропорциональна модулю вектора $\vec{B}$ в данном месте, при увеличении магнитной индукции в n раз (от значения B_1 до значения $B_2 = nB_1$, как показано на рис. 161, *а, б*) во столько же раз возрастёт и число магнитных линий, пронизывающих площадь S данного контура, а значит, и магнитный поток.

При том же самом магнитном поле с индукцией B_1 магнитный поток, пронизывающий бóльшую площадь S' (рис. 161, *в*), будет во столько же раз больше потока через площадь S (см. рис. 161, *а*), во сколько раз S' больше, чем S.

Если плоскость контура перпендикулярна линиям магнитной индукции (см. рис. 161, *а*), то при данной индукции B_1 поток Ф, пронизывающий ограниченную этим контуром площадь S, максимален.

Начнём поворачивать контур вокруг оси OO'. Проходящий сквозь него магнитный поток будет уменьшаться и станет равен нулю, когда плоскость контура расположится параллельно линиям магнитной индукции (рис. 161, *г*). Действительно, в этом случае линии магнитной индукции как бы скользят по плоскости рамки, не пронизывая её.

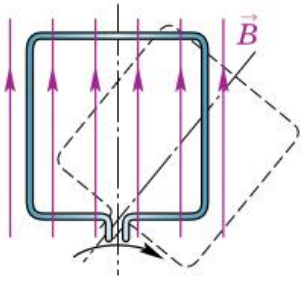


Рис. 162. Магнитный поток равен нулю, если линии магнитной индукции лежат в плоскости контура

Таким образом, **магнитный поток, пронизывающий площадь контура, меняется при изменении модуля вектора магнитной индукции $\vec{B}$, площади контура S и при вращении контура, т. е. при изменении его ориентации по отношению к линиям магнитной индукции.**

Если же контур вращается так, что линии магнитной индукции лежат в плоскости контура, не пересекая ограниченную им площадь (рис. 162), то поток не меняется: в любой момент времени он равен нулю.

1. От чего зависит магнитный поток, пронизывающий площадь плоского контура, помещённого в однородное магнитное поле? **2.** Как меняется магнитный поток при увеличении в n раз магнитной индукции, если ни площадь, ни ориентация контура не меняются?

3. При какой ориентации контура по отношению к линиям магнитной индукции магнитный поток, пронизывающий площадь этого контура, максимален; равен нулю? **4.** Меняется ли магнитный поток при таком вращении контура, когда линии магнитной индукции то пронизывают его, то скользят по его плоскости?

Проволочная катушка $К_1$ со стальным сердечником включена в цепь источника постоянного тока последовательно с реостатом R и ключом К (рис. 163). Электрический ток, протекающий по виткам катушки $К_1$, создаёт в пространстве вокруг неё магнитное поле. В поле катушки $К_1$ находится такая же катушка $К_2$.

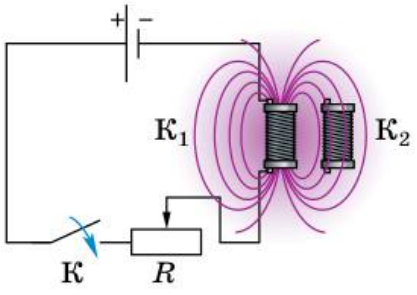


Рис. 163

Как можно изменить магнитный поток, пронизывающий катушку $К_2$? Рассмотрите все возможные варианты.

Увеличивается или уменьшается магнитный поток через катушку $К_2$ при движении ползунка реостата вправо?

§ 59 ЯВЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ



МАЙКЛ ФАРАДЕЙ

(1791—1867)

Английский физик. Исследовал электрические и магнитные явления. Открыл явление электромагнитной индукции

Вы уже знаете, что вокруг электрического тока всегда существует магнитное поле. Электрический ток и магнитное поле неотделимы друг от друга.

Но если электрический ток, как говорят, «создаёт» магнитное поле, то не существует ли обратного явления? Нельзя ли с помощью магнитного поля «создать» электрический ток?

Такую задачу в начале XIX в. пытались решить многие учёные. Поставил её перед собой и Фарадей. «Превратить магнетизм в электричество» — так сформулировал в своём дневнике эту задачу Фарадей в 1822 г. Почти 10 лет упорной работы потребовалось учёному для её решения.

Чтобы понять, как Фарадею удалось «превратить магнетизм в электричество», повторим некоторые его опыты, используя современные приборы.

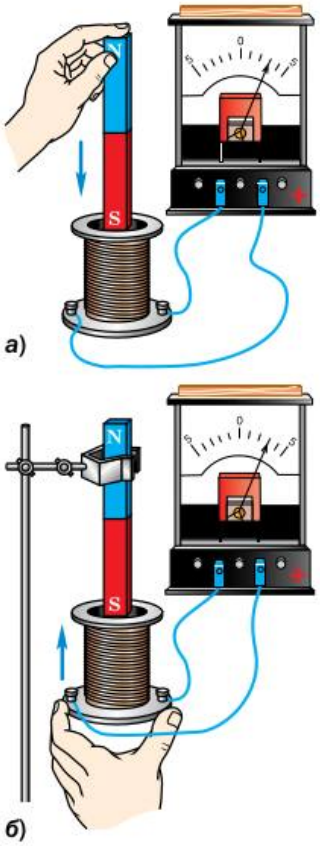


Рис. 164. Возникновение индукционного тока при движении: *а* — магнита относительно катушки; *б* — катушки относительно магнита

На рисунке 164 показан опыт, в котором используют полосовой магнит, катушку и соединённый с ней гальванометр. Гальванометр позволит регистрировать электрический ток в случае его возникновения. Кроме того, в зависимости от направления тока стрелка гальванометра отклоняется от нулевого деления шкалы вправо или влево, благодаря чему можно судить об изменении направления тока.

Если магнит вдвигать в катушку (рис. 164, *а*), то в ней возникает электрический ток. Его называют *индукционным*. Если магнит извлекать из катушки, то гальванометр снова покажет наличие индукционного тока. Только стрелка прибора будет отклоняться в противоположную сторону. Значит, ток изменил своё направление на противоположное. Если магнит не двигается, то тока в проводнике нет. Следовательно, ток в цепи катушки существует только во время движения магнита относительно катушки.

Индукционный ток в проводнике представляет собой такое же упорядоченное движение электронов, как и ток, полученный от источника тока. Название «индукционный» указывает только на причину его возникновения.

Для появления индукционного тока важно, чтобы было движение магнита и катушки друг относительно друга. В этом можно убедиться, если изменить опыт, надевая катушку на неподвижный магнит (рис. 164, *б*) или снимая с него.

Поскольку магнитное поле существует не только вокруг постоянных магнитов, но и вокруг проводников с током, можно заменить постоянный магнит электромагнитом (катушкой с током). Используем это в следующем опыте (рис. 165). Магнитное поле создаётся катушкой A, по которой течёт ток, создаваемый источником тока. Она вставлена в катушку C,

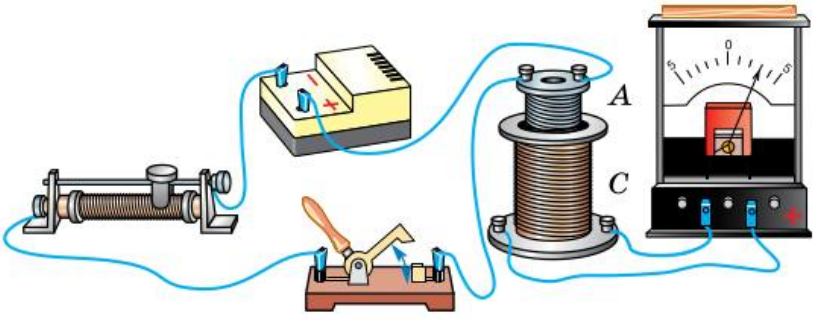


Рис. 165. Возникновение индукционного тока при замыкании и размыкании электрической цепи

подключённую к гальванометру. В катушке C электрический ток возникает в нескольких случаях: при замыкании и размыкании ключа в цепи катушки A, при изменении силы тока в ней или при движении катушек друг относительно друга.

Итак, появление индукционного тока связано с изменением магнитного поля, пронизывающего проводник.

Подтвердить этот вывод можно ещё на одном опыте. Между полюсами дугообразного магнита поместим плоский контур из проводника, концы которого соединены с гальванометром (рис. 166, *а*). Если вращать контур, то пронизывающее его магнитное поле меняется и в контуре появляется индукционный ток, который регистрируется гальванометром. Индукционный ток в контуре также появится, если контур оставлять неподвижным, а внутри него вращать магнит (рис. 166, *б*).

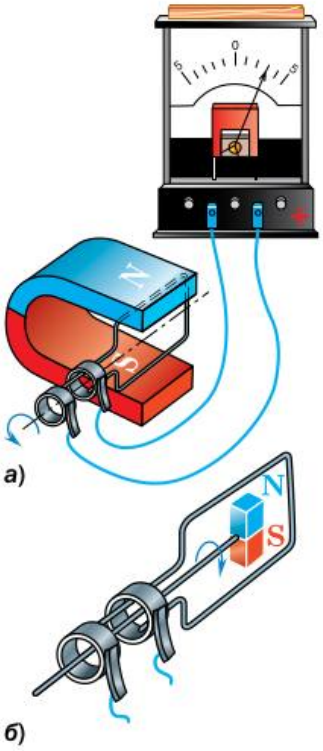


Рис. 166. При вращении контура в магнитном поле (магнита относительно контура) изменение магнитного потока приводит к возникновению индукционного тока

Во всех рассмотренных опытах индукционный ток возникал при изменении магнитного потока, пронизывающего охваченную проводником площадь.

Таким образом,

при всяком изменении магнитного потока, пронизывающего площадь, ограниченную замкнутым проводником, в этом проводнике возникает электрический ток, существующий в течение всего процесса изменения магнитного потока.

В этом заключается явление ***электромагнитной индукции***.

Открытие электромагнитной индукции принадлежит к числу самых замечательных научных достижений первой половины XIX в. Оно вызвало появление и бурное развитие электротехники и радиотехники.

@material100

На основании явления электромагнитной индукции были созданы мощные генераторы электрической энергии, в разработке которых принимали участие учёные и техники разных стран. Среди них были и наши соотечественники: Э. Х. Ленц, Б. С. Якоби, ***Михаил Осипович Доливо-Добровольский*** (1862—1919) и другие, внёсшие большой вклад в развитие электротехники.

1. С какой целью ставились опыты, изображённые на рисунках 164—166? Как они проводились? **2.** При каком условии в опытах (см. рис. 164, 165) в катушке, замкнутой на гальванометр, возникал индукционный ток? **3.** В чём заключается явление электромагнитной индукции? **4.** В чём важность открытия явления электромагнитной индукции?

За счёт чего менялся магнитный поток в опытах, изображённых на рисунках 164—166?

УПРАЖНЕНИЕ 48

1. Как создать кратковременный индукционный ток в катушке $К_2$, изображённой на рисунке 163?

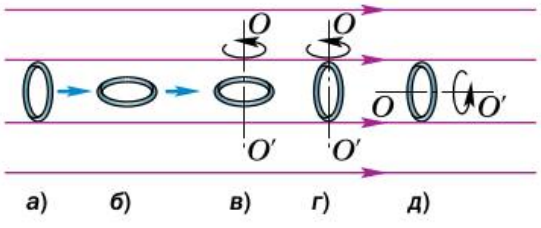


Рис. 167

2. Проволочное кольцо помещено в однородное магнитное поле (рис. 167). Стрелки, изображённые рядом с кольцом, показывают, что в случаях *а* и *б* кольцо движется прямолинейно вдоль линий индукции магнитного поля, а в случаях *в*, *г* и *д* — вращается вокруг оси OO'. В каких из этих случаев в кольце может возникнуть индукционный ток?

Это любопытно...

Открытия Майкла Фарадея

Майкл Фарадей занимался исследованием связи между электрическими и магнитными явлениями. Его исследования увенчались открытием в 1831 г. явления электромагнитной индукции. Стремление выявить природу электрического тока привело Фарадея к экспериментам по прохождению тока через электролиты. Результатом этих исследований стало открытие в 1833 г. законов электролиза (законы Фарадея). Фарадей ввёл в науку ряд понятий: «катод», «анод», «ион», «электролиз», «электрод»; в 1833 г. он изобрёл вольтметр. В 1840 г. ещё до открытия закона сохранения энергии Фарадей высказал мысль о единстве «сил» природы (различных видов энергии) и их взаимном превращении. В 1845 г. он впервые употребил термин «магнитное поле».

Открытия Фарадея завоевали широкое признание во всём научном мире; его именем впоследствии были названы законы, явления, единицы физических величин и т. д. Русский физик А. Г. Столетов так охарактеризовал значение Фарадея в развитии науки: «Никогда со времён Галилея свет не видал стольких поразительных и разнообразных открытий, вышедших из одной головы». В честь Майкла Фарадея Британское химическое общество учредило медаль Фарадея — одну из самых почётных научных наград.



Почти одновременно с Фарадеем «превратить магнетизм в электричество» пытался швейцарский физик Жан-Даниэль Колладон. Для того чтобы избежать влияния на гальванометр магнита, который вдвигался в катушку, Колладон располагал гальванометр в соседней комнате. Туда же были протянуты провода от катушки. Вставив магнит в катушку, Колладон шёл в соседнюю комнату и с огорчением убеждался, что ток отсутствует. Что помешало учёному прийти к тем же выводам, к которым пришёл Фарадей?

§ 60 НАПРАВЛЕНИЕ ИНДУКЦИОННОГО ТОКА. ПРАВИЛО ЛЕНЦА



Рис. 168. При приближении к сплошному кольцу любого полюса магнита кольцо отталкивается от него

В предыдущем параграфе были рассмотрены опыты по получению индукционного тока и установлена причина его возникновения.

Как же направлен индукционный ток? Для ответа на этот вопрос воспользуемся прибором, изображённым на рисунке 168. Он представляет собой узкую алюминиевую пластинку с алюминиевыми кольцами на концах. Одно кольцо сплошное, другое имеет разрез. Пластинка с кольцами помещена на стойку и может свобод-

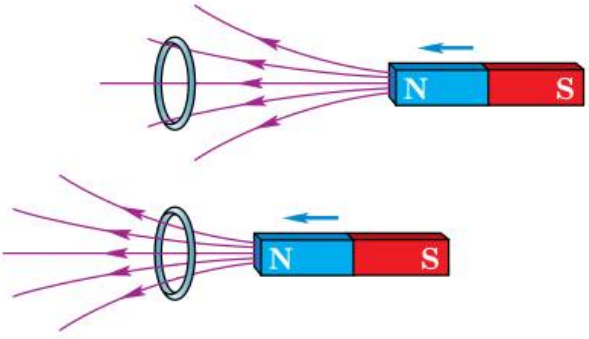


Рис. 169. Возрастание магнитного потока через кольцо при приближении к нему магнита

но вращаться вокруг вертикальной оси.

Возьмём полосовой магнит и внесём его в кольцо с разрезом — кольцо останется на месте. Если же вносить магнит в сплошное кольцо, то оно будет отталкиваться, уходить от магнита, поворачивая при этом всю пластинку. Результат будет точно таким же, если магнит будет обращён к кольцам не северным полюсом (как показано на рисунке), а южным. Объясним наблюдаемые явления.

При приближении к кольцу любого полюса магнита, поле которого является неоднородным, проходящий сквозь кольцо магнитный поток увеличивается (рис. 169). При этом в сплошном кольце возникает индукционный ток, а в кольце с разрезом тока не будет.

Ток в сплошном кольце создаёт в пространстве магнитное поле, благодаря чему *кольцо приобретает свойства магнита*. Взаимодействуя с приближающимся полосовым магнитом, кольцо отталкивается от него. Из этого следует, что кольцо и магнит обращены друг к другу одноимёнными полюсами, а векторы магнитной индукции ($\vec{B}_к$ и $\vec{B}_м$) их полей направлены в противоположные стороны (рис. 170). Зная направление вектора индукции магнитного поля кольца, можно по правилу правой руки (см. рис. 133) определить направление индукционного тока в кольце. Отодвигаясь от приближающегося к нему магнита, кольцо противодействует увеличению проходящего сквозь него внешнего магнитного потока.

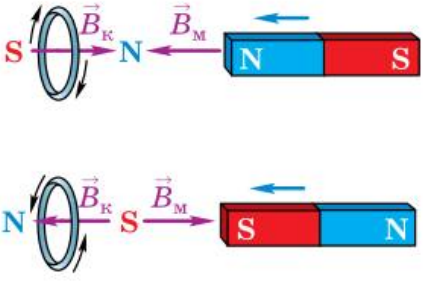


Рис. 170. Определение направления индукционного тока в кольце

Теперь посмотрим, что произойдёт при уменьшении внешнего магнитного потока сквозь кольцо. Для этого, удерживая кольцо рукой, внесём в него магнит. Затем, отпустив кольцо, начнём удалять



Рис. 171. При удалении магнита от сплошного кольца оно, притягиваясь, следует за магнитом

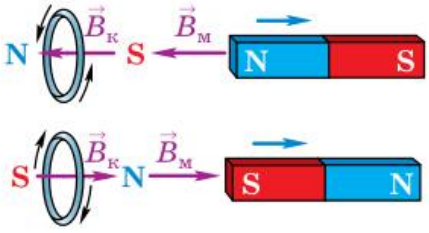


Рис. 172. Направление индукционного тока в кольце меняется при изменении направления движения магнита относительно кольца

магнит. В этом случае кольцо будет следовать за магнитом, притягиваться к нему (рис. 171). Значит, кольцо и магнит обращены друг к другу разноимёнными полюсами, а векторы магнитной индукции их полей направлены в одну сторону (рис. 172). При *одинаковом* направлении $\vec{B}_к$ и $\vec{B}_м$ магнитное поле тока будет *противодействовать уменьшению* внешнего магнитного потока, проходящего сквозь кольцо.

Мы видим, что для определения направления индукционного тока прежде всего необходимо узнать, как направлен вектор магнитной индукции созданного этим током магнитного поля (в центре кольца). На основании результатов рассмотренных опытов было сформулировано правило, которое в современной формулировке звучит так:

возникающий в замкнутом контуре индукционный ток своим магнитным полем противодействует изменению внешнего магнитного потока, которое вызвало этот ток.

Данное правило было установлено в 1833 г. российским учёным Э. Х. Ленцем, в связи с чем его называют ***правилом Ленца***.

1. Для чего проводился опыт, изображённый на рисунках 168 и 171? 2. Почему кольцо с разрезом не реагирует на приближение магнита? 3. Объясните явления, происходящие при приближении магнита к сплошному кольцу (см. рис. 170); при удалении магнита от кольца (см. рис. 172). 4. Как определить направление индукционного тока в кольце? 5. Сформулируйте правило Ленца.

УПРАЖНЕНИЕ 49

1. Как вы думаете, почему прибор, изображённый на рисунке 168, изготовлен из алюминия? Как проходил бы опыт, если бы прибор был железным; медным?

2. В данном ниже перечне логических операций, которые мы выполняли для определения направления индукционного тока, *нарушена по-*

следовательность их проведения. Запишите в тетради буквы, обозначающие эти операции, расположив их в правильной последовательности.

а) Определили направление индукционного тока в кольце (пользуясь правилом правой руки).

б) Определили направление вектора индукции $\vec{B}_к$ магнитного поля тока в кольце по отношению к направлению вектора магнитной индукции $\vec{B}_м$ поля магнита, исходя из того, что кольцо отталкивается от магнита при его приближении (значит, они обращены друг к другу одноимёнными полюсами, и $\vec{B}_к \uparrow\downarrow \vec{B}_м$) и притягивается при удалении (значит, кольцо и магнит обращены друг к другу разноимёнными полюсами, и $\vec{B}_к \uparrow\uparrow \vec{B}_м$).

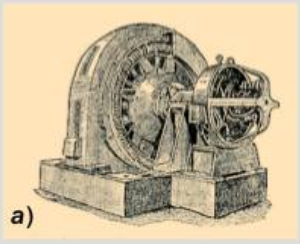
в) Определили направление вектора магнитной индукции $\vec{B}_м$ поля магнита (по расположению его полюсов).

§ 61 СПОСОБЫ ПОЛУЧЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

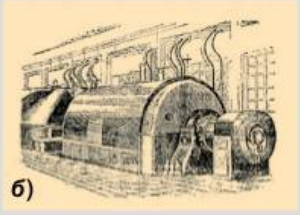
Электрическая энергия (электроэнергия), широко применяемая в жизни современного человека, не существует в природе в готовом для масштабного использования виде. Её производят на электростанциях, где различные виды энергии преобразуются в электрическую. Главным элементом большинства электростанций являются генераторы. Их действие основано на явлении электромагнитной индукции.

Рассмотрим ещё раз получение индукционного тока в катушке с помощью перемещения относительно неё постоянного магнита (см. рис. 164, *а*). Но теперь будем периодически двигать магнит вверх и вниз в течение нескольких секунд. Мы увидим, что при этом стрелка гальванометра отклоняется от нулевого деления шкалы то в одну, то в другую сторону. Это говорит о том, что сила индукционного тока в катушке и направление этого тока периодически меняются.

Электрический ток, периодически меняющийся со временем по величине и направлению, называют переменным током.



а)



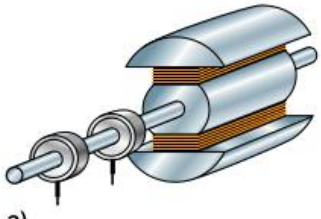
б)

Генератор переменного тока:
а — внешний вид;
б — общий вид на электростанции вместе с паровой турбиной, приводящей ротор генератора во вращение

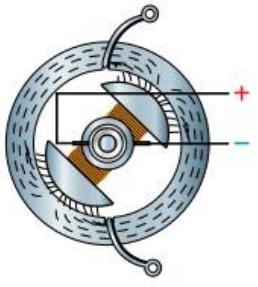
В осветительной сети наших домов и в производстве применяется именно переменный ток. Он прост в получении и удобен для передачи электроэнергии на большие расстояния. В России и многих других странах в промышленности применяют переменный ток, который на протяжении 1 с меняет направление 100 раз: 50 раз течёт в одну сторону и 50 раз в другую.

В настоящее время для получения переменного тока используют в основном ***электромеханические индукционные генераторы***, т. е. устройства, в которых механическая энергия преобразуется в электрическую. Существуют также и генераторы постоянного тока. Принципы работы генераторов постоянного и переменного тока схожи: их действие основано на явлении электромагнитной индукции.

В § 59 рассматривался пример получения индукционного тока в плоском контуре при вращении внутри него магнита (см. рис. 166, *б*). На этом принципе и основана работа электромеханического генератора переменного тока. Неподвижную часть генератора, аналогичную контуру, называют ***статором***, а вращающуюся, т. е. магнит, — ***ротором***. В мощных промышленных генераторах вместо постоянного магнита используется электромагнит.



а)



б)

Рис. 173. Генератор переменного тока:
а — ротор;
б — схема устройства

Статор промышленного генератора представляет собой стальную станину цилиндрической формы (станина — это основная несущая часть машины, на которой монтируются различные рабочие узлы, механизмы и пр.). Во внутренней его части прорезаются пазы, в которые витками укладывается толстый медный провод. В витках и индуцируется переменный электрический ток при изменении пронизывающего их магнитного потока.

Магнитное поле в генераторе создаётся ротором (рис. 173, *а*). Он представляет собой электромагнит: на стальной сердечник сложной формы надета обмотка, по которой пропускается постоянный электрический ток.

На рисунке 173, *б* на схеме штрихами показано примерное расположение линий индукции магнитного поля ротора. При вращении ротора какой-либо внешней механической силой создаваемое им магнитное поле тоже вращается. При этом магнитный поток, пронизывающий витки обмотки статора (перпендикулярны плоскости рисунка 173, *б*), периодически меняется, в результате чего в них индуцируется переменный ток.

Ротор генератора приводится во вращение турбиной. Саму турбину может вращать вода, тогда электростанцию называют гидроэлектростанцией. А может ротор генератора вращаться с помощью паровой турбины. Так происходит на тепловых и атомных электростанциях.

На рисунке 174, *а* изображён внешний вид мощного гидрогенератора, а на рисунке 174, *б* схематично показано его устройство, где цифрой *1* обозначен *статор*, цифрой *2* — *ротор*, а цифрой *3* — *водяная турбина*.

Тип электростанции определяется видом энергоресурсов (табл. 10).

В зависимости от скорости восстановления ресурсы разделяют на *невозобновляемые* и *возобновляемые*. К первым относят уголь, нефть, природный газ, урановую руду, время образо-

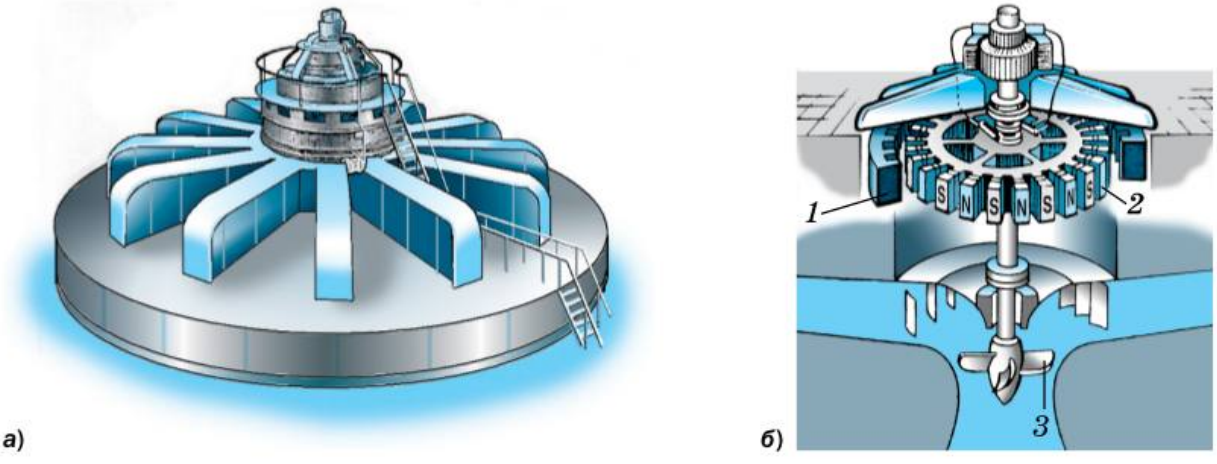


Рис. 174. Внешний вид (*а*) и устройство (*б*) мощного гидрогенератора

Таблица 10. Основные типы электростанций

Тип электростанции	Тепловые электростанции (ТЭС)	Гидроэлектростанции (ГЭС)	Атомные электростанции (АЭС)
Вид энергоресурсов	Различные виды топлива (уголь, газ и т. д.)	Энергия воды	Ядерное топливо
Некоторые экологические последствия	Загрязнение атмосферы	Затопление плодородных земель, заиливание водоёмов	Радиационное заражение территории в случае аварии

вания которых исчисляется миллионами лет. Торф и различные виды биотоплива, относительно быстро восстанавливающиеся в природе, являются примерами возобновляемых ресурсов. Особое место среди этого типа ресурсов занимают неисчерпаемые ресурсы, такие как энергия Солнца, ветра, морских приливов.

Основной объём электроэнергии в настоящее время вырабатывается на тепловых электростанциях, гидроэлектростанциях и атомных электростанциях. Такую энергетику называют традиционной. Наряду с традиционной развивается и так называемая альтернативная энергетика: ветровые, солнечные, приливные электростанции. Преимуществом альтернативной энергетики является малый вред для окружающей среды при производстве электроэнергии.



а)



б)

Электростанции: *а* — ветровая; *б* — солнечная

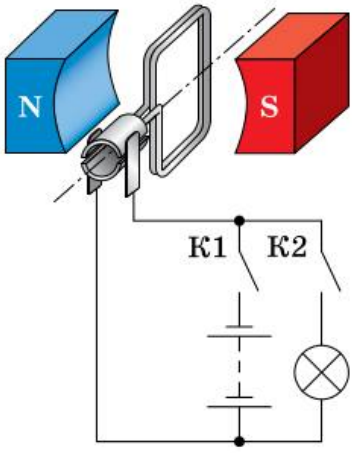


Рис. 175

1. Какой электрический ток называют переменным? С помощью какого простого опыта его можно получить? 2. Где используют переменный электрический ток? 3. Расскажите об устройстве и принципе действия промышленного генератора.

Рассмотрите рисунок 175. Замкнём ключ К1, оставив ключ К2 разомкнутым. Почему рамка начинает вращаться? Разомкнём ключ К1, замкнём ключ К2 и приведём рамку во вращение. Почему лампочка загорается? Изменяется ли направление тока, протекающего через лампочку?

§ 62 ПЕРЕДАЧА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

Посмотрите на расположение электростанций на карте — вы увидите, что большинство потребителей электроэнергии удалены от них. Для передачи электроэнергии от электростанций в места её потребления служат линии электропередачи (ЛЭП). Чем дальше от электростанции находится потребитель тока, тем больше энергии Q тратится на нагревание проводов и тем меньше доходит до потребителя:

$$E_{\text{потребляемая}} = E_{\text{генерируемая}} - Q.$$



Современные высоковольтные ЛЭП

Уменьшение потерь электроэнергии при её передаче от электростанций к потребителям является важной задачей экономики.

Нагревание проводника при прохождении по нему электрического тока описывается законом Джоуля—Ленца ($Q = I^2Rt$). Он указывает на две возможности уменьшения потерь энергии на нагревание проводов: уменьшение сопротивления R проводов и силы тока I в них. Заметим, что зависимость количества теплоты от сопротивления линейная, а от силы тока — квадратичная. Поэтому уменьшение силы тока — более эффективный способ уменьшения потерь.



Первые ЛЭП

Сопротивление проводов будет тем меньше, чем больше площадь S их поперечного сечения и чем меньше удельное сопротивление ρ металла, из которого они изготовлены $\left(\text{так как } R = \frac{\rho l}{S}\right)$. Провода делают из меди или алюминия, так как среди относительно недорогих металлов они обладают наименьшим удельным сопротивлением. Увеличивать толщину проводов экономически невыгодно (ввиду увеличения расхода металла) и неудобно (из-за трудностей при их подвеске).

Поэтому существенного снижения потерь энергии Q можно добиться только за счёт уменьшения силы тока I. Чтобы при этом передаваемая потребителю мощность P осталась постоянной, необходимо во столько же раз увеличить получаемое от генератора напряжение U (так как $P = UI$[1]).

Решение этой важнейшей технической задачи стало возможным только после изобретения ***трансформатора*** — устройства, предназначенного для увеличения или уменьшения переменного напряжения и силы тока.

Трансформатор (рис. 176, *а*) был изобретён в 1876 г. русским учёным П. Н. Яблочковым.

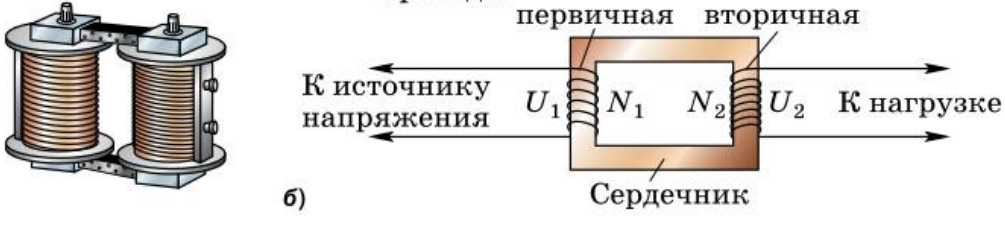


Рис. 176. Повышающий трансформатор: *а* — внешний вид; *б* — схема устройства

[1] U, I — так называемые ***действующие*** значения напряжения и силы переменного тока. Они равны соответственно напряжению и силе *постоянного* тока, выделяющего в проводнике ежесекундно такое же количество теплоты, что и переменный ток.



ПАВЕЛ НИКОЛАЕВИЧ ЯБЛОЧКОВ

(1847—1894)

Русский электротехник и изобретатель. Изобрёл дуговую лампу («свеча Яблочкова»), сконструировал генератор переменного тока, трансформатор, сделал изобретения в области электрических машин и химических источников тока

В основе его работы лежит явление электромагнитной индукции. Число витков в обмотках трансформатора различно (рис. 176, *б*): в данном случае $N_2 > N_1$.

При протекании в первичной обмотке трансформатора переменного тока витки вторичной обмотки пронизывает переменный магнитный поток. При этом на концах вторичной обмотки возникает переменное напряжение U_2.

Величина U_2 определяется из соотношения:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2}, \text{ или } U_2 = \frac{N_2}{N_1}U_1.$$

Значит, при $N_2 > N_1$ трансформатор будет *повышающим* (так как $U_2 > U_1$), а при $N_2 < N_1$ — *понижающим* (в данном случае $U_2 < U_1$).

Теперь вернёмся к вопросу о передаче электроэнергии от электростанции к месту её потребления (рис. 177). Напряжение, вырабатываемое генератором, обычно не превышает 25 кВ. А для оптимальной передачи электроэнергии на большие расстояния требуется напряжение порядка сотен киловольт. Поэтому ток с электростанции сначала подаётся на расположенную неподалёку повышающую трансформатор-

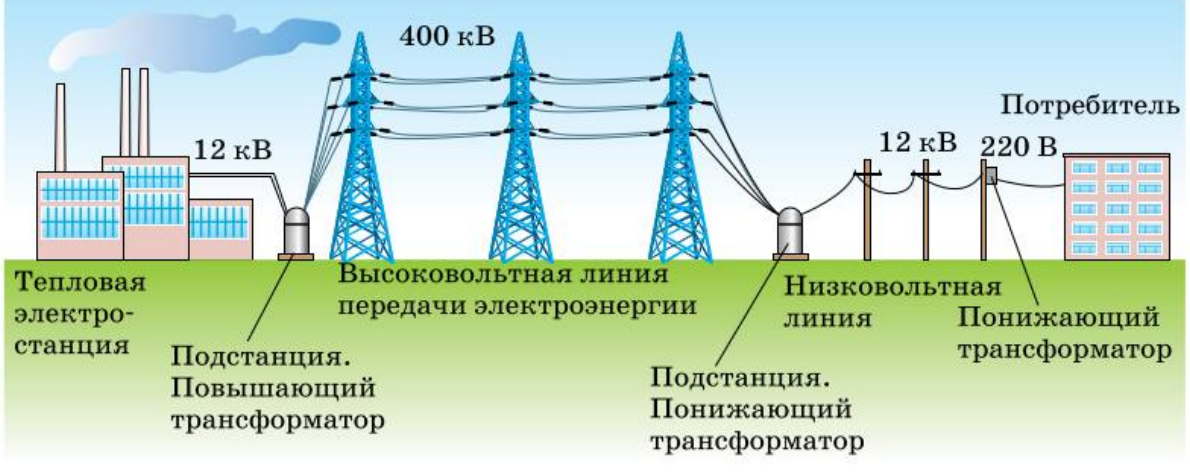


Рис. 177. Схема передачи электроэнергии от электростанции к потребителю



Внешний вид силового масляного трансформатора

ную подстанцию, где напряжение повышается до нескольких сотен киловольт (в большинстве случаев оно не превышает 750 кВ), и под таким напряжением подаётся в ЛЭП. Поскольку такое высокое напряжение не может быть предложено потребителю, то в конце линии его подают поочерёдно на несколько трансформаторных подстанций, понижающих напряжение до 380 или 220 В, а затем — на предприятия или в жилые дома.

Трансформаторы нашли широкое применение в быту. Например, при подзарядке сотового телефона имеющийся в зарядном устройстве трансформатор понижает напряжение, полученное из осветительной сети и равное 220 В, до 5,5 В, пригодного для телефона. В телевизоре имеется несколько трансформаторов (как понижающих, так и повышающих), поскольку для питания различных его узлов требуется напряжение от 1,5 В до 25 кВ.

1. По какому физическому закону можно определить потери электроэнергии в ЛЭП и за счёт чего их можно уменьшить? **2.** Для чего при уменьшении силы тока во столько же раз повышают его напряжение перед подачей в ЛЭП? **3.** Расскажите об устройстве, принципе действия и применении трансформатора. **4.** Как осуществляется передача электроэнергии от электростанции к потребителю?

Это любопытно...

Из истории электротехники

Важнейшим достоинством электроэнергии является удобство её транспортировки. Однако вплоть до второй половины XIX в. передать электроэнергию большой мощности не удавалось. Лишь в 1874 г. русский военный инженер Ф. А. Пироцкий впервые осуществил передачу электроэнергии мощностью 6 кВт на расстояние до одного километра на Волковом поле, вблизи Петербурга. Достижения Ф. А. Пироцкого заинтересовали русского учёного Д. А. Лачинова, который в 1880 г. впервые в мире теоретически обосновал передачу электроэнергии на большое расстояние. В своей работе, помещённой в русском журнале «Электричество», он до-

казал, что при передаче электроэнергии по проводам потери энергии уменьшаются с повышением напряжения. Чтобы передать энергию мощностью в сотни и тысячи киловатт, требовалось огромное напряжение в сотни тысяч вольт. Получить такое напряжение с помощью генератора постоянного тока оказалось невозможным.

Выход из создавшегося тупика увидели русские электротехники П. Н. Яблочков, В. Н. Чиколев, Ф. А. Пироцкий и другие, которые стали пропагандировать применение переменного тока — основу широкой электрификации. К этому времени лаборантом Московского университета И. Ф. Усагиным был усовершенствован трансформатор (1882), с помощью которого можно было изменять напряжение переменного тока в широких пределах. Передача электроэнергии представлялась следующим образом: ток из генератора переменного тока поступает в повышающий трансформатор, а затем под очень высоким напряжением идёт по линии передачи. На другом конце линии ток поступает в понижающий трансформатор, а затем идёт к потребителям.

Теперь именно так и осуществляется передача электроэнергии, но в те времена для окончательного решения поставленной задачи нужно было усовершенствовать электродвигатель переменного тока. Эту задачу смог блестяще решить русский изобретатель М. О. Доливо-Добровольский. В 1889 г. он изобрёл новый тип электродвигателя переменного тока (мотор трёхфазного тока), а затем сконструировал генератор и трансформатор трёхфазного тока. М. О. Доливо-Добровольский теоретически и практически доказал, что трёхфазный ток создаёт вращающееся магнитное поле, и на основе этого построил двигатель переменного тока, получивший название «асинхронного». В 1891 г. он осуществил передачу электроэнергии трёхфазным током мощностью 300 кВт на расстояние 175 км, применяя трансформатор трёхфазного тока, причём потери мощности не превышали 25%.

Российские учёные одержали крупнейшую победу. На исходе XIX в. они были признанными лидерами в области электротехники. Многометровые высоковольтные линии передачи переменного тока на сотни километров в России появились в 1902 г. В 1919 г. М. О. Доливо-Добровольский высказал мысль, что в линиях сверхдальних передач целесообразно применять постоянный ток высокого напряжения. Но технически эта задача остаётся очень сложной. Большинство современных ЛЭП по-прежнему используют переменный ток.



Высоковольтные ЛЭП постоянного тока позволяют передавать электроэнергию с меньшими потерями, чем ЛЭП переменного тока. Как вы думаете, с чем связано повсеместное применение именно ЛЭП переменного тока?

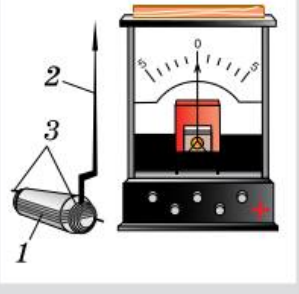
ИТОГИ ГЛАВЫ

Вы знаете, как создать магнитное поле и как его обнаружить, что такое магнит и электромагнит, где они используются. Что такое магнитные линии и что по ним можно определить. Вы можете объяснить, как проявляются магнитные свойства Земли. Можете определить направление движения проводника в магнитном поле, различить однородное и неоднородное магнитные поля. Вам знакомы принципы передачи электроэнергии и способы её получения.

А самое главное, вы понимаете, что магнитные и электрические явления взаимосвязаны!

ОБСУДИМ?

Прочитайте описание устройства гальванометра.



Устройство гальванометра

Между полюсами магнита на оси помещена маленькая рамка *1*. С ней жёстко связана стрелка *2*. Выводы от рамки идут к клеммам прибора. При включении прибора в цепь по рамке протекает постоянный ток, и она стремится установиться перпендикулярно магнитным линиям. Однако сделать это ей мешают две спиральные пружины *3*. Чем больше значение силы тока, который течёт по рамке, тем большая закручивающая сила действует на её проводники и тем на больший угол поворачивается рамка. Вместе с рамкой поворачивается стрелка, которая скользит вдоль шкалы прибора.

С помощью каких несложных конструктивных изменений гальванометр можно преобразовать в вольтметр или амперметр? Как изменится при этом шкала прибора?

ПРОЕКТЫ И ИССЛЕДОВАНИЯ

1. «Модель электромагнитного крана» (возможная форма: презентация, опыт, модель).
2. «Создаём макет магнитного поля Земли» (возможная форма: презентация, макет).

ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ



№ 1 ИЗУЧЕНИЕ УСТРОЙСТВА КАЛОРИМЕТРА

Цель работы Изучить устройство калориметра. Сравнить скорости теплообмена с внешней средой горячей воды в калориметре и в стакане.

Приборы и материалы Измерительный цилиндр, стакан, калориметр, термометр, сосуд с горячей водой, часы.

УКАЗАНИЯ К РАБОТЕ

1. Рассмотрите, как устроен калориметр.
2. Налейте в калориметр и в стакан по 100 мл горячей воды. Измерьте начальную температуру воды в обоих сосудах.
3. **Обработка результатов измерений.** Результаты прямых измерений с учётом абсолютной погрешности, равной цене деления шкалы термометра, записывайте в таблицу 11.

Таблица 11

Тело	Начальная температура t_0, °C	Конечная температура t_1, °C
Вода в калориметре		
Вода в стакане		

4. Наблюдайте за изменением температуры воды в калориметре и в стакане в течение 10 мин. Измерьте конечную температуру воды в сосудах.
5. Сравните изменение температуры воды в калориметре и в стакане за 10 мин и сделайте вывод. Объясните, за счёт каких особенностей конструкции сосуда (калориметра) изменяется скорость теплообмена с внешней средой.

№ 2 ИЗУЧЕНИЕ ПРОЦЕССА ТЕПЛООБМЕНА

Цель работы Сравнить количество теплоты, отданное горячей водой и полученное холодной водой при теплообмене.

Приборы и материалы Измерительный цилиндр, калориметр, стакан, термометр, сосуд с горячей водой, сосуд с холодной водой.

УКАЗАНИЯ К РАБОТЕ

1. Налейте, используя измерительный цилиндр, в калориметр 100 мл горячей воды, а в стакан — 100 мл холодной. Измерьте начальную температуру сначала холодной воды, а затем горячей.
2. Не вынимая термометр из горячей воды, осторожно вылейте холодную воду из стакана в калориметр. Перемешайте воду термометром и измерьте температуру смеси.
3. **Обработка результатов измерений.** Результаты прямых измерений с учётом абсолютной погрешности, равной цене деления шкалы термометра, запишите в таблицу 12. Результаты вычислений записывайте без учёта погрешности.

Таблица 12

Масса холодной воды m_1, кг	Начальная температура холодной воды t_1, °C	Масса горячей воды m_2, кг	Начальная температура горячей воды t_2, °C	Температура смеси t, °C	Количество теплоты, полученное холодной водой, Q_1, Дж	Количество теплоты, отданное горячей водой, Q_2, Дж

4. Массу воды определите по формуле $m = \rho V$, зная, что плотность воды 1000 $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$.
5. Рассчитайте количество теплоты, отданное горячей водой при остывании до температуры смеси, и количество теплоты, полученное холодной водой при нагревании до той же температуры.
6. Сравните количество теплоты, отданное горячей водой и полученное холодной водой при теплообмене.
7. Сделайте вывод и обоснуйте его.

Примечание В выводе к лабораторной работе не забудьте указать про потери некоторого количества теплоты.

№ 3 ИЗМЕРЕНИЕ УДЕЛЬНОЙ ТЕПЛОЁМКОСТИ ВЕЩЕСТВА

Цель работы Определить удельную теплоёмкость вещества.

Приборы и материалы Металлический цилиндр на нити, измерительный цилиндр, калориметр, термометр, весы учебные с набором разновесов (электронные весы), фильтровальная бумага или бумажная салфетка, сосуд с горячей водой, стакан с холодной водой.

УКАЗАНИЯ К РАБОТЕ

1. С помощью измерительного цилиндра налейте в калориметр холодную воду массой 150—200 г. Измерьте температуру воды.
2. **Обработка результатов измерений.** Результаты прямых измерений с учётом абсолютной погрешности, равной цене деления шкалы термометра, и вычислений записывайте в таблицу 13. Абсолютную погрешность измерения массы цилиндра уточните у учителя.

Таблица 13

Масса воды в калориметре m_1, кг	Начальная температура воды t_1, °C	Масса цилиндра m_2, кг	Начальная температура цилиндра t_2, °C	Общая температура воды и цилиндра t, °C

3. Опустите металлический цилиндр, вынутый из горячей воды, в калориметр. Температуру горячей воды узнайте у учителя. После того как температура воды перестанет меняться, измерьте общую температуру воды и цилиндра.
4. Потянув за нить, выньте цилиндр из воды, оботрите его фильтровальной бумагой (салфеткой). Определите массу металлического цилиндра с помощью весов.
5. Рассчитайте количество теплоты, полученное холодной водой при нагревании.
6. Пренебрегая тепловыми потерями, определите количество теплоты, отданное металлическим цилиндром при остывании.

7. Вычислите удельную теплоёмкость вещества, из которого изготовлен цилиндр. По таблице 1 определите, какое это вещество.
8. Сделайте вывод.

№ 4 ИЗМЕРЕНИЕ ОТНОСИТЕЛЬНОЙ ВЛАЖНОСТИ ВОЗДУХА

Цель работы Определить относительную влажность воздуха в классной комнате.

Приборы и материалы Термометр, кусочек ткани, сосуд с водой.

УКАЗАНИЯ К РАБОТЕ

1. Измерьте температуру воздуха в классной комнате.
2. **Обработка результатов измерений.** Результаты прямых измерений с учётом абсолютной погрешности, равной цене деления шкалы термометра, записывайте в таблицу 14.

Таблица 14

t, °C	$t_{вл}$, °C	Δt, °C	φ, %

3. Резервуар термометра обмотайте кусочком ткани. Смочите ткань водой комнатной температуры.
4. Как только прекратится изменение температуры, определите показание влажного термометра.
5. Найдите разность показаний сухого и влажного термометров.
6. Пользуясь таблицей 6, определите относительную влажность воздуха.
7. Если в кабинете есть психрометр, определите с его помощью относительную влажность воздуха и сравните полученные значения.
8. Сделайте вывод о значении относительной влажности воздуха в классной комнате. Соответствует ли полученное значение санитарным нормам для школ (40—60%)?

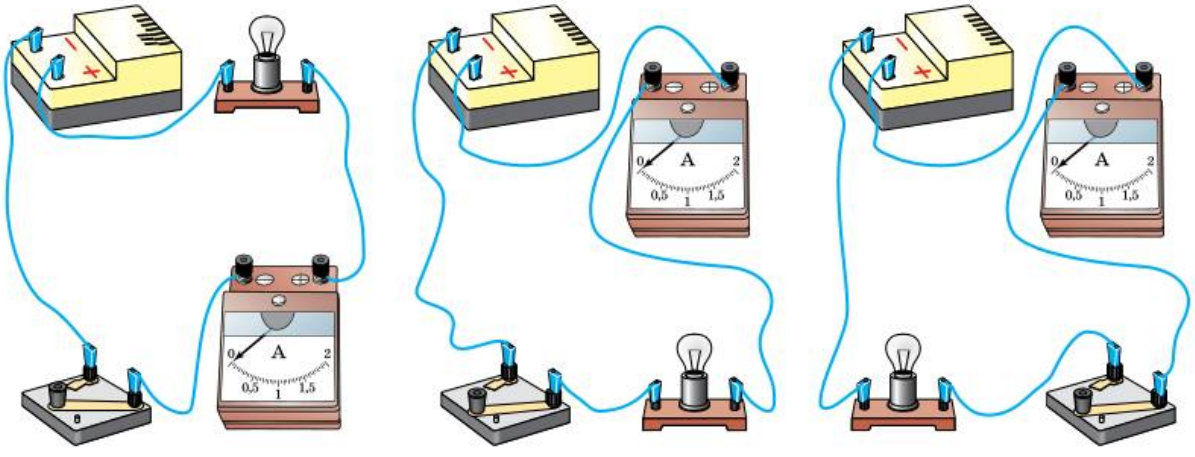
№ 5 СБОРКА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ И ИЗМЕРЕНИЕ СИЛЫ ТОКА В ЕЁ РАЗЛИЧНЫХ УЧАСТКАХ

Цель работы Собрать электрическую цепь. Измерить силу тока в различных участках цепи с помощью амперметра.

Приборы и материалы Лабораторный источник питания (ЛИП), лампа на подставке, ключ, амперметр, соединительные провода.

УКАЗАНИЯ К РАБОТЕ

1. Начертите схему электрической цепи, показанной на рисунке 178, *а*. Соберите цепь по схеме.



а) *б*) *в*)

Рис. 178

Примечание При сборке цепи ключ должен быть разомкнут. Обязательно проверьте правильность подключения амперметра в цепь: клемма, обозначенная знаком «+», должна быть соединена с проводом, идущим от положительного полюса источника тока.

2. Замкните цепь. Измерьте силу тока I_1.

3. **Обработка результатов измерений.** Результаты прямых измерений с учётом абсолютной погрешности, равной цене деления шкалы амперметра, запишите в таблицу 15.

Таблица 15

Сила тока I_1, А	Сила тока I_2, А	Сила тока I_3, А

4. Начертите схему электрической цепи для случаев, показанных на рисунке 178, *б* и *в*.
5. Измерьте силу тока для каждого случая.
6. Сделайте вывод о значении силы тока в различных последовательно соединённых участках цепи.

№ 6 ИЗМЕРЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЯ НА РАЗЛИЧНЫХ УЧАСТКАХ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ

Цель работы Собрать электрическую цепь. Измерить напряжение на различных участках цепи с помощью вольтметра. Выявить закономерности последовательного соединения проводников.

Приборы и материалы Лабораторный источник питания (ЛИП), лампа на подставке, резистор, ключ, вольтметр, соединительные провода.

УКАЗАНИЯ К РАБОТЕ

1. Начертите схему электрической цепи, содержащей источник тока, резистор, лампу и ключ, соединённые последовательно. Покажите схему учителю.
2. Соберите электрическую цепь по схеме.
3. Подключите вольтметр так, чтобы он измерял напряжение U_1 на лампе. Обозначьте положение вольтметра на схеме в этом случае V_1.
4. Замкните цепь и измерьте напряжение.

Примечание При сборке цепи ключ должен быть разомкнут. Обязательно проверьте правильность подключения вольтметра в цепь: клемма, обозначенная знаком «+», должна быть соединена с проводом, идущим от положительного полюса источника тока.

5. **Обработка результатов измерений.** Результаты прямых измерений с учётом абсолютной погрешности, равной цене деления шкалы вольтметра, запишите в таблицу 16.

Таблица 16

Напряжение U_1, В	Напряжение U_2, В	Напряжение U, В

6. Подключите вольтметр так, чтобы он измерял напряжение U_2 на резисторе. Обозначьте положение вольтметра на схеме в этом случае V_2.
7. Замкните цепь и измерьте напряжение.
8. Подключите вольтметр так, чтобы он измерял напряжение U на участке цепи, содержащем лампу и резистор. Обозначьте положение вольтметра на схеме в этом случае V.
9. Замкните цепь и измерьте напряжение.
10. Проанализировав полученные результаты, сделайте вывод о соотношении напряжений на различных участках цепи. Опровергните или подтвердите гипотезу: при последовательном соединении элементов общее напряжение на участке цепи равно сумме напряжений на отдельных элементах этого участка.
11. По итогам лабораторных работ № 5 и 6 сформулируйте закономерности для силы тока и напряжения при последовательном соединении проводников.

№ 7 ИЗМЕРЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ ПРОВОДНИКА. ИЗУЧЕНИЕ ПРИНЦИПА ДЕЙСТВИЯ РЕОСТАТА

Цель работы Изучить устройство реостата. Измерить сопротивление проводника с помощью амперметра и вольтметра. Проверить возможность изменения силы тока в цепи при помощи реостата.

Приборы и материалы Лабораторный источник питания (ЛИП), реостат, ключ, амперметр, вольтметр, соединительные провода.

УКАЗАНИЯ К РАБОТЕ

1. Рассмотрите реостат. Сделайте предположение о том, как изменяется сопротивление реостата при изменении положения ползунка (от крайнего левого до крайнего правого).
2. Начертите схему электрической цепи, показанной на рисунке 179.

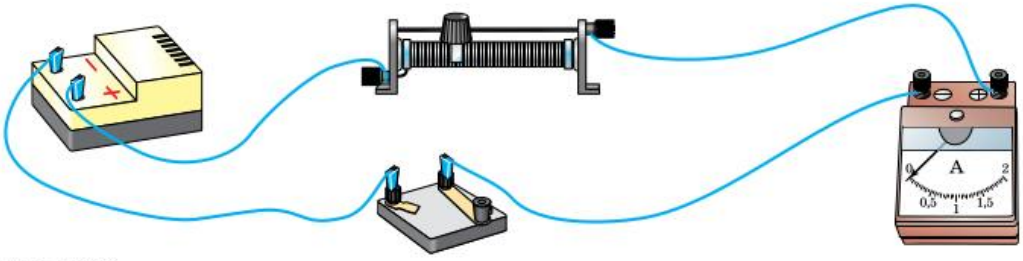


Рис. 179

3. Соберите электрическую цепь по схеме. Подключите вольтметр так, чтобы он измерял напряжение на реостате.
4. Поставьте ползунок реостата в положение, при котором его сопротивление максимально. Замкните цепь, снимите показания амперметра и вольтметра.
5. **Обработка результатов измерений.** Результаты прямых измерений с учётом абсолютной погрешности, равной цене деления шкалы прибора, и вычислений записывайте в таблицу 17.

Таблица 17

№ опыта	Сила тока I, А	Напряжение U, В	Сопротивление R, Ом

6. Передвиньте ползунок реостата приблизительно на четверть длины обмотки, затем на половину, затем на три четверти. В каждом случае записывайте показания приборов.

Примечание Перед замыканием цепи проверяйте положение ползунка реостата: нельзя, чтобы его сопротивление было минимальным. Это может привести к поломке амперметра.

7. Рассчитайте сопротивление реостата в каждом случае.

8. Проанализируйте результаты измерений и сделайте вывод о назначении реостата.

№ 8 ИЗУЧЕНИЕ ПАРАЛЛЕЛЬНОГО СОЕДИНЕНИЯ ПРОВОДНИКОВ

Цель работы Выявить закономерности параллельного соединения проводников.

Приборы и материалы Лабораторный источник питания (ЛИП), два резистора, ключ, амперметр, вольтметр, соединительные провода.

УКАЗАНИЯ К РАБОТЕ

1. Начертите схему электрической цепи, состоящей из источника тока, ключа, двух параллельно соединённых резисторов $R1$ и $R2$. Добавьте в схему амперметр и вольтметр так, чтобы они измеряли силу тока и напряжение на резисторе $R1$.

2. Соберите электрическую цепь по схеме.

3. Замкните цепь, измерьте силу тока и напряжение на резисторе $R1$.

4. **Обработка результатов измерений.** Результаты прямых измерений с учётом абсолютной погрешности, равной цене деления шкалы прибора, записывайте в таблицу 18.

Таблица 18

№ опыта	Сила тока I, А	Напряжение U, В

5. Начертите схему цепи, изменив расположение измерительных приборов таким образом, чтобы они измеряли силу тока и напряжение на резисторе $R2$.

6. Переподключите измерительные приборы в соответствии со схемой. Определите силу тока и напряжение на резисторе $R2$.

7. Начертите схему цепи, изменив расположение измерительных приборов таким образом, чтобы они измеряли силу тока на неразветвлённом участке цепи и напряжение на участке цепи, содержащем оба резистора.

8. Переподключите измерительные приборы в соответствии со схемой. Определите силу тока и напряжение.

9. Проанализируйте результаты измерений и сделайте вывод о закономерностях параллельного соединения проводников.

№ 9 ИЗМЕРЕНИЕ МОЩНОСТИ И РАБОТЫ ТОКА В ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЛАМПЕ

Цель работы Измерить мощность и работу электрического тока в электрической лампе.

Приборы и материалы Лабораторный источник питания (ЛИП), лампа на подставке, ключ, амперметр, вольтметр, часы, соединительные провода.

УКАЗАНИЯ К РАБОТЕ

1. Начертите схему электрической цепи последовательного соединения источника тока, ключа и лампы. Добавьте в схему амперметр и вольтметр так, чтобы они измеряли силу тока в цепи и напряжение на лампе.

2. Соберите электрическую цепь по схеме.

3. Измерьте силу тока в цепи и напряжение на лампе.

4. **Обработка результатов измерений.** Результаты прямых измерений с учётом абсолютной погрешности, равной цене деления шкалы прибора, и вычислений записывайте в таблицу 19.

Таблица 19

Сила тока I, А	Напряжение U, В	Мощность тока P, Вт	Время горения лампы t, с	Работа тока A, Дж

5. Рассчитайте мощность электрического тока в лампе по измеренным значениям силы тока и напряжения.

6. Измерьте время горения лампы и рассчитайте работу электрического тока в лампе.

7. Сделайте вывод.

№ 10 ИЗУЧЕНИЕ ЯВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ

Цель работы Изучить явление электромагнитной индукции.

Приборы и материалы Миллиамперметр, катушка-моток, магнит дугообразный, источник тока, катушка с железным сердечником от разборного электромагнита, реостат, ключ, соединительные провода.

УКАЗАНИЯ К РАБОТЕ

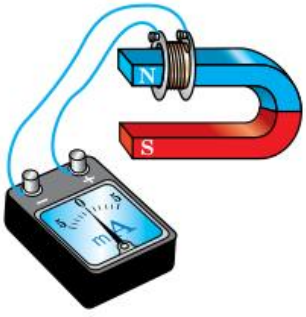


Рис. 180

1. Подключите катушку-моток к зажимам миллиамперметра.

2. Наблюдая за показаниями миллиамперметра, подводите один из полюсов магнита к катушке, потом на несколько секунд остановите магнит, а затем вновь приближайте его к катушке, вдвигая в неё (рис. 180). Запишите, возникал ли в катушке индукционный ток во время движения магнита относительно катушки; во время его остановки.

3. Сделайте и запишите вывод о том, при каком условии в катушке возникал индукционный ток.

4. Запишите, менялся ли магнитный поток, пронизывающий катушку, во время движения магнита; во время его остановки. Объясните, почему при приближении магнита к катушке магнитный поток, пронизывающий эту катушку, меняется.

5. Проверьте, одинаковым или различным будет направление индукционного тока в катушке при приближении к ней и удалении от неё одного и того же полюса магнита.

6. Приближайте полюс магнита к катушке с такой скоростью, чтобы стрелка миллиамперметра отклонялась не более чем на половину предельного значения его шкалы. Повторите тот же опыт, но при большей скорости движения магнита, чем в первом случае.

7. Сделайте и запишите вывод о том, как зависит сила индукционного тока, возникающего в катушке, от скорости изменения магнитного потока, пронизывающего эту катушку.

8. Соберите установку для опыта по рисунку 181.

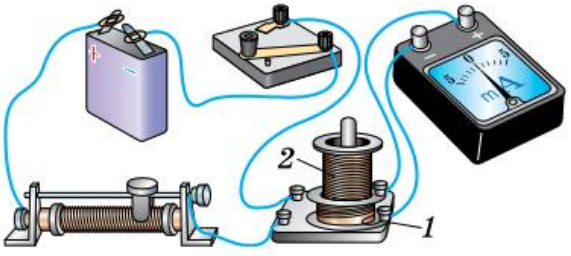


Рис. 181

9. Проверьте, возникает ли в катушке-мотке *1* индукционный ток в следующих случаях:
а) при замыкании и размыкании цепи, в которую включена катушка *2*;
б) при протекании через катушку *2* постоянного тока;
в) при увеличении и уменьшении силы тока, протекающего через катушку *2*, путём перемещения в соответствующую сторону ползунка реостата.

10. Сделайте вывод, в каких случаях меняется магнитный поток, пронизывающий катушку *1*, и почему.

ЗАДАЧИ ДЛЯ ПОВТОРЕНИЯ



ТЕПЛОВЫЕ ЯВЛЕНИЯ

1. На каком явлении основан принцип действия жидкостного термометра?
1) изменение давления паров жидкости при изменении температуры
2) изменение объёма жидкости при изменении температуры
3) изменение скорости диффузии в жидкостях при изменении температуры
4) изменение скорости испарения жидкости при изменении температуры

2. Что характеризует температура?
1) скорость движения одной молекулы
2) скорость движения множества молекул
3) взаимодействие молекул
4) среднюю кинетическую энергию теплового движения молекул

3. Стальную деталь просверлили. Как изменилась её внутренняя энергия?
1) увеличилась за счёт теплопередачи
2) увеличилась за счёт совершения работы
3) уменьшилась за счёт совершения работы
4) уменьшилась за счёт теплопередачи

4. Кусок свинца поместили в пламя газовой горелки. Как изменилась его внутренняя энергия?
1) увеличилась за счёт совершения работы
2) уменьшилась за счёт совершения работы
3) уменьшилась за счёт теплопередачи
4) увеличилась за счёт теплопередачи

5. На графике (рис. 182) показано изменение температуры некоторого твёрдого тела с течением времени. Определите начальную и конечную температуру тела. Охарактеризуйте изменение внутренней энергии тела на каждом участке графика за всё время наблюдения.

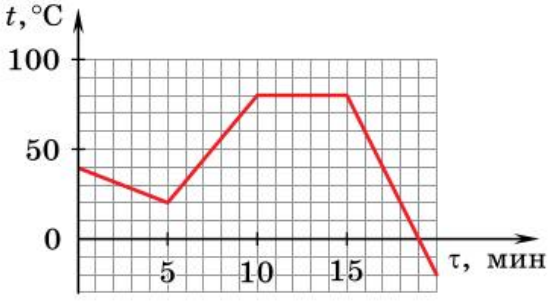


Рис. 182

6. Какое количество теплоты необходимо для нагревания железного утюга массой 400 г от температуры 20 °C до температуры 240 °C?

7. Какое количество теплоты выделится при охлаждении от температуры 80 °C: а) 3 кг воды до температуры 20 °C; б) 50 л воды до температуры 20 °C?

8. При остывании стальной детали массой 3 кг от температуры 600 °С до температуры 20 °С выделилось количество теплоты 870 кДж. Какова удельная теплоёмкость стали?

9. Определите массу куска серебра, если за промежуток времени от 5 до 10 мин (см. рис. 182) он получил от нагревателя количество теплоты 12 кДж.

10. Термометр, показывающий температуру 22 °С, опускают в воду, после чего его показания увеличиваются до 70 °С. Чему равна температура воды до погружения термометра? Масса воды 40 г, теплоёмкость[1] термометра 7 $\frac{\text{Дж}}{\text{К}}$.

11. Что происходит с температурой куска олова с момента начала плавления до его окончания?

12. На каком из графиков зависимости температуры от времени (рис. 183) есть участок, соответствующий процессу кристаллизации?

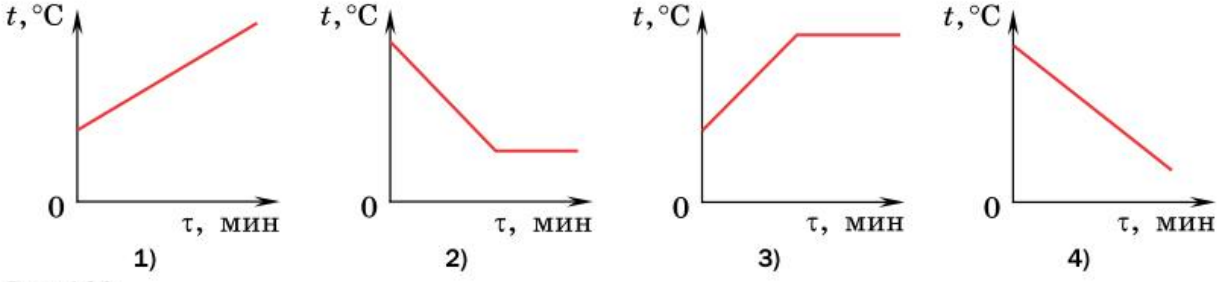


Рис. 183

13. В углубление, сделанное во льду, взятом при температуре 0 °С, положили кусок олова массой 66 г при температуре 110 °С. Какова масса растаявшего льда?

14. Когда в лёд, температура которого 0 °С, положили кусок металла массой 3 кг, предварительно прогретый в кипящей воде, под ним расплавилось 360 г льда. Какова удельная теплоёмкость металла?

15. На каком из графиков зависимости температуры от времени (рис. 184) есть участок, соответствующий процессу кипения?

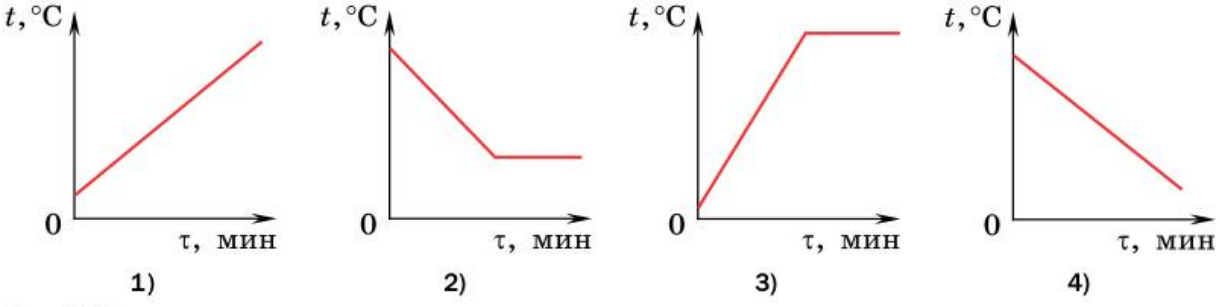


Рис. 184

[1] Теплоёмкость C равна произведению удельной теплоёмкости вещества c и массы m тела: $C = cm$.

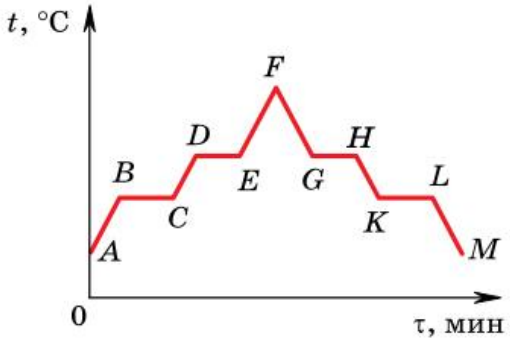


Рис. 185

16. Какое количество теплоты потребуется, чтобы довести до кипения 4 кг воды, находящейся при температуре 10 °С, и полностью испарить её?

17. В цилиндре под поршнем находилось твёрдое вещество. Цилиндр поместили в печь. Сначала его нагревали, а в некоторый момент начали охлаждать. На рисунке 185 приведён график изменения температуры t вещества с течением времени τ. Дайте названия процессам, которым соответствуют участки графика.

18. Сколько килограммов льда, взятого при температуре 0 °С, расплавится, если ему сообщить такое же количество теплоты, которое выделится при конденсации 13,2 кг водяного пара при температуре 100 °С?

19. Каковы показания сухого и влажного термометров психрометра, если разность их показаний 5 °С, а относительная влажность воздуха равна: а) 40%; б) 62%; в) 35%?

20. Какое топливо использовали для нагревания и превращения в пар 900 г воды с начальной температурой 39 °С, если истратили 50 г топлива?

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ

21. Может ли существовать электрическое поле в вакууме?

22. На рисунке 186 приведён график зависимости от времени заряда, прошедшего по проводнику. Чему равна сила тока в проводнике?

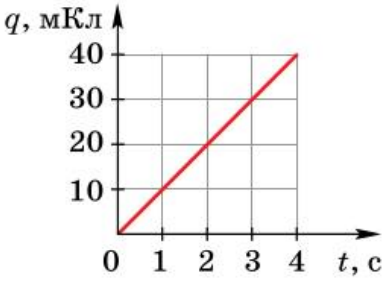


Рис. 186

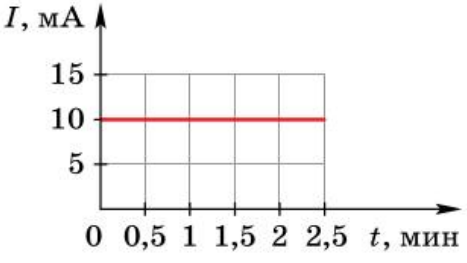


Рис. 187

23. На рисунке 187 приведён график зависимости силы тока в проводнике от времени. Какой заряд проходит по проводнику за 2 мин?

24. Установите соответствие между физическим законом и формулой.

Физический закон	Формула
А) закон сохранения электрического заряда	1) $I = \frac{U}{R}$
Б) закон Ома для участка цепи	2) $R = \frac{\rho l}{S}$
В) закон Джоуля—Ленца	3) $q_1 + q_2 + q_3 = \text{const}$
	4) $Q = I^2Rt$

25. Начертите схему электрической цепи, содержащей источник тока, два электрических звонка и ключ, так, чтобы звонки включались одновременно.

26. При открывании дверцы холодильника загорается лампа, а при закрывании холодильника она гаснет. Начертите схему соответствующей электрической цепи.

27. Показание вольтметра, подключённого к работающей лампе накаливания, равно 160 В. Амперметр, включённый в эту же цепь, показывает силу тока в лампе 1 А. Чему равно сопротивление лампы? Начертите схему данной электрической цепи, включив в неё источник тока и ключ.

28. Ученик провёл ряд опытов, в которых он измерял сопротивления различных металлических проводников. В качестве проводника он использовал манганиновые и нихромовые проволоки разных длин и диаметров. Результаты опытов приведены в таблице.

№ опыта	Материал	Площадь поперечного сечения S, 10^{-3} см^2	Длина l, см	Сопротивление R, Ом
1	Манганин	1,5	40	1,1
2	Манганин	1,5	80	2,3
3	Манганин	3,0	80	1,1
4	Нихром	1,5	30	2,2

Выберите из предложенного перечня два утверждения, которые соответствуют результатам проведённых измерений.

1) При увеличении длины проводника его сопротивление не меняется.
2) Сопротивление проводника зависит от материала, из которого он изготовлен.
3) Сопротивление проводника увеличивается при увеличении его длины.
4) Сопротивление проводника уменьшается при увеличении его площади поперечного сечения.
5) Сопротивление проводника увеличивается при увеличении его диаметра.

29. Определите удельное сопротивление проволоки длиной 20 м и площадью поперечного сечения 10^{-7} м^2, если её сопротивление 2 Ом.

30. Масса 1 км медного контактного провода на пригородных железных дорогах составляет 890 кг. Каково сопротивление этого провода?

31. Какой длины надо взять медный провод площадью поперечного сечения 3,6 мм^2, чтобы при силе тока 1,5 А напряжение на нём было 0,6 В?

32. Две проволоки — медная и алюминиевая имеют одинаковую массу. Длина медной проволоки в 10 раз больше длины алюминиевой. Во сколько раз сопротивление медной проволоки больше сопротивления алюминиевой? Плотность меди в 3,3 раза больше плотности алюминия, а удельное сопротивление в 1,65 раз меньше.

33. Две лампы сопротивлением 100 и 400 Ом соответственно включены последовательно. Какая из них будет гореть ярче?

34. Две лампы сопротивлением 100 и 400 Ом соответственно включены параллельно. Какая из них будет гореть ярче?

35. Какую работу совершает электрический ток в электродвигателе за 1 мин, если при напряжении 220 В сила тока в двигателе равна 0,2 А?

36. Какое количество теплоты выделяется в лампе накаливания сопротивлением 200 Ом за 1 ч, если она включена в цепь с напряжением 200 В?

37. В паспорте электрического утюга написано «220 В, 600 Вт». Какое количество теплоты выделится в утюге за 0,5 ч работы при напряжении в сети 220 В?

38. Два резистора сопротивлениями 5 и 10 Ом соединены параллельно. Напряжение на резисторах 4 В. Какое количество теплоты выделяется в каждом резисторе за 1 мин?

39. За какое время в спирали сопротивлением 40 Ом при силе тока 2 А выделится 16 кДж энергии?

40. Какое сопротивление следует включить в сеть с напряжением 220 В, чтобы в нём за 10 мин выделилось 120 кДж энергии?

41. На электрической плитке мощностью 1200 Вт вода объёмом 2 л нагревается от 20 до 100 °С за 15 мин. Определите КПД плитки.

42. За какое время в электрическом чайнике мощностью 600 Вт можно вскипятить 1 л воды, взятой при температуре 20 °С? КПД чайника 70%.

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ЯВЛЕНИЯ

43. Что показал опыт Эрстеда?

44. Прямолинейный проводник расположили над магнитной стрелкой параллельно её оси. При пропускании по проводнику электрического тока стрелка повернулась, установившись почти перпендикулярно проводнику. Что оказывает более сильное действие на магнитную стрелку — электрический ток или магнитное поле Земли?

45. Почему научно-исследовательские суда для изучения магнитного поля Земли строят не из стали, а из дерева?

46. Изменится ли направление вращения рамки (см. рис. 159), если изменить полярность подключения источника тока к щёткам?

47. Каков принцип действия электродвигателя?

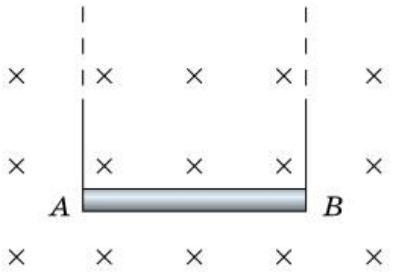


Рис. 188

48*. На рисунке 188 изображён проводник AB длиной 10 см и массой 2 г, помещённый в однородное магнитное поле индукцией $4 \cdot 10^{-2}$ Тл перпендикулярно линиям магнитной индукции. По проводнику от A к B протекает электрический ток (подводимый по тонким проводам, на которых подвешен данный проводник). Определите направление магнитной силы, действующей на проводник с током. Какой должна быть сила тока, чтобы действующая на проводник AB сила тяжести уравновешивалась магнитной силой?

49. Положительно заряженная частица движется вблизи прямого проводника с током и в некоторый момент времени имеет скорость $\vec{v}$, направленную так, как показано на рисунке 189. Куда в этот момент направлена сила, действующая на частицу со стороны магнитного поля?

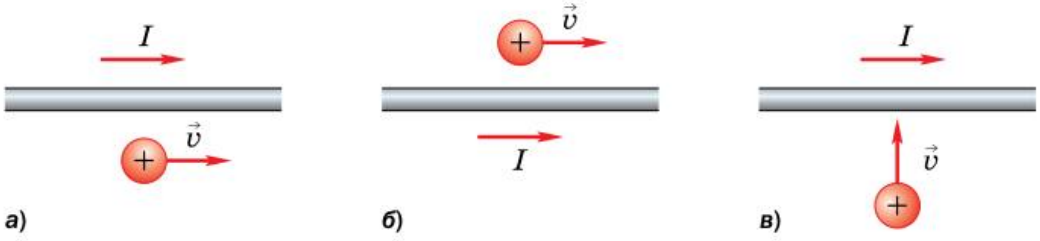


Рис. 189

ОТВЕТЫ

К упражнениям

Упр. 2. **1.** а) 2 °С; б) 2 К. **2.** а) 27 °С; –53 °С; 0 °С; 400 °С; б) 400 К; 246 К; 309,6 К. **3.** а) 273 К; 10 °С; б) 290 К; 27 °С; в) 0 К; 0 °С.

Упр. 8. **2.** $Q_{\text{воды}} > Q_{\text{меди}}$. **4.** У медной гирьки температура изменится больше. **5.** *3* — вода; *2* — керосин; *1* — подсолнечное масло. **6.** *1* — вода; *2* — алюминий.

Упр. 9. **1.** 63 кДж. **2.** Уменьшилась на 588 кДж. **3.** 0,5 кг. **4.** ≈53 кДж. **5.** 5 л. **6.** а) 625,8 $\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot {}^\circ\text{С}}$; б) 658,7 $\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot {}^\circ\text{С}}$.

Упр. 10. **3.** $7 \cdot 10^7$ Дж. **4.** $4{,}6 \cdot 10^7$ $\frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$; керосин или бензин. **6*.** ≈0,025 г. **7*.** $\approx 2{,}7 \cdot 10^7$ $\frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$.

Упр. 11. **1.** 4 Дж. **2.** Уменьшится на 50 Дж. **3.** 1 кДж. **4.** 32 Дж.

Упр. 14. **3.** Вода замёрзнет. **4.** Для плавления алюминия потребуется в 4,6 раз больше энергии. **5.** На 11,8 кДж. **6.** 9,72 кДж. **7*.** а) 1020 кДж; б) 1224 кДж.

Упр. 17. **6.** ≈68%. **7.** а) 66%; б) 100%; в) 91%.

Упр. 19. **2.** 2,09 МДж. **5*.** ≈50 кг. **6*.** 31 кг.

Упр. 20. **1.** 5,7 г.

Упр. 21. **1.** 25%; 8750 Дж. **2.** ≈1100 Дж. **3.** ≈17,6 кДж.

Упр. 25. **2.** $-2q$. **3.** $1{,}44 \cdot 10^{-2}$ Кл; $8{,}2 \cdot 10^{-14}$ кг. **4.** $2{,}5 \cdot 10^{10}$; $2{,}275 \cdot 10^{-20}$ кг. **5.** $\approx +8{,}3 \cdot 10^{-7}$ Кл.

Упр. 30. **2.** 5 А. **3.** 4,8 А. **4.** 10 с. **5.** 1 А. **6.** 1 мКл; $6{,}25 \cdot 10^{15}$.

Упр. 31. **3.** Напряжение на втором проводнике в 3,75 раза больше. **4.** 12 В. **5.** Напряжение на первом участке цепи в 6 раз больше.

Упр. 32. **1.** 0,3 А. **2.** 220 кОм. **3.** 12 В; сила тока увеличится в 4 раза. **4.** 4 Ом. **5.** ≈5,5 А.

Упр. 33. **1.** 1,1 Ом. **2.** Второй проводник имеет большее в 6 раз сопротивление. **3.** Сопротивление второго проводника меньше в 5 раз. **4.** Проводник из вольфрама имеет в 3,2 раза большее сопротивление. **5.** Уменьшилось в 4 раза. **6.** ≈327,3 м. **7.** 25,5 мОм.

Упр. 34. **1.** Сила тока уменьшится в 7 раз. **2.** 0,272 Ом. **4.** 4,25 В. **5.** 5,1 мм^2. **6.** 1,1 $\frac{\text{Ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}}$; нихром.

Упр. 35. 2,25 А.

Упр. 36. **1.** 2 А; 20 В; 60 В. **2.** 7. **3.** 1400 Ом. **4*.** 50 м.

Упр. 37. **2.** 3 А; 2 А; 1 А. **3.** 0,12 А. **4.** В 2 раза.

Упр. 38. **1.** 14,4 кДж. **2.** 500 мВт. **3.** ≈1,19 МДж. **4.** ≈0,55 А; ≈400 Ом. **5.** 5,76 МДж. **6.** 60,5 Ом. **7*.** а) ≈15,4 Вт; б) 65 Вт.

Упр. 39. **1.** Увеличится в 4 раза. **2.** 360 кДж. **3.** 6 кДж; 12 кДж. **4.** 480 Дж. **5*.** 130 г.

Упр. 41. **1.** 4,4 м. **3.** Сопротивление первой лампы в 3 раза больше. **4.** 2,25 кВт.

Упр. 46. **1.** Вправо. **2.** От A к B.

Упр. 47. **1.** 0,5 Тл.

К задачам для повторения

6. $4{,}048 \cdot 10^4$ Дж. **7.** а) 756 кДж; б) 12,6 МДж. **8.** 500 $\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot {}^\circ\text{C}}$. **9.** 800 г. **10.** 72 °C. **13.** ≈5 г. **14.** 408 $\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot {}^\circ\text{C}}$. **16.** $\approx 1{,}1 \cdot 10^7$ Дж. **18.** ≈89,3 кг. **19.** а) 8 °C; 3 °C; б) 24 °C; 19 °C; в) 6 °C; 1 °C. **20.** Керосин. **27.** 160 Ом. **28.** 3; 4. **29.** 10^{-8} Ом · м. **30.** 0,17 Ом. **31.** ≈84,7 м. **32.** 200. **33.** Ярче горит лампочка сопротивлением 400 Ом. **34.** Ярче горит лампочка сопротивлением 100 Ом. **35.** 2640 Дж. **36.** 720 кДж. **37.** 1,08 МДж. **39.** 100 с. **40.** 242 Ом. **41.** ≈62%. **42.** 800 с. **48*.** 5 А.

ПРЕДМЕТНО-ИМЕННОЙ УКАЗАТЕЛЬ

А

Агрегатное состояние 6
Аккумулятор 126
Аморфное состояние 9
Ампер А. 140
Ампер (единица силы тока) 140
Амперметр 141
Аномалия магнитная 198
Атом 113

Б

Бури магнитные 198

В

Ватт (единица мощности) 170
Взаимодействие магнитов 184
— проводников с током 139
— тел, имеющих электрические заряды 102
Влажность воздуха абсолютная 73
— — относительная 74
Вольт (единица напряжения) 144
Вольта А. 144
Вольтметр 146

Г

Гальванометр 136
Генератор электрического тока 127
Гигрометр 75
— волосной 75
— конденсационный 76

Д

Двигатель внутреннего сгорания 89
— тепловой 88
— электрический 207
Движение тепловое 16
Действие тока тепловое 133
— — магнитное 135
— — химическое 135
Делимость электрического заряда 112
Джоуль Дж. 173
Джоуль (единица энергии) 20
Дизель Р. 89
Дискретность заряда 112
Диэлектрик 105

З

Заземление 120
Закон Джоуля—Ленца 172
— Кулона 107
— Ома для участка цепи 149
— сохранения энергии 53
— сохранения электрического заряда 117
Замыкание короткое 180
Заряд электрический 101
— — отрицательный 102
— — положительный 102
— точечный 107
— ядра 115

И

Излучение 35
Индукция магнитного поля (магнитная индукция) 205

Ион 115
Иоффе А. Ф. 112
Испарение 66
Источник электрического тока 124

К

Капиллярные явления 12
Кипение 79
Количество теплоты 39
Конвекция 33
Конденсация 67
Коэффициент полезного действия теплового двигателя 96
Кристаллизация (отвердевание) 55
Кристаллическое состояние 9
Кулон (единица электрического заряда) 141
Кулон Ш. 101

Л

Лампа накаливания 175
— энергосберегающая (люминесцентная) 176
Ленц Э. Х. 172
Линии магнитной индукции 206
Лодыгин А. Н. 174

М

Магнитное поле 187
— — Земли 197
— — катушки с током 193
— — постоянного магнита 191
— — прямого тока 189
Магнитные линии магнитного поля 189
Магнитный поток (поток вектора магнитной индукции) 210
Магнит постоянный 183
Мандельштам Л. И. 131
Милликен Р. 112
Мощность электрического тока 170

Н

Направление электрического тока 125
Напряжение электрическое 144
Напряжённость электрического поля 109
Нейтрон 114

О

Ом Г. 148
Ом (единица сопротивления) 148

П

Пар насыщенный 67
— ненасыщенный 68
Парообразование 65
Перрен Ж. 4
Плавление 55
Полная энергия системы тел 52
Полупроводник 106
Правило буравчика 190
— левой руки 201
— Ленца 218
— правой руки 193
Предохранитель плавкий 180
Проводник 105
Протон 114
Психрометр 76

Р

Работа электрического тока 169
Реостат 159
Рихман Г. 108
Ротор 220

С

Сила магнитная 187
— электрическая 108
Сила тока 139
Смачивание 11
Соединение проводников параллельное 165
— — последовательное 161
Сопротивление электрическое 148
— — удельное 153
Статическое электричество 120
Статор 220
Счётчик электрической энергии 169

Т

Температура 14
— кипения 80
— кристаллизации 56
— плавления 55
Теплопередача 26
Теплопроводность 29
Термос 37
Термоэлемент 125
Тесла (единица магнитной индукции) 205
Ток электрический 123
— — переменный 219
Точка росы 75
Трансформатор 224
— повышающий 225
— понижающий 225
Турбина паровая 93

У

Уатт Дж. 88
Удельная теплоёмкость 42
— теплота парообразования 83
— — плавления 62
— — сгорания 49
Уравнение теплового баланса 47

Ф

Фарадей М. 212
Фотоэлемент 125

Ц

Цепь электрическая 128

Э

Эдисон Т. 175
Электризация тел 101
Электрическое поле 108
Электрод 126
Электромагнитная индукция 214
Электромагнит 194
Электрометр 104
Электрон 112
Электроскоп 104
Элемент гальванический 125
Энергия внутренняя 20
— кинетическая 20
— потенциальная 20
Эрстед Х. 186

Я

Яблочков П. Н. 225
Ядро атома 114
Якоби Б. С. 209
Якорь электродвигателя 209

ОГЛАВЛЕНИЕ

ГЛАВА 1 ТЕПЛОВЫЕ ЯВЛЕНИЯ

§ 1 Основные положения молекулярно-кинетической теории строения вещества 3
§ 2 Агрегатные состояния вещества 6
§ 3 Смачивание и несмачивание. Капиллярные явления 10
§ 4 Температура 14
ЭТО ЛЮБОПЫТНО...
Особенность расширения воды 18
Причина теплового расширения твёрдых тел 19
§ 5 Внутренняя энергия 20
§ 6 Способы изменения внутренней энергии тела 24
ЭТО ЛЮБОПЫТНО...
Из истории учения о теплоте 27
§ 7 Теплопроводность 28
ЭТО ЛЮБОПЫТНО...
Приспособление животных к различным температурным условиям 31
§ 8 Конвекция 33
§ 9 Излучение 35
ЭТО ЛЮБОПЫТНО...
Городские «острова тепла» 38
§ 10 Количество теплоты. Единицы количества теплоты 39
§ 11 Удельная теплоёмкость 41
§ 12 Расчёт количества теплоты. Уравнение теплового баланса 44
ЭТО ЛЮБОПЫТНО...
Калория — единица количества теплоты 48
§ 13 Энергия топлива. Удельная теплота сгорания 48
ЭТО ЛЮБОПЫТНО...
Виды горючего топлива 51
§ 14 Закон сохранения и превращения энергии в механических и тепловых процессах 52
§ 15 Плавление и отвердевание кристаллических тел 55

§ 16 График плавления и отвердевания кристаллических тел 57
ЭТО ЛЮБОПЫТНО...
От чего зависит температура плавления 60
Как происходит кристаллизация 60
§ 17 Удельная теплота плавления 61
§ 18 Испарение. Конденсация. Насыщенный и ненасыщенный пар 65
§ 19 Поглощение энергии при испарении жидкости. Выделение энергии при конденсации пара 70
ЭТО ЛЮБОПЫТНО...
Водяной пар в атмосфере 72
§ 20 Влажность воздуха. Способы определения влажности воздуха 73
§ 21 Кипение 79
ЭТО ЛЮБОПЫТНО...
Примеры использования кипения 82
§ 22 Удельная теплота парообразования 83
§ 23 Работа газа и пара при расширении 87
§ 24 Двигатель внутреннего сгорания 89
§ 25 Паровая турбина 93
ЭТО ЛЮБОПЫТНО...
Из истории тепловых двигателей 94
§ 26 КПД теплового двигателя 95
ЭТО ЛЮБОПЫТНО...
Загрязнение окружающей среды 97
Меры по борьбе с загрязнением окружающей среды 98
ИТОГИ ГЛАВЫ 98

ГЛАВА 2 ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ

§ 27 Электризация тел при соприкосновении. Взаимодействие заряженных тел 100
ЭТО ЛЮБОПЫТНО...
Легенда об открытии электризации 103
§ 28 Электроскоп. Проводники и непроводники электричества 103
§ 29 Закон Кулона. Электрическое поле 106
§ 30 Делимость электрического заряда. Электрон 111
§ 31 Строение атома 113
ЭТО ЛЮБОПЫТНО...
О размерах атома и его ядра 116
§ 32 Объяснение электрических явлений. Закон сохранения электрического заряда 116
§ 33 Статическое электричество, его учёт и использование в быту и технике 120
§ 34 Электрический ток. Источники электрического тока 123

§ 35 Электрическая цепь и её составные части 128
§ 36 Электрический ток в металлах 130
§ 37 Действия электрического тока 133
ЭТО ЛЮБОПЫТНО...
Аккумуляторы 138
§ 38 Сила тока. Измерение силы тока 138
§ 39 Электрическое напряжение. Измерение напряжения 143
§ 40 Электрическое сопротивление проводника.
Закон Ома для участка цепи 147
ЭТО ЛЮБОПЫТНО...
Почему электрический ток опасен для человека? 151
§ 41 Расчёт сопротивления проводника.
Удельное сопротивление 152
ЭТО ЛЮБОПЫТНО...
Из истории учения об электричестве 156
§ 42 Примеры на расчёт сопротивления проводника,
силы тока и напряжения 156
§ 43 Реостаты 159
§ 44 Последовательное соединение проводников 161
§ 45 Параллельное соединение проводников 165
§ 46 Работа и мощность электрического тока 169
§ 47 Нагревание проводников электрическим током.
Закон Джоуля—Ленца 172
§ 48 Лампа освещения. Электрические нагревательные
приборы 174
ЭТО ЛЮБОПЫТНО...
Молния 178
§ 49 Короткое замыкание. Предохранители 179
ИТОГИ ГЛАВЫ 181

ГЛАВА 3 ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ЯВЛЕНИЯ

§ 50 Постоянные магниты 183
§ 51 Магнитное поле 186
ЭТО ЛЮБОПЫТНО...
Из истории электромагнетизма 188
§ 52 Магнитное поле проводников с током и постоянных магнитов.
Магнитные линии 189
§ 53 Магнитное поле катушки с током.
Электромагниты и их применение 192
ЭТО ЛЮБОПЫТНО...
Реле и их применения в технике 196
§ 54 Магнитное поле Земли 197
§ 55 Действие магнитного поля на проводник с током.
Правило левой руки 199

§ 56 Индукция магнитного поля 204
§ 57 Электрический двигатель 207
§ 58 Магнитный поток 210
§ 59 Явление электромагнитной индукции 212
ЭТО ЛЮБОПЫТНО...
Открытия Майкла Фарадея 216
§ 60 Направление индукционного тока. Правило Ленца 216
§ 61 Способы получения электрической энергии 219
§ 62 Передача электрической энергии 223
ЭТО ЛЮБОПЫТНО...
Из истории электротехники 226
ИТОГИ ГЛАВЫ 228
ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ 229
1. Изучение устройства калориметра 229
2. Изучение процесса теплообмена 230
3. Измерение удельной теплоёмкости вещества 231
4. Измерение относительной влажности воздуха 232
5. Сборка электрической цепи и измерение силы тока в её различных участках 233
6. Измерение напряжения на различных участках последовательной электрической цепи 234
7. Измерение сопротивления проводника. Изучение принципа действия реостата 235
8. Изучение параллельного соединения проводников 237
9. Измерение мощности и работы тока в электрической лампе 238
10. Изучение явления электромагнитной индукции 239
ЗАДАЧИ ДЛЯ ПОВТОРЕНИЯ 241
ОТВЕТЫ 247
ПРЕДМЕТНО-ИМЕННОЙ УКАЗАТЕЛЬ 249