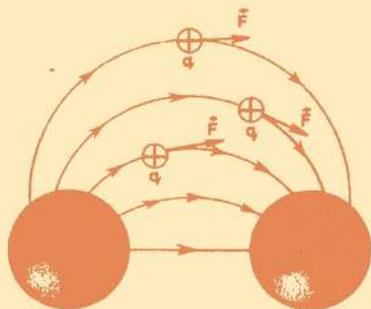
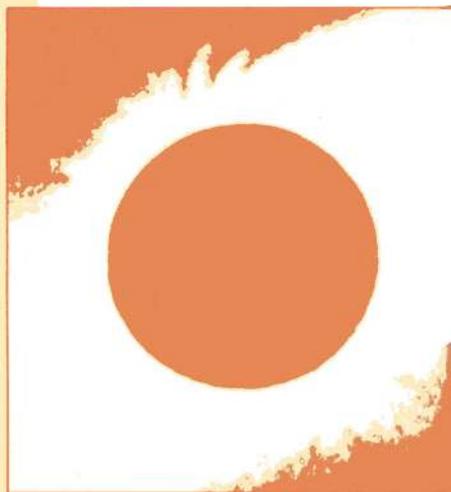
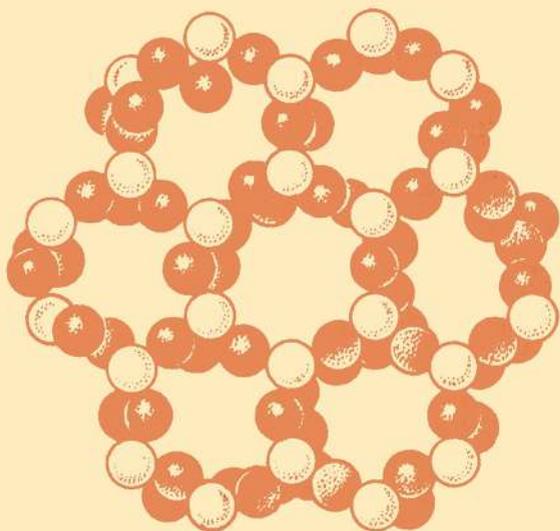
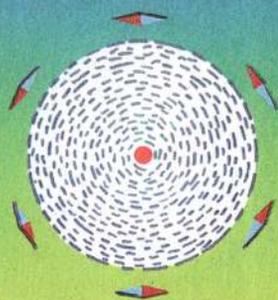
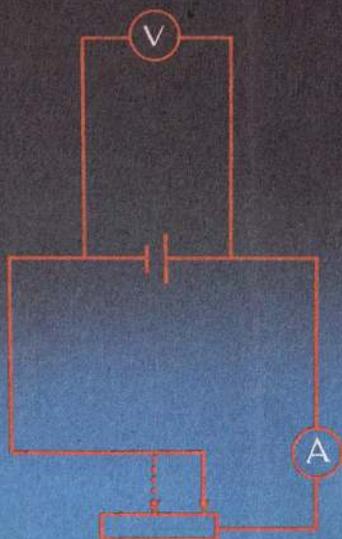


Физика и астрономия





A. Ампер
1775—1838





Х. Эрстед
1777—1851



М. Фарадей
1791—1867

Физика

и астрономия

Учебник для 8 класса
общеобразовательных
учреждений

*Под редакцией А.А.Пинского,
В.Г.Разумовского*

Рекомендовано Министерством
образования Российской Федерации

5-е издание

Москва «Просвещение» 2001

УДК 373.167.1:[53+52]
ББК 22.3я72
Ф50

Авторы: А. А. Пинский, В. Г. Разумовский, Н. К. Гладышева, И. В. Гребенев, Г. Г. Никифоров, И. И. Нурминский, Е. К. Страут, Ю. П. Тарасов, Н. М. Шахмаев, В. Ф. Шилов

Учебник разработан
в Институте общего среднего образования РАО.

Физика и астрономия: Учеб. для 8 кл. общеобразоват. учреждений / А. А. Пинский, В. Г. Разумовский, Н. К. Гладышева и др.; Под ред. А. А. Пинского, В. Г. Разумовского. — 5-е изд. — М.: Просвещение, 2001. — 303 с.: ил. — ISBN 5-09-010380-1.

УДК 373.167.1:[53+52]
ББК 22.3я72+22.6я72

ISBN 5-09-010380-1

© Издательство «Просвещение», 1997
© Художественное оформление. Издательство «Просвещение», 2000
Все права защищены

СОВЕТЫ ЮНЫМ ЧИТАТЕЛЯМ

В VII классе вы начали изучать курс физики и астрономии и убедились, что этот предмет требует к себе серьезного внимания и систематической работы. Вместе с тем вы узнали много нового и интересного о закономерностях окружающего нас мира и явлений природы, а также о применении физики в технике. Вы научились работать с физическими приборами, научились экспериментировать.

В предлагаемом вашему вниманию учебнике (II часть курса) даны основные понятия атомно-молекулярной теории строения вещества и показаны закономерности тепловых и электромагнитных явлений природы с применением их в технике, в частности в тепло- и электроэнергетике. Теория физики поможет понять и объяснить эти явления, а также рассмотреть характерные особенности планет Солнечной системы и самого Солнца.

Напомним некоторые рекомендации, которые помогут вам при работе с учебником.

В учебнике не весь материал является обязательным для изучения. В нем имеются параграфы или части параграфов, предназначенные для тех учащихся, которые хотят получить более глубокие знания в области физики и астрономии. Этот материал отмечен сбоку цветной линией.

Не пытайтесь заучивать текст учебника. Это невозможно, да и не нужно. Надо постараться понять суть изложенного материала и научиться его излагать своими словами, а затем применять на практике.

Учтите, что формулировки должны быть достаточно точными, когда вы воспроизводите физический смысл какого-либо материала, определения, понятия или физического закона. Поэтому свои формулировки записывайте и сравнивайте с текстом. Старайтесь выяснить, чем они отличаются от текста; допустимы ли изменения, которые вы внесли; не меняет ли это смысл какого-либо понятия или закона.

Прочитав текст параграфа, постарайтесь ответить на вопросы для самопроверки. Если вы ответили на все вопросы, то это значит, что материал вами в основном усвоен. Если же на некоторые вопросы вы ответить не можете, то читайте параграф еще раз, отыскивая при этом ответы на вопросы, вызвавшие у вас затруднения.

Вопросы, отмеченные цветной чертой, предназначены для учащихся, желающих более глубоко изучить материал. Поэтому их читать всем необязательно.

Учебник по физике и астрономии недостаточно просто читать. Над ним надо работать с карандашом в руках. Основные формулы следует выписывать в тетрадь, строить все графики, внимательно анализировать рисунки. На наиболее сложные вопросы желательнее отвечать письменно. Все это позволит лучше усвоить материал, углубить его понимание.

Невозможно хорошо изучить физику и астрономию, не научившись решать задачи. Поэтому после изучения теоретического материала следует решить несколько задач, предлагаемых в упражнениях после параграфов. Ответы, с которыми можно сверить полученные результаты, найдете в конце книги.

Если вы затрудняетесь с решением той или иной задачи, то это чаще всего означает, что вы недостаточно хорошо поняли теоретический материал. Тогда прочитайте еще раз параграф, продумайте основные понятия и закономерности. В случае, если и это не помогает, то обратитесь за помощью к учителю или товарищу, но задачу все-таки решите. Со временем вы приобретете нужные навыки, и решение физических задач окажется для вас интересным занятием.

Задачи, отмеченные цветной чертой, — это, как правило, более сложные задачи, предназначенные для учащихся, желающих изучить физику и астрономию на повышенном уровне. Поэтому не каждый ученик должен их решать.

В физике и астрономии большую роль играют наблюдения и опыты (эксперименты). Без самостоятельных наблюдений и опытов усвоить физику нельзя. Постарайтесь проделать все наблюдения и опыты, рекомендованные в книге, и вы увидите, что материал воспринимается легче, а следовательно, легче отвечать на многие вопросы.

Попробуйте самостоятельно придумать и поставить новые опыты, связанные с изученным материалом. Это существенно улучшит ваши знания и умения.

В одной книге невозможно раскрыть весь путь развития научного знания. Между тем у любознательного ученика всегда будет возникать вопрос: а как это все узнали? Как, например, узнали, что вещества состоят из молекул и атомов? Ответы на многие подобные и другие вопросы вы найдете, если попытаетесь не ограничиваться простым усвоением содержания учебника, что тоже необходимо, а будете активно работать с другими источниками над интересующими вас вопросами.

Для того чтобы докопаться до какой-либо сути, нужно искать ответы в книгах и журналах, строить предположе-

ния, наблюдать и пытаться делать выводы, а затем проверять их на доступных опытах. Все это будет не только углублять ваши знания, но и развивать способности.

Для глубокого понимания изучаемого материала необходимо каждый раз задавать себе вопрос: с какими научными данными имеете дело? Это могут быть опытные факты или предположения, теоретические выводы или законы природы, на основе которых можно сделать расчеты.

Следует обратить внимание на техническое применение достижений науки: на устройство и принцип действия машин, приборов, аппаратов, результаты воздействия производственной деятельности на окружающую среду.

Желаем вам больших успехов в работе.

Авторы

ВВЕДЕНИЕ

В этой книге вы познакомитесь с новым рядом интересных явлений, понятий и законов. Вы узнаете, что такое электризация тел и их взаимодействие, что называется электрическим зарядом и электрическим током, узнаете, как читается закон, определяющий силу взаимодействия электрических зарядов, и закон, определяющий силу тока в электрической цепи. Описания физических законов, явлений и их свойств, понятий и их определений составляют научную теорию, которая не только позволяет систематизировать научные знания и объяснять множество явлений, но и дает возможность предвидеть их ход, предсказывать свойства веществ, конструировать приборы и машины, разрабатывать технологию новых производственных процессов. Физика — одна из главных наук, обеспечивающих прогресс в промышленности.

На основании электромагнитной теории вам станут понятны многие свойства вещества в твердом, жидком и газообразном состояниях, принципы действия электрических приборов, радиодеталей, электрических двигателей и др.

Вы познакомитесь с теорией атомного и молекулярного строения вещества и теорией тепловых процессов. Вам станет понятно, почему окружающие тела обладают различными свойствами и почему они нагреваются и охлаждаются; вы узнаете, почему с изменением температуры меняются свойства тел, как и почему работают тепловые машины; увидите, как физическая теория позволяет раскрыть связь между явлениями, которые на первый взгляд кажутся совсем разными. Познав законы природы, человек использует их. Теплотехника, электро- и радиотехника, энергетика и другие отрасли промышленности составляют основу современного производства и научно-технического прогресса. Однако мы живем в такое время, когда вмешательство человека в природу достигло таких размеров, что может стать для нее разрушительным. Поэтому мы обязаны предвидеть, что повлечет за собой какое-либо новое производство, как оно повлияет на природу, в частности на загрязненность воздуха, на нагревание атмосферы и ее состав. Проблемами сохранения природы, сохранения в ней условий для существования жизни занимается специальная наука — экология, которая требует широкого диапазона знаний, включая знания о Земле, Мировом океане, атмосфере, Солнечной системе и т. д. Содержание данного учебника и посвящено изучению строения Солнечной системы и законов жизни на Земле.

Г Л А В А 1. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ЗАРЯД

§ 1.1. ЭЛЕКТРИЗАЦИЯ ТЕЛ

I. Прodelайте опыт. Положите на стол небольшие кусочки бумаги (рис. 1.1). Затем проведите по сухим волосам расческой и поднесите ее к этим бумажкам. Вы увидите: *кусокки бумаги притянулись к расческе*. Так как бумажка поднялась вверх против действия силы тяжести, то можно утверждать, что на нее подействовала другая сила, направленная вверх. Что это за сила?

II. Явление притяжения натертым телом других тел было обнаружено в Древней Греции. Еще тогда люди увидели, что кусочек янтаря, потертый о шерсть, притягивает к себе маленькие тела. Это явление использовали для удаления пыли с дорогих одежд, которые вытряхивать было нельзя, иначе можно повредить пурпурную краску, которой они были выкрашены. (Слово «янтарь» по-гречески $\bar{\epsilon}\lambda\epsilon\kappa\tau\gamma\omicron\upsilon\alpha$ — электрон.)

Явления, связанные со взаимодействием тел, которые были приведены в контакт друг с другом (расческа с волосами, янтарь с шерстью и т. д.), стали называть *электризацией* тел, а возникающие при этом силы — *электрическими силами*. Эти термины стали общепринятыми в науке.

III. Электризация наблюдается всегда при контакте двух разнородных тел. Так, если разгладить руками на листе плексигласа лист бумаги, например листы газеты, то обнаружится: газета и плексиглас прилипают друг к другу. Следовательно, эти тела электризуются, т. е. между ними возникают электрические силы притяжения. Также электризация наблюдается при контакте стекла и кожи, эбонита или резины и шерсти (рис. 1.2), плексигласа и шерсти и т. д.

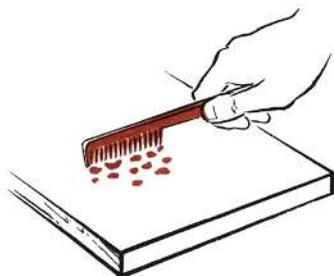


Рис. 1.1

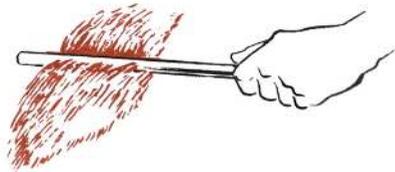


Рис. 1.2

Если в темноте отделять бумагу от пластины плексигласа или быстро снимать с себя синтетическую рубашку, то будут видны искры и слышно потрескивание.

Данное явление называют *электризация трением*. Однако трение здесь принципиальной роли не играет. Важен хороший контакт между поверхностями электризуемых тел, а трение лишь способствует увеличению поверхности контакта.

Вопросы для самопроверки

1. Как мы обнаруживаем, что тело наэлектризовано?
2. Откуда взялся термин «электричество»?
3. При каких условиях происходит электризация?

§ 1.2. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ЗАРЯД

I. С помощью опытов мы убедились в том, что два разнородных тела (т. е. тела из разных веществ) приобретают при электризации новое свойство — *способность вступать в электрическое взаимодействие*.

Физическая величина, характеризующая свойство тел вступать в электрическое взаимодействие, называется электрическим зарядом.

II. Для того чтобы выяснить, каков характер взаимодействия электрических зарядов, делают опыт (рис. 1.3). На шелковой или капроновой нити подвешивают небольшой легкий предмет, например гильзу из фольги, и прикасаются к ней наэлектризованной палочкой из плексигласа. Оказывается, что после касания гильза начинает отталкиваться от палочки. Той же палочкой касаются еще одной гильзы из фольги, а затем обе гильзы приближают друг к другу — гильзы отталкиваются (рис. 1.4). Очевидно, что поскольку обе гильзы заряжались от одной и той же наэлектризованной палочки, то на них оказались электрические заряды *одного вида*. Такие заряды называются *одноименными*. Можно сделать вывод: *одноименные электрические заряды отталкиваются друг от друга*.

III. Прodelывают другой опыт. Заряжают одну гильзу от плексигласовой палочки, потертой о шелк, а другую — от стеклянной, потертой о кожу. При сближении этих гильз оказывается, что они притягиваются друг к другу (рис. 1.5). Таким образом, можно сделать еще один вывод: *стекло и плексиглас электризуются по-разному; на них возникают разные, т. е. разноименные, заряды. Отсюда следует: разноименные электрические заряды притягиваются друг к другу*.

IV. Принято называть электрический заряд наэлектризованной плексигласовой палочки, потертой о шелк, или янтаря, потертого о шерсть, *отрицательным*, а стеклянной палочки, потертой о кожу, — *положительным*. Итак, существуют два вида электрических зарядов: *положительный и отрицательный*.

Иногда гильзы, притягивающиеся друг к другу, после соприкосновения повисают вертикально. Это значит, что после контакта противоположно заряженные тела *нейтрализуются*, т. е. при сложении двух равных по модулю и противоположных по знаку зарядов их сумма равна нулю.

V. В процессе электризации плексигласовой палочки трением о шерсть плексиглас приобретает отрицательный заряд, а шерсть — равный по модулю, но положительный заряд. Точно так же при контакте стекла и кожи стеклянная палочка приобретает положительный заряд, а кожа — равный по модулю, но отрицательный заряд. Иными словами — электрические заряды не создаются и не исчезают, они лишь перераспределяются между контактирующими телами. Система тел, которая не взаимодействует с окружающими телами, называется *замкнутой* или *изолированной системой тел*. Явление электризации подчиняется *закону сохранения электрического заряда*. Во всех явлениях электризации тел в замкнутой системе суммарный электрический заряд сохраняется. Если одно тело приобретает положительный электрический заряд, то второе тело тоже приобретает равный по модулю отрицательный заряд.

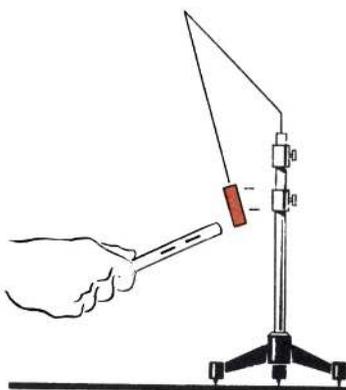


Рис. 1.3

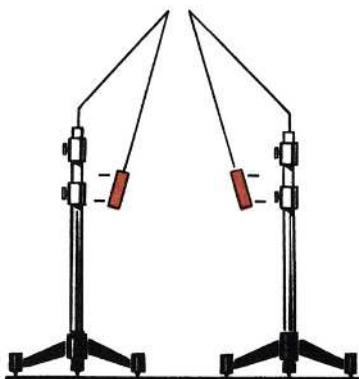


Рис. 1.4

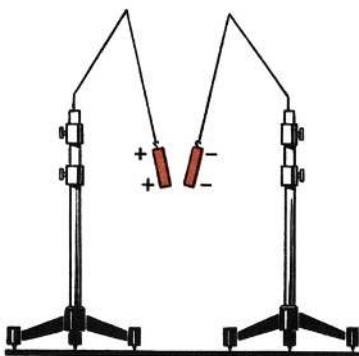


Рис. 1.5

Вопросы для самопроверки

1. Какое тело мы называем наэлектризованным?
2. Какие тела вступают в электрическое взаимодействие?
3. Как взаимодействуют одноименно и разноименно электрически заряженные тела?
4. При каких условиях при контакте происходит полная нейтрализация наэлектризованных тел?
5. Как формулируется закон сохранения электрического заряда?

Упражнения

1. Две гильзы, подвешенные на шелковых нитях, притянулись друг к другу и после контакта повисли вертикально. Почему они притянулись? Почему после контакта они перестали взаимодействовать?
2. Две гильзы, подвешенные на шелковых нитях, притянулись друг к другу и после контакта оттолкнулись друг от друга. Объясните это явление.

§ 1.3. ЭЛЕКТРОСКОП

I. Наличие на каком-либо теле электрического заряда можно обнаружить с помощью специального прибора (рис. 1.6), называемого *электроскопом*. (Слово «электроскоп» образовано от греческих слов *ēlektro* и *skopeō* — смотрю.)

Металлический стержень, к которому прикреплены два свободно висящих металлических листка, вставлен через пластмассовую пробку в стеклянную банку. Если коснуться заряженным телом стержня электроскопа, то листки оттолкнутся друг от друга. Значит, они зарядились одноименным зарядом. Причем, чем сильнее зарядится стержень, тем на больший угол разойдутся листки.

II. При другой конструкции прибора, называемого *электрометром*, наблюдают поворот легкой стрелки (рис. 1.7), которая, зарядившись со стержнем одноименным зарядом, отталкивается от него. И здесь угол отклонения стрелки зависит от электрического заряда.

Вопросы для самопроверки

1. Для чего применяется электроскоп? Как он устроен и каков принцип его действия?
2. Почему у заряженного электроскопа расходятся листки или отклоняется стрелка?
3. В чем различие известных вам конструкций электроскопов?

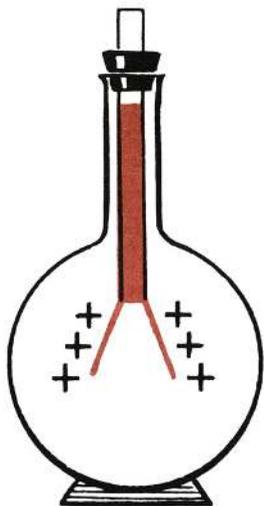


Рис. 1.6

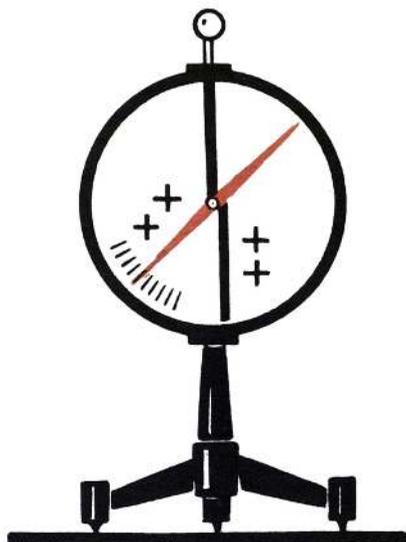


Рис. 1.7

Упражнения

1. Электроскоп зарядили отрицательным зарядом. Затем к нему поднесли другое тело и коснулись стержня. Листки электроскопа разошлись сильнее. Что можно сказать об этом теле?
2. Электроскоп заряжен отрицательным зарядом. К нему поднесли другое тело и коснулись стержня. Листки сблизились. Что можно сказать о заряде этого тела?
3. Может ли случиться, что при соприкосновении стержня электроскопа с некоторым телом листки полностью опадут? Что можно утверждать в данном случае?
4. Стержни двух заряженных электроскопов привели в соприкосновение, и их листочки частично опали; полностью опали. Объясните данные явления.

§ 1.4. ПРОВОДНИКИ И ИЗОЛЯТОРЫ

I. Берут два одинаковых электрометра и ставят их рядом. Один из них заряжают, а второй остается незаряженным. Затем приборы соединяют металлическим стержнем, как показано на рисунке 1.8. Оказывается, что отклонение стрелки первого электрометра несколько уменьшается, зато отклоняется стрелка второго электрометра. В результате стрелки обоих приборов отклоняются на один и тот же угол. Как объяснить данное явление?

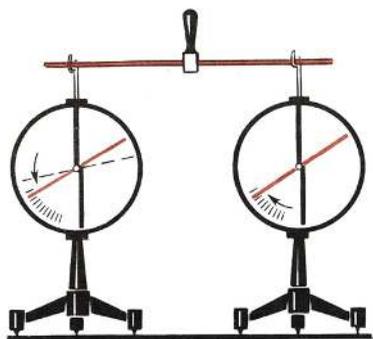


Рис. 1.8

Мы можем предположить, что металл является веществом, по которому свободно могут перемещаться электрические заряды. От заряженного электрометра по металлическому стержню половина заряда перешла к незаряженному электрометру. В результате они оба оказались одинаково заряженными и их стрелки отклонились на одинаковые углы.

II. Вещества, по которым могут перемещаться свободные электрические заряды, называются *проводниками*. К их числу относятся все металлы, растворы солей в воде, например, поваренной соли, медного купороса, кислот и щелочей, а также уголь (графит). Проводниками являются влажная земля, тело человека или животного.

В проводниках перемещаются электрически заряженные частицы. Однако в дальнейшем для простоты мы будем говорить о перемещении электрических зарядов.

Существуют еще *полупроводники*: германий, кремний, селен и др. С некоторыми их свойствами мы познакомимся позже.

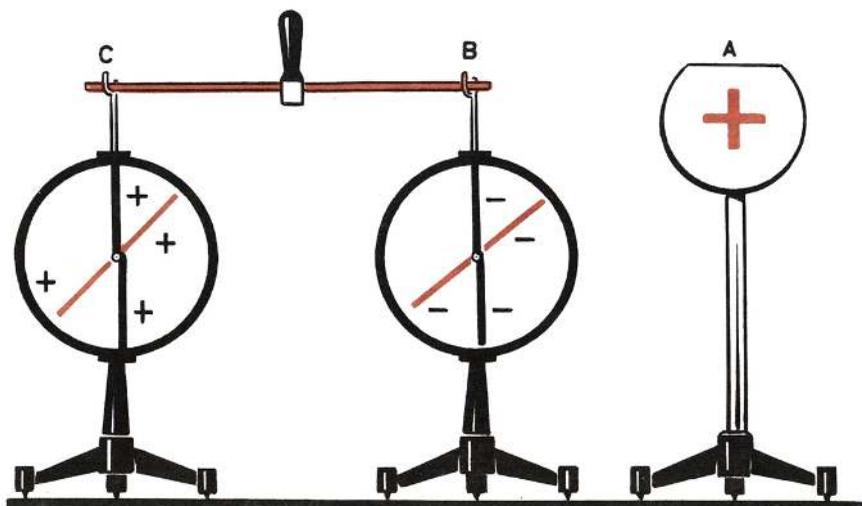


Рис. 1.9

III. Если предыдущий опыт повторить и электроскопы соединить палочками из стекла или плексигласа, то окажется, что электрическое состояние электроскопов не меняется. Мы приходим к выводу, что эти вещества не позволяют электрическим зарядам свободно перемещаться с одного места на другое.

Вещества, по которым электрические заряды не могут свободно перемещаться, называются *изоляторами* или *диэлектриками*.

Изоляторами являются стекло, фарфор, кварц, плексиглас, резина, дистиллированная вода, керосин, разные масла, а также все газы в обычном состоянии.

IV. С помощью двух электроскопов вы можете проверить закон сохранения электрического заряда. Соедините два электроскопа металлическим стержнем. Поднесите к одному из них положительно заряженное тело *A*, но не касайтесь стержня (рис. 1.9). Вы увидите, что стрелки электроскопов отклоняются на одинаковые углы. Затем снимите металлический стержень. Электроскопы останутся заряженными. Ближайший к заряженному телу *A* электроскоп *B* зарядился отрицательным зарядом, удаленный же электроскоп *C* — положительным. Это явление можно объяснить следующим образом. В проводниках имеются электрические заряды, которые под действием наэлектризованных тел легко перемещаются. Такие заряды называются *свободными*. На этой основе легко объяснить предыдущий опыт. *Свободные отрицательные заряды*, имеющиеся в металлическом проводнике, притянулись к положительно заряженному телу *A*, поэтому на электроскопе *B* возник избыточный отрицательный заряд, а на электроскопе *C* — избыточный положительный заряд, т. е. на нем оказался недостаток отрицательных зарядов.

Если убрать тело *A* и соединить электроскопы тем же металлическим стержнем, то окажется, что электроскопы разряжаются. *A* это и доказывает, что при электризации возникают равные по модулю и противоположные по знаку электрические заряды.

Вопросы для самопроверки

1. Какие вещества называются проводниками; изоляторами? Чем они отличаются друг от друга?
2. Какие проводники и изоляторы вам известны?
3. Как объяснить явление электризации электроскопов (см. рис. 1.9), если тело *A* к ним не прикоснулось?
4. Объясните, каким образом опыт с двумя электроскопами подтверждает закон сохранения электрического заряда.

Упражнения

1. Как зарядятся электроскопы *B* и *C* (см. рис. 1.9), если тело *A* несет на себе отрицательный, а не положительный заряд?
2. Если телом *A*, показанным на рисунке 1.9, коснуться стержня одного электроскопа, то и в этом случае стрелки электроскопов разойдутся и останутся отклоненными даже после удаления металлического проводника. Есть ли разница в способе электризации электроскопов? Как в этом убедиться экспериментально?
3. Что произойдет, если в эксперименте, изображенном на рисунке 1.9, использовать не проводник, а изолятор? Попробуйте сами проделать такой опыт.
4. Докажите, что на проводнике электрические заряды распределены всегда на его внешней поверхности. Продумайте (возможно, и с помощью учителя), как это проверить экспериментально. Сами проделайте этот опыт.
5. На стержни двух электроскопов наденьте одинаковые шары из набора. Как будут отличаться показания электроскопов, если последовательно прикасаться маленьким заряженным шариком к указанным шарам электроскопов? Проделайте этот опыт и объясните результат.

§ 1.5. ЗАКОН КУЛОНА

I. Опытным путем можно убедиться, что сила взаимодействия между заряженными телами зависит от степени электризации тел, их формы и расстояния между ними. Оказалось, что не существует единой простой формулы, описывающей электрическое взаимодействие для любого произвольного случая. Однако для частного случая взаимодействия точечных зарядов в вакууме Ш. Кулоном в 1785 г. такая формула была найдена.

Точечным называют заряд, распределенный на теле, размеры которого значительно меньше, чем любые расстояния между взаимодействующими телами в данной задаче.

Понятие точечного заряда является удобной абстракцией, аналогично понятию материальной точки.

II. В качестве реальной модели точечных зарядов Кулон использовал маленькие заряженные шарики. В крутильных весах (рис. 1.10) легкое стеклянное коромысло, подвешенное на упругой тонкой нити, заканчивается с одной стороны металлическим шариком, а с другой — противовесом. Кулон дотрагивался наэлектризованным шариком такого же размера до шарика на коромысле. При этом заряд перераспределялся поровну между этими шариками, и они отталкива-

лись друг от друга. Коромысло поворачивалось и закручивало нить до тех пор, пока сила упругости нити не уравновешивала силу электрического взаимодействия. Поворачивая рукоятку в верхней части прибора, к которой прикреплена нить, можно было изменить угол закручивания нити. При этом менялась сила упругости и за счет этого — расстояние между зарядами. Кулон определил: *сила электрического взаимодействия между точечными зарядами изменяется обратно пропорционально квадрату расстояния между ними.*

Наибольшая трудность эксперимента состояла в том, что у Кулона не было метода для измерения заряда на шариках. Однако здесь оказалось возможным применить следующий прием. К наэлектризованному пробному шарiku прикасались незаряженным шариком одинакового с ним размера, который потом уносили далеко от прибора. Поскольку при этом заряд распределялся поровну между обоими соприкоснувшимися телами, заряд пробного шарика уменьшался вдвое. Оказалось, что ровно во столько же раз уменьшалась и сила электрического взаимодействия. Повторяя эту операцию несколько раз, Кулон пришел к выводу: *сила электрического взаимодействия пропорциональна произведению взаимодействующих точечных зарядов.*

III. Эксперименты Кулона были не очень точны, поскольку шарики были слишком велики и сила измерялась со значительной погрешностью. Ошибка измерений составляла в общей сложности около 3%. Кроме того, опыты проводились в воздухе, что хотя и незначительно, но все же влияло на результаты эксперимента. В предположении, что точечные заряды взаимодействуют в вакууме (т. е. в безвоздушном пространстве), Кулону удалось сформулировать закон, который подтверждается всей совокупностью электрических явлений. *Сила взаимодействия между двумя неподвижными точечными электрическими зарядами пропорциональна произведению этих зарядов и обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними.*

IV. В Международной системе единиц (СИ) за единицу электрического заряда принят такой точечный заряд, который действует в вакууме на равный ему точечный заряд, расположенный на расстоянии 1 м, силой $9 \cdot 10^9$ Н. Эта единица получила название кулон (Кл) в честь Ш. Кулона.

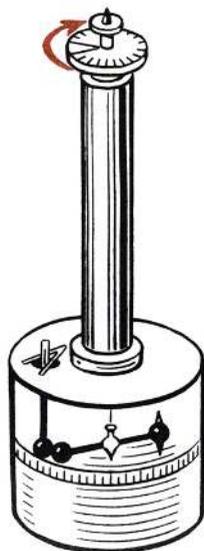


Рис. 1.10

Один кулон (1 Кл) — это очень большой заряд. В опытах по электризации тел, о которых речь шла выше, мы имели дело с зарядами в миллионы и миллиарды раз меньше, чем один кулон.

V. Если обозначить точечные заряды через q_1 и q_2 , а расстояние между ними через r , то в Международной системе единиц (СИ) сила взаимодействия будет равна:

$$F = \frac{q_1 q_2}{4\pi\epsilon_0 r^2},$$

где $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Кл²/(Н·м²) и называется *электрической постоянной*.

Вопросы для самопроверки

1. Какой заряд называется точечным? Сравните это понятие с понятием материальной точки.
2. Как Кулон менял расстояние между заряженными шариками?
3. Как Кулон менял электрический заряд на пробном шарике? Почему он был уверен, что электрический заряд меняется именно в 2 раза?
4. Как уменьшить заряд пробного шарика в 4 раза?
5. Сформулируйте закон Кулона.
6. Почему при формулировке закона Кулона следует обязательно пользоваться термином «точечный заряд»?

Упражнения

1. С какой силой будут взаимодействовать два точечных заряда по 1 Кл каждый, если их расположить в вакууме на расстоянии 1 км друг от друга?
2. С какой силой будут взаимодействовать два точечных заряда по 10^{-4} Кл каждый, если их расположить в вакууме на расстоянии 1 м друг от друга?
3. Два заряда, равные $2,3 \cdot 10^{-6}$ Кл и $3,5 \cdot 10^{-5}$ Кл, расположены в вакууме на расстоянии 1,7 см. Найдите силу взаимодействия между ними.

§ 1.6. ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ

I. По современным физическим представлениям, начало которым было положено работами М. Фарадея и Дж. Максвелла, электрическое взаимодействие осуществляется по схеме заряд — поле — заряд, т. е. *с каждым зарядом обяза-*

тельно связано электрическое поле, которое непосредственно действует с некоторой силой на все остальные заряды.

Электрическое поле материально. Оно может быть обнаружено по его воздействию на заряженные тела.

II. Наглядную картину электрического поля можно получить с помощью силовых линий. Такой способ изображения поля предложил М. Фарадей.

Силовая линия (линия поля) — это линия (прямая или кривая), касательная к которой показывает направление силы, с которой электрическое поле действует на пробный точечный положительный заряд, помещенный в данную точку поля. Если в какие-либо точки поля, образованного двумя разноименно заряженными телами (рис. 1.11), поместить точечные положительные заряды q , то электрическое поле будет действовать на эти заряды силами, направленными по касательным к силовым линиям, проходящим через эти точки поля. Силовые линии направлены от положительного к отрицательному заряду.

Необходимо подчеркнуть, что силовая линия — это объект геометрический, а не физический. Ей не следует приписывать большего смысла, чем просто наглядная картина поля. Нельзя считать, что поле состоит из силовых линий, как щетка — из волосков. Ведь через любую точку поля можно провести силовую линию и, таким образом, силовых линий можно провести бесчисленное множество.

III. Однородным называется электрическое поле, которое действует на пробный электрический заряд, помещенный в любую точку этого поля, с одинаковой силой. Такое поле изображается с помощью параллельных равноотстоящих прямых силовых линий. У неоднородного поля силовые линии обычно искривлены.

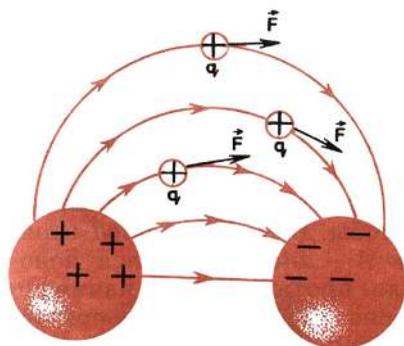


Рис. 1.11

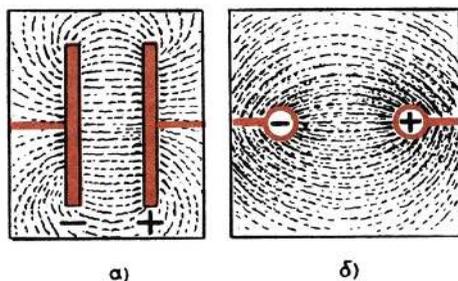


Рис. 1.12

IV. Для получения наглядных картин электрических полей используют ориентирующее действие электрического поля на частицы вещества. Из металлической фольги вырезают полоски определенной формы и наклеивают их на дно стеклянного сосуда. В сосуд наливают вязкую непроводящую жидкость (скипидар, глицерин, касторовое масло) и насыпают мелкие частицы, например стриженный волос, манную крупу и т. д. Затем полоски фольги заряжают, и вокруг них возникает электрическое поле, в котором частицы располагаются вдоль силовых линий. Картины таких полей показаны на рисунке 1.12, а, б. Как видно, между параллельными пластинами возникает практически однородное поле (рис. 1.12, а). У точечных зарядов картина поля несколько иная (рис. 1.12, б).

Вопросы для самопроверки

1. Как с помощью электрических полей можно описать взаимодействие электрических зарядов?
2. Что позволяет утверждать, что вокруг заряженного тела существует электрическое поле?
3. Как определить направление силы, действующей в электрическом поле на пробный (точечный) заряд, если известны направления силовых линий? Рассмотрите случаи для положительного пробного заряда и отрицательного.
4. Как получить наглядную картину электрического поля опытным путем?
5. Какое поле называется однородным; неоднородным?

§ 1.7. ЭЛЕКТРОН

I. В 1897 г. Дж. Томсон проделал серию опытов с так называемыми катодными лучами. Для этой цели он использовал специальные трубки, одна из которых изображена на рисунке 1.13. Это стеклянная трубка, в которую впаяны два электрода: один в виде небольшого диска K , другой в виде стерженька A . Из трубки был выкачан воздух, т. е. был создан вакуум (давление менее 1—2 Па).

Электроды этой трубки присоединяли к специальному источнику тока таким образом, чтобы диск K — *катод* заряжался отрицательно, а стерженек A — *анод* заряжался положительно. В таком случае стекло против катода начинало светиться. Такой опыт легко можно проделать в лабораторных условиях. Свечение оказывается более сильным, если стекло напротив катода покрывают слоем сернистого цинка. Предположим, из катода вылетают какие-то частицы, кото-

рые бомбардируют стекло (или сернистый цинк) и вызывают его свечение. Для большей убедительности в справедливости этой гипотезы ставят между катодом и стеклом металлический крестик и видят, что на стекле образуется четкая тень (см. рис. 1.13).

II. Далее физикам удалось обнаружить, что вылетающие из катода частицы несут на себе электрический заряд, причем отрицательный. Действительно, когда сбоку от трубки располагают отрицательно заряженную пластину, то частицы от нее отталкиваются, если же располагают положительно заряженную пластину, то частицы к ней притягиваются. Опыты также показали, что *катодные частицы*, или *катодные лучи*, можно отклонить и с помощью магнита. Катодные частицы были названы *электронами*. Термин *электрон* был принят и широко используется в современной науке. Все электроны оказались абсолютно одинаковыми.

III. По характеру отклонения катодных частиц-электронов под действием электрических сил Дж. Томсону удалось измерить их электрический заряд и массу. В то время эти величины были определены с большими погрешностями, но в настоящее время они измерены с очень большой точностью. Так, заряд электрона $q_e = -1,6021892 \cdot 10^{-19}$ Кл $\approx -1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл, масса электрона $m_e = 9,109534 \cdot 10^{-31}$ кг $\approx 9,1 \cdot 10^{-31}$ кг.

Дальнейшие исследования показали, что из всех частиц, известных нам в природе, *электрон обладает наименьшей массой*.

IV. Заряд электрона является наименьшим из электрических зарядов, которые встречаются в природе в свободном состоянии. Опыты Р. Милликена, проведенные в 1910—

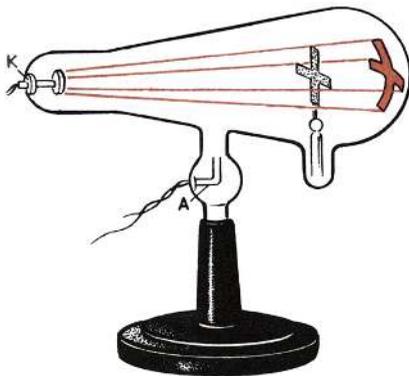


Рис. 1.13

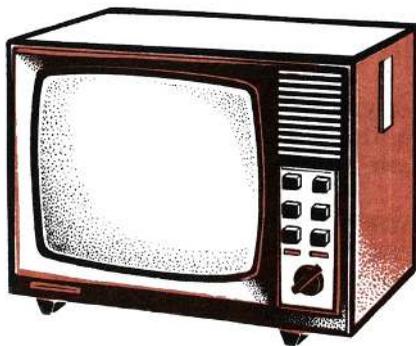


Рис. 1.14

1914 гг. в США, и опыты А. Ф. Иоффе, проведенные в России (1912—1913), показали, что модуль заряда электрона — это минимальный электрический заряд, который получен в эксперименте. Модули зарядов любых частиц или тел оказываются либо равными, либо кратными модулю заряда электрона:

$$|q| = Ne,$$

где N — целое число.

Все дальнейшее развитие физики подтвердило правильность результатов, полученных Р. Милликеном и А. Ф. Иоффе. Поэтому электрический заряд $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл называется *элементарным зарядом* (слово «элементарный» образовано от латинского слова *elementarius* — первоначальный, простейший, основной).

V. В настоящее время электронные пучки находят весьма широкое применение в технике. С помощью мощных электронных пучков можно в вакууме плавить или сваривать металлы, припаивать тончайшие проволочки, резать металлические листы и т. д.

Основной частью телевизора является кинескоп (рис. 1.14), с помощью которого получается изображение. По своей конструкции кинескоп напоминает трубку, показанную на рисунке 1.13, но значительно усовершенствованную. На экран кинескопа нанесен слой вещества, который светится при бомбардировке электронами. С помощью специальных электрических и магнитных полей, о которых речь пойдет в главе 9, в кинескопе формируется узкий электронный пучок, который быстро пробегает по экрану, вычерчивая на нем 625 строк в кадре при смене 25 кадров за секунду. Меняя скорость электронов в пучке, мы меняем яркость отдельных точек на экране, что позволяет получить на нем изображение.

Вопросы для самопроверки

1. Каким образом подтверждают гипотезу о том, что из катода вылетают частицы?
2. Как проверить, что частицы, вылетающие из катода, несут на себе электрический заряд?
3. Как определить знак электрического заряда частиц, вылетающих из катода?
4. Как называются частицы, вылетающие из катода?
5. Чему равны электрический заряд и масса такой частицы?

6. Какой электрический заряд называется элементарным?
7. Каков принцип действия кинескопа?

Упражнения

1. Можно ли в эксперименте получить электрический заряд, равный $8,0 \cdot 10^{-20}$ Кл; $2,4 \cdot 10^{-19}$ Кл; $2,4 \cdot 10^{-18}$ Кл?
2. Частица несет на себе заряд, равный $4,8 \cdot 10^{-19}$ Кл. Может ли существовать такая частица? Сколько элементарных зарядов она несет?
3. Какому количеству элементарных зарядов соответствует электрический заряд, равный 1 Кл?

ДОМАШНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ЗАДАНИЯ

1.1. Наэлектризуйте пластмассовую расческу или линейку путем трения их о волосы или сукно. Поднесите наэлектризованные тела к своему носу, но не касайтесь его. Объясните, что вы ощущаете, когда перемещаете наэлектризованные тела относительно носа.

1.2. Наэлектризуйте два надутых детских воздушных шарика трением о газету. Подвесьте их рядом на длинных шелковых нитях. Почему шары отталкиваются? Нельзя ли, проделав некоторые измерения, рассчитать, каков заряд на каждом из них?

1.3. К слабой струе воды из водопроводного крана поднесите наэлектризованную линейку (расческу). Объясните, почему струя воды притягивается к линейке.

1.4. Из литровой банки или бутылки с капроновой крышкой изготовьте электроскоп, с помощью которого изучите степень электризации окружающих предметов. (Пропустите через крышку велосипедную спицу или проволоку. На отогнутом под прямым углом конце спицы или проволоки с помощью ниток подвесьте два тонких листочка от бумажной салфетки или согнутую узкую полоску станиоля от обертки конфет или шоколада.)

1.5. Потрите газетой надутый воздухом детский воздушный шарик, поднесите его к потолку и отпустите. Шар останется висеть у потолка и может находиться в таком положении сутки. Объясните это явление.

1.6. Приготовьте маленький (диаметром до 1 см) распушенный комочек ваты. Наэлектризуйте пластмассовую линейку и поместите на нее этот комочек. Линейку резко встряхните для того, чтобы комочек ваты отстал от нее. Объясните, почему кусочек ваты парит над линейкой.

1.7. Осмотрите бензовоз или легковой автомобиль. Объясните, для какой цели к корпусу бензовоза крепится ме-

таллическая цепь, а к корпусу легкового автомобиля — металло-резиновая полоска, которые при движении автомобиля касаются поверхности Земли.

1.8. Наберите из домашнего обихода несколько мягких и жестких предметов. Попробуйте наэлектризовать их трением друг о друга. Запишите названия тех пар предметов, которые удалось наэлектризовать. Попробуйте определить знаки зарядов.

1.9. Поднесите к изготовленному вами электроскопу заряженное тело, например расческу, потертую о волосы. При этом постарайтесь не касаться стержня электроскопа. Что вы наблюдаете? Уберите расческу подальше. Что вы наблюдаете в этом случае? Объясните эти явления.

1.10. Поинтересуйтесь дома, как бороться с электризацией шелковой или нейлоновой одежды.

ГЛАВА 2. СТРОЕНИЕ ВЕЩЕСТВА

§ 2.1. ХИМИЧЕСКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ И СОЕДИНЕНИЯ

I. Вам уже известно, что все тела состоят из мельчайших частиц — атомов и молекул. Иначе говоря, вещество имеет *дискретную* структуру (слово «дискретный» образовано от латинского слова *discretus* — разделенный, прерывистый). Вам известно, что на основе теории о дискретном строении вещества можно объяснить и предсказать ряд его свойств. Однако это лишь первоначальные знания, которые нуждаются в дальнейшем уточнении и развитии. Поэтому нам еще предстоит выяснить следующие очень важные вопросы: чем отличаются молекулы от атомов? Как устроены атомы; из каких частиц они состоят? Как устроены молекулы? Как устроены газы, жидкости и твердые тела? Почему металлы являются проводниками?

Эти и аналогичные вопросы волновали человечество начиная с глубокой древности. Многие выдающиеся ученые посвятили свою деятельность поиску ответов на эти вопросы. И только в XX в. удалось создать довольно стройную теорию строения вещества и объяснить его свойства. Однако эта теория не является завершенной, многие вопросы остались еще не разрешенными и в настоящее время интенсивно исследуются.

II. Первым шагом в раскрытии тайн строения вещества стало открытие того, что все вещества можно разделить на два класса: химические элементы и химические соединения. Такое разделение впервые провел Р. Бойль (1661); он же предложил термин *элемент* (слово «элемент» образовано от латинского *elementum* — стихия, первоначальное вещество, т. е. вещество, которое не может быть разложено на другие вещества, более простые).

Оказалось, что в природе существует сравнительно небольшое число химических элементов; всего их пока известно 105 (по некоторым новейшим данным — 107). Все эти элементы располагаются обычно в таблице, названной *Периодической системой химических элементов Д. И. Менделеева* по имени ее создателя. Она будет рассмотрена в следующем параграфе.

Из химических элементов могут образовываться всевозможные химические соединения. Таким образом, все вещества, с которыми мы встречаемся в природе, либо химические элементы, либо химические соединения. И все разнообразие свойств веществ объясняется тем, из каких эле-

ментов они состоят, как эти элементы соединены между собой.

III. Разложение химического соединения на элементы иллюстрируют экспериментом, показанным на рисунке 2.1. В сосуд наливают подкисленную воду, вводят два электрода (катод *K* и анод *A*), соединенные с источником тока. Катод заряжен отрицательно, анод — положительно. На обоих электродах выделяются пузырьки газа, всплывающие вверх.

Что же это за вещества? Каковы их свойства?

В процессе опыта оказывается, что объем газа, выделяющегося на катоде, вдвое больше объема газа, выделяющегося на аноде. Плотность газа на катоде очень мала: она примерно в 14 раз меньше плотности воздуха (при одинаковом давлении и температуре). Плотности газа, выделяющегося на аноде, немного больше плотности воздуха (примерно на 11%). Газ, выделяющийся на катоде, очень хорошо горит, газ же, выделяющийся на аноде, хорошо поддерживает процесс горения. Если наполнить стакан этим газом и опустить в него раскаленную металлическую проволоку или тлеющий уголек, то они ярко вспыхивают (рис. 2.2).

Газ, выделяющийся на катоде, называется *водородом* (hydrogenium) и обозначается латинской заглавной буквой *H*. (Слово «водород» образовано от греческих слов *hydōr* — вода, влага и *genes* — рождающийся.) Газ, выделяющийся на

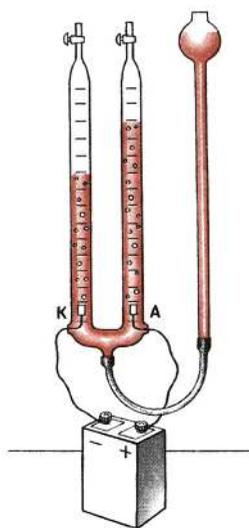


Рис. 2.1

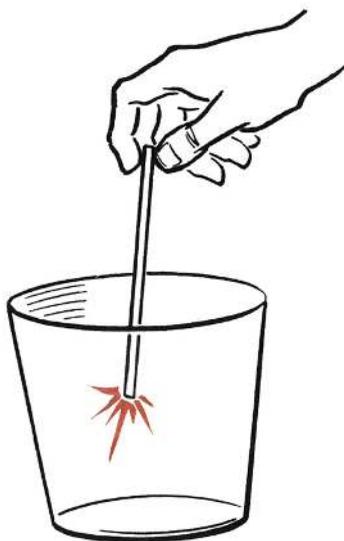


Рис. 2.2

аноде, называется *кислородом* и обозначается латинской буквой O. (Слово «кислород» образовано от греческого *оxυς* — кислый.)

Этот опыт доказывает то, что вода является сложным веществом, т. е. химическим соединением двух других веществ, на которые она разлагается при действии электричества.

IV. Опыт показывает, что если водород сжигать в кислороде, то вновь образуется только одно вещество — вода (точнее, водяной пар). С другой стороны, ни водород, ни кислород разложить на другие вещества не удастся. Отсюда следует, что *водород и кислород — химические элементы, а вода — химическое соединение. Ее обозначают формулой H₂O.*

V. Химическим элементом является также углерод, который в природе встречается в форме угля, графита и алмаза. Обозначается латинской заглавной буквой C. (Слово «углерод» образовано от латинского слова *carbōnis* — уголь.) Если сжечь углерод в кислороде, то получится газ, называемый в быту *углекислым газом*. Его научное название — *оксид углерода (IV)*; химическая формула — CO₂. Итак, углекислый газ есть химическое соединение, а углерод и кислород — элементы.

Если углерод сгорает при недостатке кислорода, то образуется угарный газ. Его научное название — *оксид углерода (II)*; химическая формула — CO. Как видно, угарный газ есть химическое соединение из тех же элементов — углерода и кислорода, но в других пропорциях. В § 2.5 мы выясним разницу в молекулярной структуре этих газов.

Вопросы для самопроверки

1. Что означает выражение «Вещество имеет дискретную структуру»?
2. На какие два класса подразделяются все вещества?
3. Что мы понимаем под термином «химический элемент»?
4. Что мы понимаем под термином «химическое соединение»?
5. В древности считали воду элементом. Как вы докажете, что это утверждение ошибочно?
6. Какие газы выделяются при разложении воды?
7. Как записать химическую формулу воды?
8. Какие вам известны химические элементы, кроме водорода и кислорода?

§ 2.2. ПЕРИОДИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ

I. Сопоставляя свойства известных в середине прошлого века химических элементов, великий русский ученый Д. И. Менделеев обнаружил, что свойства многих из них повторяются. Так, у лития Li, натрия Na, калия K, рубидия Rb и цезия Cs свойства очень близки, поэтому они составляют *группу щелочных металлов*. Бериллий Be, магний Mg, кальций Ca, стронций Sr и барий Ba образуют *группу щелочноземельных элементов*; фтор F, хлор Cl, бром Br и йод I — *группу галогенов* и т. д.

Менделеев расположил названия всех известных ему элементов в виде таблицы, в которой в один столбец он поместил элементы с близкими химическими свойствами, причем сверху — элементы с наименьшей плотностью. Оказалось, что в таблице есть пробелы. В 1869 г. Д. И. Менделеев высказал смелую гипотезу: *свойства элементов находятся в периодической зависимости от их положения в таблице, следовательно, в пустых клеточках должны находиться неизвестные в то время элементы*. Он предсказал их свойства.

Предвидение Менделеева блестяще оправдалось. Открытые через несколько лет элементы галлий Ga и германий Ge по своим свойствам точно совпали со свойствами гипотетических элементов «экаалюминий» и «экасилиций», т. е. «идущих вслед» за алюминием Al и кремнием Si. Слово «гипотетический» означает «предполагаемый». Эти элементы были неизвестны, но Менделеев высказал гипотезу (предположение), что такие элементы существуют в природе. Это был триумф научного предвидения. Затем была открыта группа инертных газов: гелий He, неон Ne, аргон Ar, криптон Kr и ксенон Xe, заполнивших восьмую группу в таблице Менделеева. Гелий был открыт сперва на Солнце (по-гречески *hēlios* — Солнце), а затем — на Земле.

II. В настоящее время, как уже говорилось, известно 105 элементов, из которых первые 92 встречаются в природе (за исключением технеция Tc), а последние 13 созданы искусственно в специальных лабораториях, работающих в России, США и некоторых других странах. Все эти элементы отлично укладываются в систему Д. И. Менделеева. На основе этой системы удалось расшифровать происхождение химических свойств элементов и связать эти свойства со строением их атомов. Один из вариантов Периодической системы химических элементов Д. И. Менделеева показан таблицей. Как видно, каждый элемент изображается определенным латинским символом и ему приписывается опреде-

ленный номер. В следующем параграфе мы выясним смысл этого номера.

III. Периодическая система Менделеева играет исключительную роль в химии. Она служит основой для определения свойств химических элементов и позволяет предсказать, какие химические соединения могут образоваться из тех или иных элементов. Все это составляет основу курса химии, к изучению которого вы приступили.

Не менее важную роль играет периодическая система элементов в атомной и молекулярной физике. Именно на базе этой системы удалось расшифровать строение атомов и молекул. С некоторыми результатами мы познакомимся в следующих параграфах данной главы.

Вопросы для самопроверки

1. В чем состоит научный подвиг Д. И. Менделеева?
2. Как была подтверждена справедливость гипотезы Д. И. Менделеева?

§ 2.3. АТОМ. ИОН

I. Все вещества, которые являются химическими элементами, построены из атомов. *Каждому химическому элементу соответствуют специфические, только ему свойственные атомы.* Различным химическим элементам соответствуют и разные атомы. *Атом — это мельчайшая частица вещества, наименьшая часть химического элемента, являющаяся носителем его химических свойств.*

В древности атом считали простейшей, не имеющей структуры частицей. (Слово «атом» образовано от греческого слова *atomos* — неделимый.) Однако в настоящее время известно, что *атом имеет довольно сложную структуру.*

II. Решающую роль в раскрытии строения атома сыграли опыты, которые провел в 1911 г. основоположник ядерной физики Э. Резерфорд. Он пропускал излучение радиоактивных элементов сквозь металлическую фольгу. По характеру рассеяния альфа-частиц (о них будет сказано позднее) Резерфорд установил, что атом в основном пуст: в центре его находится очень маленькое и очень плотное положительно заряженное ядро, а снаружи — электроны.

Оказалось, что по сравнению с размером самого атома (около 10^{-10} м) ядро крайне мало (около 10^{-14} м), т. е. ядро меньше атома в 10 тыс. раз. Чтобы представить себе, что это означает, рассмотрим такую наглядную модель. Представим себе, что ядро атома имеет вид шарика диаметром 1 мм (это примерно размер булавочной головки). Тогда атом

ПЕРИОДИЧЕСКАЯ СИСТЕМА

Д. И. МЕНДЕЛЕЕВА



МЕНДЕЛЕЕВ Д.И.
1834 — 1907гг.

1 H водород	II							
3 Li литий	4 Be бериллий							
11 Na натрий	12 Mg магний							
19 K калий	20 Ca кальций	21 Sc скандий	22 Ti титан	23 V ванадий	24 Cr хром	25 Mn марганец	26 Fe железо	27 Co кобальт
37 Rb рубидий	38 Sr стронций	39 Y иттрий	40 Zr цирконий	41 Nb ниобий	42 Mo молибден	43 Tc технеций	44 Ru рутений	45 Rh родий
55 Cs цезий	56 Ba барий	57 La лантан	72 Hf гафний	73 Ta тантал	74 W вольфрам	75 Re рений	76 Os осмий	77 Ir иридий
87 Fr франций	88 Ra радий	89 Ac актиний	104 Ku курчатовий	105 Ns нильсборий				
ЛАНТАНОИДЫ		58 Ce церий	59 Pr празеодим	60 Nd неодим	61 Pm прометий	62 Sm самарий	63 Eu европий	64 Gd гадолиний
АКТИНОИДЫ		90 Th торий	91 Pa протактиний	92 U уран	93 Np нептуний	94 Pu плутоний	95 Am амерций	96 Cm кюрий

ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ

III IV V VI VII VIII

								2 He гелий
			5 B бор	6 C углерод	7 N азот	8 O кислород	9 F фтор	10 Ne неон
			13 Al алюминий	14 Si кремний	15 P фосфор	16 S сера	17 Cl хлор	18 Ar аргон
28 Ni никель	29 Cu медь	30 Zn цинк	31 Ga галлий	32 Ge германий	33 As мышьяк	34 Se селен	35 Br бром	36 Kr криптон
46 Pd палладий	47 Ag серебро	48 Cd кадмий	49 In индий	50 Sn олово	51 Sb сурьма	52 Te теллур	53 I иод	54 Xe ксенон
78 Pt платина	79 Au золото	80 Hg ртуть	81 Tl таллий	82 Pb свинец	83 Bi висмут	84 Po полоний	85 At астат	86 Rn радон
65 Tb тербий	66 Dy диспрозий	67 Ho гольмий	68 Er эрбий	69 Tm тулий	70 Yb иттербий	71 Lu лютеций		
97 Bk берклий	98 Cf калifornий	99 Es эйштейний	100 Fm фермий	101 Md менделеевий	102 No нобелий	103 Lr лоуренсий		

следует представить в виде шара диаметром 10^4 мм = 10 м, т. е. диаметр шара равен высоте трехэтажного здания.

Итак, моделью атома может служить пустая сфера, диаметр которой равен высоте трехэтажного здания. В центре сферы расположено массивное ядро размером с булавочную головку.

III. Масса ядра значительно больше массы электрона. Даже в самом легком атоме — атоме водорода — его ядро в 1836 раз массивнее электрона. У всех других атомов отношение массы ядра к массе электрона еще больше. А это значит, что *масса любого атома практически равна массе его ядра*, т. е. массой электронов можно пренебрегать.

Подробнее вопрос о массе атомов будет рассмотрен в курсе химии.

IV. Что касается заряда атома, то можно утверждать, что *атом в целом нейтрален*. Однако его оболочка, состоящая из электронов, имеет отрицательный электрический заряд. Следовательно, его ядро заряжено положительно.

Из опытов Э. Резерфорда, а также его сотрудника Г. Мозли в 1913 г. выяснилось, что *заряд ядра равен произведению элементарного заряда e на порядковый номер элемента Z* в Периодической системе Менделеева:

$$q_{\text{ядра}} = Ze.$$

Но так как атом нейтрален, а заряд электрона $q_e = -e$, то это означает, что электронная оболочка атома содержит Z электронов. Таким образом, *порядковый номер Z элемента* приобретает физический смысл: он показывает, во сколько раз заряд ядра больше элементарного заряда.

V. *Атом, потерявший электрон или несколько электронов, называется положительным ионом*. Положительно заряженные ионы называют также *катионами*, ибо они *притягиваются к отрицательно заряженному электроду — катоду*.

Катионы обозначаются химическим знаком элемента и значком «+» с числом, показывающим, сколько электронов потерял атом, например K^+ , Zn^{2+} и т. д.

Соответственно *атом, присоединивший к себе один или несколько электронов, называется отрицательным ионом или анионом*. Такие ионы *притягиваются к положительно заряженному электроду — аноду*. Обозначаются Cl^- , S^{2-} и т. д.

Вопросы для самопроверки

1. Что называется атомом?
2. Сколько всего различных атомов известно в настоящее время?
3. Каково строение атома?
4. Чему равен электрический заряд ядра атома?
5. Сколько электронов содержит электронная оболочка атома?
6. Какой смысл имеет порядковый номер химического элемента?
7. Что такое ион; катион; анион?

Упражнения

1. Сколько электронов содержит атом водорода; гелия; урана?
2. Выразите в СИ заряд ядра атома водорода; гелия; урана.
3. Радиус атома водорода в нормальном состоянии равен $5,3 \cdot 10^{-11}$ м. Найдите силу взаимодействия между электроном и ядром в атоме водорода.
4. Сколько электронов находится на оболочке иона Li^+ ; Be^+ ; Be^{2+} ; S^{2-} ?

§ 2.4. СТРОЕНИЕ ЭЛЕКТРОННЫХ ОБОЛОЧЕК АТОМА

И. Исследования Н. Бора — основоположника современной атомной физики, а также ряда других ученых позволили сделать вывод: электроны в атомах располагаются определенными слоями — *оболочками*. Они обозначаются в порядке латинского алфавита. Первая из оболочек, самая близкая к ядру, обозначается буквой *K*, вторая — *L*, третья — *M*, четвертая — *N*, пятая — *O*, шестая — *P*, седьмая — *Q*. На первой оболочке располагается не более двух электронов, на второй — не более восьми, на третьей — не более 18, на четвертой — не более 32. Заполнение более далеких оболочек мы рассматривать не будем.

Электроны заполняют сначала первую оболочку, затем вторую, третью и т. д. Но из этого правила есть ряд исключений. Мы не будем рассматривать строение электронных оболочек всех атомов. С этим вопросом вы познакомитесь более детально в курсе химии¹. Рассмотрим лишь строение

¹ Выяснение причин, по которым электронные оболочки атомов имеют определенную структуру, оказалось очень сложной задачей, которую удалось решить лишь в 30-е годы XX в., после создания квантовой механики. Однако изложение принципов этой физической теории выходит за рамки возможностей данной книги.

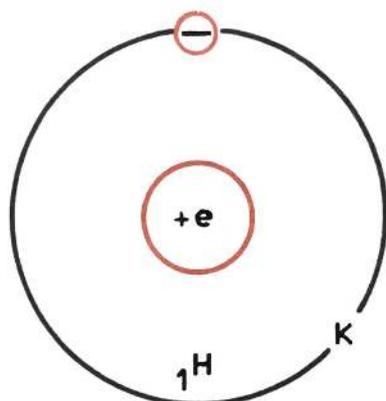


Рис. 2.3

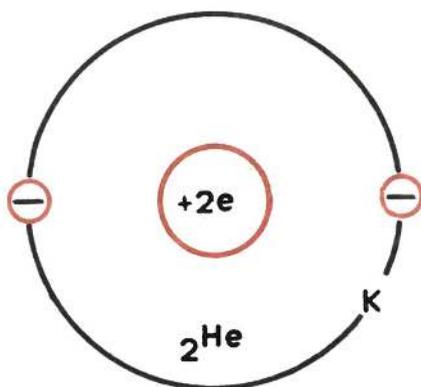


Рис. 2.4

атомов некоторых элементов в первых трех периодах этой системы.

II. Атом водорода состоит из ядра, несущего один элементарный заряд, — это ядро называется *протон* (рис. 2.3). Оболочка атома водорода содержит один электрон, и в состоянии, когда атом обладает минимальной энергией, этот электрон располагается на слое *K*, т. е. в первом слое. Если энергия атома возрастает, то электрон переходит на другую оболочку.

Два электрона атома гелия тоже располагаются на первой оболочке, которая оказывается *заполненной* (рис. 2.4), т. е. *больше двух электронов на этой оболочке быть не может*. Заметим, что масштабы на этом и последующих рисунках не соблюдены.

III. Атом лития содержит всего три электрона, из которых два располагаются на *K*-слое, а третий переходит на *L*-слой (рис. 2.5,а). Этот электрон слабо связан с ядром. В-первых, его расстояние от ядра больше, чем у первых двух электронов, а ведь вы уже знаете, что кулоновская сила об-

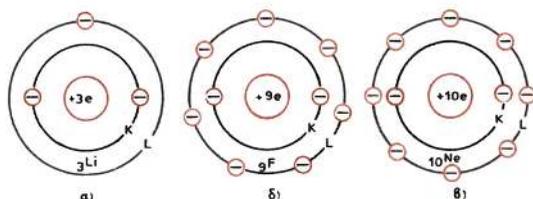


Рис. 2.5

ратно пропорциональна квадрату расстояния между зарядами. Во-вторых, этот электрон еще и отталкивается от ядра двумя электронами, расположенными на *K*-слое. Электроны, расположенные на внешнем слое, называются *валентными*.

Оказывается, что именно этот валентный электрон принимает участие в химических реакциях, два других электрона из *K*-слоя химически неактивны, поэтому литий является первым представителем группы весьма химически активных щелочных металлов.

Аналогично распределяются по слоям электроны в атомах других элементов второго периода: на *K*-слое у каждого элемента этого периода располагаются 2 электрона, на *L*-слое соответственно у бериллия — 2 электрона, 3 электрона — у бора, 4 — у углерода, 5 — у азота, 6 — у кислорода, 7 — у фтора и 8 — у неона. Схемы распределения электронов у фтора и неона показаны на рисунках 2.5,б и 2.5,в.

На этом заканчивается второй период, ибо на *L*-слое не может располагаться более 8 электронов.

Слой *K*, где находятся 2 электрона (или слой *L*, где находятся 8 электронов) называется *завершенным*, ибо у нейтральных атомов на этих слоях не может размещаться большее число электронов.

IV. С натрия начинается третий период. В самом деле, у атома натрия 11 электронов, из которых 2 располагаются

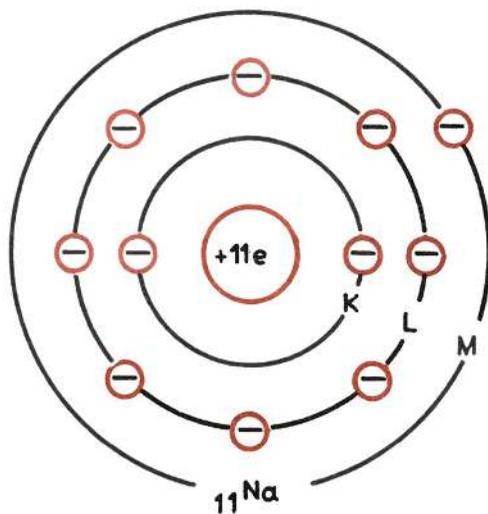


Рис. 2.6

на *K*-слое, 8 — на *L*-слое, а одиннадцатый вынужден перейти на третий, т. е. *M*-слой (рис. 2.6). Легко сообразить, что этот электрон еще слабее связан с ядром, чем внешний электрон лития. Следовательно, химические свойства натрия должны быть аналогичны свойствам лития, но должны проявляться более активно. Это и подтверждается в эксперименте.

Аналогично можно выяснить распределение электронов по слоям у элементов третьего периода и объяснить, почему свойства кремния аналогичны свойствам углерода, хлора — свойствам фтора, аргона — свойствам неона и т. д.

Сложнее обстоит дело с заполнением слоев электронами в следующих периодах, но эти вопросы рассматриваются в курсе химии, и мы на них останавливаться не будем.

Вопросы для самопроверки

1. Сколько максимально электронов могут расположиться на первой оболочке; на второй?
2. Как располагаются электроны на оболочках у лития; фтора; неона; натрия?
3. Почему химические свойства натрия и лития аналогичны? Почему аналогичны свойства неона и гелия?
4. Какие электроны называются валентными?

Упражнения

1. Нарисуйте схему распределения электронов по слоям у всех атомов второго и третьего периода Периодической системы элементов Д. И. Менделеева.
2. Нарисуйте схему распределения электронов по слоям у атома магния. Каким элементам аналогичны химические свойства магния?
3. Нарисуйте схему распределения электронов по слоям у атома кремния. Каким элементам аналогичны химические свойства кремния?
4. Нарисуйте схему распределения электронов по слоям у атома брома. Почему фтор, хлор, бром и иод относятся к одной группе элементов, называемых галогенами?

§ 2.5. МОЛЕКУЛА. ХИМИЧЕСКАЯ СВЯЗЬ

1. Молекулой называется наименьшая частица вещества, обладающая его основными химическими свойствами и состоящая из двух или нескольких атомов. Очевидно, что молекула является мельчайшей частицей сложного веще-

ства — химического соединения. Например, вода, углекислый газ, угарный газ, все органические вещества — белки, жиры, углеводы, хлорофилл, стеарин, парафин, все пластмассы состоят из молекул.

Простые вещества состоят либо из атомов (химические элементы), либо из молекул, составленных из одинаковых атомов. Так, водород, кислород, азот, фтор и другие газы состоят из молекул, каждая из которых состоит из двух атомов. Эти молекулы обозначаются H_2 , O_2 , N_2 , F_2 и т. д. *Простым веществом* является и озон O_3 , молекула которого состоит из трех атомов кислорода.

II. Атомы в молекуле удерживаются за счет *ковалентной химической связи*. Рассмотрим эту связь на примере молекулы водорода.

Как уже говорилось, у атома водорода всего один электрон. Оказывается, при контакте двух атомов водорода их электроны *коллективизируются*, т. е. оба электрона располагаются на одном слое, который оказывается общим для обоих атомов. Такие электроны называют *спаренными*. Этот общий электронный слой, отрицательный заряд которого в основном находится между ядрами, объединяет и связывает оба протона — ядра атомов водорода. Образуется молекула H_2 (рис. 2.7).

Таким образом, *ковалентная связь возникает за счет того, что пара валентных электронов двух (или нескольких) атомов объединяется на одном незаполненном электронном слое*, т. е. электроны спариваются.

III. Аналогично образуются молекулы других веществ. Так, у атома кислорода на *L*-слое расположено 6 электронов и для заполнения слоя не хватает двух. Недостающие два электрона заимствуются от двух атомов

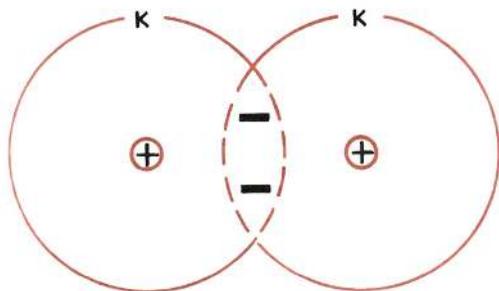


Рис. 2.7

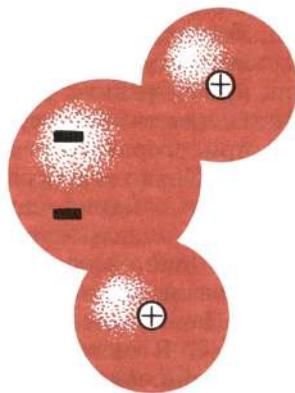


Рис. 2.8

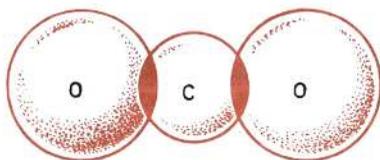


Рис. 2.9

водорода путем спаривания каждого из них. Образуется молекула воды H_2O (рис. 2.8), у которой ковалентные связи образуют угол $104^\circ 40'$.

Электроны расположены ближе к ядру кислорода и дальше от ядер водорода (протонов). Поэтому у молекулы воды образуются два полюса: отрицательный вблизи атома кислорода и положительный вблизи атомов водорода. Такая система с положительным и отрицательным полюсами называется *диполь*. (Слово «диполь» образовано от греческого слова *di* — дважды + полюс.)

IV. За счет ковалентных связей образуется и молекула углекислого газа CO_2 — оксида углерода (IV). У атома углерода на *L*-слое находится 4 электрона, у атома кислорода — 6. Следовательно, при объединении одного атома углерода с двумя атомами кислорода происходит коллективизация их электронов на *L*-слое: два электрона из *L*-слоя углерода спариваются с двумя электронами из шестерки *L*-слоя одного атома кислорода, два других — с соответствующими электронами второго атома кислорода. Образуется линейная молекула CO_2 в виде гантели (рис. 2.9), не обладающая свойствами диполя.

Аналогично образуется молекула угарного газа CO . Только здесь в образовании ковалентной связи участвуют лишь два электрона из четырех валентных электронов атома углерода. Поэтому молекула угарного газа может присоединить к себе еще один атом кислорода и превратиться в молекулу углекислого газа. Это и происходит при сгорании угарного газа.

V. Хотя молекула содержит положительно заряженные частицы — ядра атомов и отрицательно заряженные частицы — электроны, *в целом молекула нейтральна*. Однако за счет некоторых процессов, например сильных соударений, облучения рентгеновским излучением или химических реакций, молекулы могут терять электроны или приобретать лишние. В связи с этим уточним определение иона, которое было дано выше.

Ионом называется атом или молекула, потерявшая или присоединившая к себе лишние электроны.

Вопросы для самопроверки

1. Что называется молекулой?
2. Какие вы знаете вещества, состоящие из молекул?
3. Все ли вещества состоят из молекул? Приведите примеры.
4. За счет чего атомы удерживаются в молекуле?
5. Как образуется ковалентная связь? Рассмотрите это на конкретном примере.

§ 2.6. ГАЗ. ПЛАЗМА

I. Вещество может находиться в трех агрегатных состояниях — твердом, жидком, газообразном. Оказывается, что то или иное агрегатное состояние определяется условиями, в которых находится вещество: температурой и внешним давлением. Если же от этих параметров перейти к анализу структуры вещества, то окажется, что агрегатное состояние зависит от характера движения и взаимодействия частиц, из которых состоит вещество.

Рассмотрим строение вещества в разных агрегатных состояниях.

II. С газообразным состоянием вещества мы встречаемся повседневно. Воздух, которым мы дышим, — это газ, представляющий собой смесь газообразного азота N_2 , кислорода O_2 , оксида углерода (IV) CO_2 , аргона Ar , а также следов других инертных газов и озона. Газом являются пары воды и некоторых других легкоиспаряющихся веществ — нафталина, ртути, одеколona и т. д.

Какова же структура газа? Это мы выясним, проанализировав его свойства.

III. *Газы легко сжимаются*, в чем можно убедиться, нажав на рукоятку поршня, плотно прилегающего к стенкам цилиндра, в котором находится газ. Если же перестать давить на поршень, то газ расширится и займет прежний объем.

Газ занимает весь объем, который ему предоставляется. В этом убеждаются с помощью эксперимента. Ненадутый воздушный шарик с хорошо завязанной горловиной помещают под колокол воздушного насоса (рис. 2.10). При выкачивании воздуха из-под колокола шарик раздувается и может занять весь свободный объем под колоколом. Исключение составляют космические газовые скопления — Солнце, звезды, где плазма удерживается силами тяготения.

Плотность газа при обычных условиях в тысячи раз меньше плотности жидкости или твердого тела из того

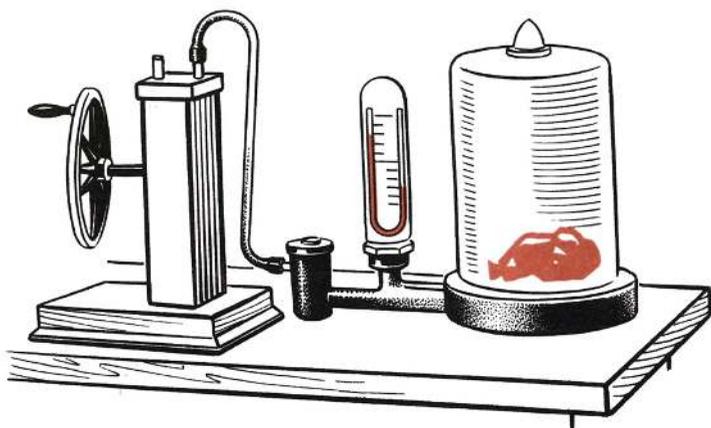


Рис. 2.10

же вещества. Так, при температуре 0°C и нормальном атмосферном давлении плотность воды равна $999,8 \text{ кг/м}^3$, льда — $916,8 \text{ кг/м}^3$, а водяного пара — $0,8 \text{ кг/м}^3$, т. е. плотность пара меньше плотности воды более чем в 1200 раз.

Все это позволяет высказать предположение, что частицы вещества, из которых состоят газы (атомы или молекулы), находятся друг от друга на больших расстояниях. Эти расстояния в десятки раз больше, чем расстояния между этими же частицами у тел, находящихся в жидких или твердых состояниях. А так как у газов расстояния между частицами значительные, то взаимодействием между частицами вещества можно пренебречь. И только при очень больших давлениях, в сотни раз больших нормального атмосферного, начинают проявляться силы взаимодействия между частицами, из которых состоят газы.

Большинство газов состоит из молекул. Только инертные газы и пары металлов состоят из атомов. Поэтому нередко при описании структуры газов говорят, что они состоят из молекул. Большой ошибки здесь нет, если помнить об особенностях инертных газов и паров металлов.

IV. При некоторых видах излучения (космического, рентгеновского, гамма-излучения радиоактивных веществ), а также при очень высоких температурах происходит ионизация газа: часть молекул или атомов теряет свои электроны и становится положительно заряженными ионами. Возможны случаи, когда газ полностью ионизируется.

Частично (или полностью) ионизированный газ называется плазмой. Таким образом, плазма представляет собой

смесь ионов, свободных электронов и нейтральных частиц (атомов или молекул). Поскольку суммарный заряд положительных ионов равен по модулю суммарному заряду свободных электронов, то в целом плазма электрически нейтральна. Однако если плазму поместить в электрическое поле, то возникнет встречное движение положительных ионов к катоду, а отрицательно заряженных свободных электронов — к аноду.

Плазмой является газ в лампах дневного света, неоновых трубках, используемых для рекламы, ртутных и натриевых лампах, используемых в медицине и для освещения улиц. Гигантскими скоплениями плазмы являются звезды, в том числе и Солнце. Вообще, за исключением планет, их спутников и метеоритов, фактически все вещество во Вселенной находится в плазменном состоянии.

Вопросы для самопроверки

1. В каких агрегатных состояниях может находиться вещество? Приведите примеры.
2. Какие опыты свидетельствуют о сжимаемости газов? Какой вывод следует отсюда о структуре газа?
3. Как доказать, что газ занимает любой предоставленный ему объем?
4. Из каких частиц состоят газы?
5. Что можно сказать о расстояниях между частицами газа?
6. Какие факторы вызывают ионизацию газа? Что происходит с молекулами и атомами при ионизации?
7. Что такое плазма? Приведите примеры плазменного состояния вещества.

§ 2.7. КРИСТАЛЛ

I. В отличие от газов, где частицы располагаются на значительных расстояниях друг от друга, в твердых телах и жидкостях мы встречаемся со сравнительно плотной упаковкой частиц. Это следует из того, что плотности твердых тел весьма мало отличаются от плотностей соответствующих им жидкостей — всего на несколько процентов, в то же время они больше плотностей газов в тысячи раз.

В § 2.6 мы привели соответствующие данные для льда, воды и водяного пара. Аналогично плотность ртути в твердом состоянии равна $1,42 \cdot 10^4$ кг/м³, плотность жидкой ртути $1,36 \cdot 10^4$ кг/м³, а паров ртути при температуре 20 °С и нормальном атмосферном давлении — 8,3 кг/м³. Такие же значения по порядку величины характерны и для других веществ.

II. Опыты показывают, что необходимы очень большие силы для небольшого изменения размеров (объемов) твердых тел или жидкостей. Так, к воде нужно приложить давление в 200 раз больше атмосферного, к ртути — в 2500 раз, к железу — в 16 000 раз. И это лишь для того, чтобы изменить их объем всего на 1%. А это значит, что между частицами вещества в твердом или жидком состоянии действуют очень большие силы.

Оказывается, если мы пытаемся сжать твердое тело или жидкость, т. е. сблизить между собой частицы данного вещества, то между ними возникают силы отталкивания. Если же мы пытаемся увеличить объем тела, т. е. удалить частицы вещества друг от друга, то между ними возникают силы притяжения. Происхождение этих сил мы выясним в следующем параграфе.

III. Давно было замечено, что некоторые твердые тела встречаются в природе в виде кристаллов — тел, грани которых представляют собой правильные многоугольники. Форма возникающих многогранников зависит от условий образования кристалла, но самым характерным свойством кристалла является постоянство углов между его ребрами и соответственно между гранями.

Так, кристалл поваренной соли может иметь форму куба, параллелепипеда или призмы, а также тела неправильной конфигурации (рис. 2.11). Но всегда в его вершине встречаются три ребра, образующие между собой прямые углы.

Большой одиночный кристалл, имеющий более или менее правильную форму, называют монокристаллом (слово «монокристалл» образовано от греческого слова *monos* —

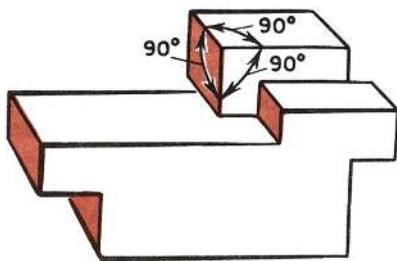


Рис. 2.11

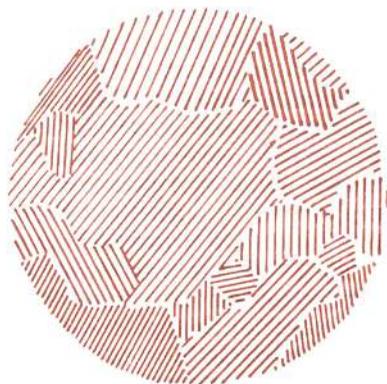


Рис. 2.12

един). *Характерной особенностью монокристалла является его анизотропия, т. е. зависимость его физических свойств от направления в кристалле.*

Анизотропия механических свойств монокристалла скажется прежде всего в том, что его прочность в разных направлениях различна. Если, например, ударом разбить монокристалл, то он расколется на куски, грани которых образуют углы, характерные для данного вещества. А это и означает, что прочность монокристалла минимальна вдоль некоторых характерных для данного вещества плоскостей. В других же направлениях прочность монокристалла значительно больше.

IV. При определенных условиях из расплавов металлов можно получить монокристаллы. Крупные монокристаллы сейчас выращивают в состоянии невесомости в космических кораблях. Если же просто охладить, скажем, расплавленное железо, то полученное твердое тело анизотропией обладать не будет. Причину этого помогает понять изучение структуры металла. При шлифовке поверхности железа и обработке ее кислотой можно увидеть под микроскопом, что оно состоит из отдельных зерен микроскопических размеров (рис. 2.12). Каждое такое зерно — это кристалл, который принял неправильную форму потому, что его росту помешали соседние кристаллики. Возникшая зернистая структура называется *поликристаллической*. (Приставка «поли» образована от греческого слова *poly* — много.)

Поскольку все эти зерна ориентированы совершенно беспорядочно, то их анизотропия проявиться не может. Вследствие этого поликристалл *изотропен*, т. е. *его свойства в среднем по всем направлениям одинаковы*.

Огромное большинство твердых тел, встречающихся в природе: камни, песок, металлы, соли и др., имеют поликристаллическую структуру. Возникновение крупных монокристаллов представляет собой исключительное явление, осуществляющееся при особо благоприятных условиях. Вместе с тем в природе встречаются *твердые тела* типа стекла, которые не имеют зернистой структуры. Они называются *аморфными*. Строение и свойства этих тел будут рассмотрены в § 2.9.

V. Еще в XVIII в. на основе изучения свойств твердых тел было выдвинуто предположение, что кристалл состоит из микроскопических ячеек правильной геометрической формы. Но лишь в 1912 г. эта гипотеза была подтверждена М. Лауэ при изучении рассеяния рентгеновского излучения в кристаллах. По специальным фотографиям удалось обнаружить эти элементарные ячейки и определить их форму и размеры у разных кристаллов.

Оказалось, что частицы, из которых состоит кристалл:

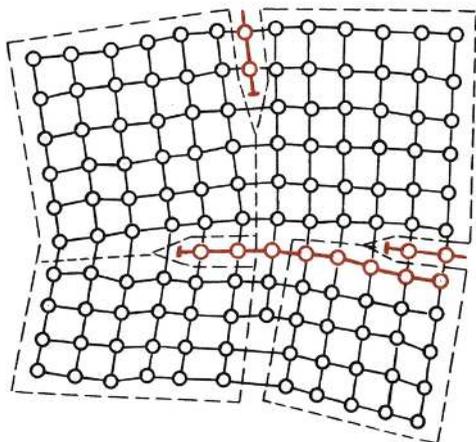


Рис. 2.13

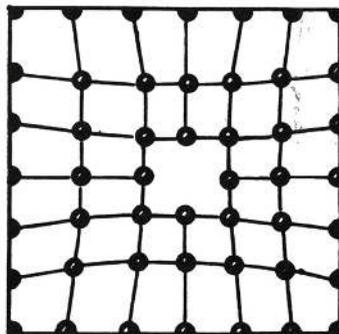


Рис. 2.14

молекулы, атомы или ионы, образуют в пространстве правильную кристаллическую решетку, состоящую из отдельных ячеек. Периоды повторяемости ячеек очень невелики и равны нескольким межатомным расстояниям. Регулярное же расположение элементов кристаллической решетки повторяется в пределах от сотен до десятков тысяч слоев. На этом основании говорят, что в кристалле наблюдается *дальний порядок* в упаковке частиц, из которых он построен.

VI. В реальных кристаллах в процессе кристаллизации *возникают* разного рода *дефекты* — *нарушения дальнего порядка*. Очень часто образуются *лишние полу-*

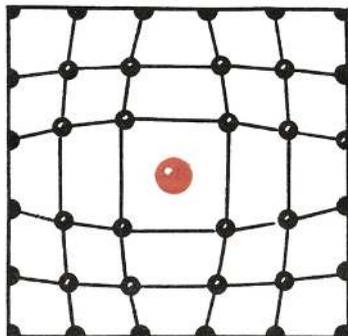


Рис. 2.15

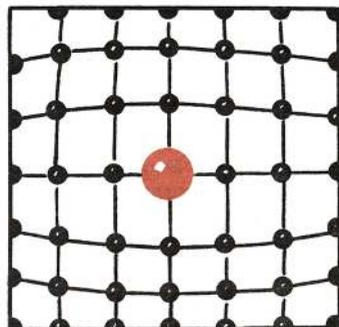


Рис. 2.16

плоскости, которые разбивают кристалл на отдельные блоки (рис. 2.13).

Внутри блоков также образуются дефекты. На рисунке 2.14 изображен *дефект типа вакансии*, когда частица не занимает положенное ей место в кристаллической решетке. Возможны также *дефекты типа внедрения* чужеродного атома в решетку (рис. 2.15) или *замещения* чужеродным атомом частицы, из которой строится кристалл (рис. 2.16). Такого рода *нарушения порядка*, отличные от лишних полуплоскостей, называют *точечными дефектами*.

Наличие дефектов в кристаллической решетке резко уменьшает прочность кристаллов, а также сильно влияет на их электрические, магнитные и тепловые свойства.

Вопросы для самопроверки

1. Как отличаются плотности твердых тел, жидкостей и газов? Какие выводы отсюда следуют?
2. В чем различие сжимаемости газов, жидкостей и твердых тел? Какие выводы отсюда следуют?
3. Как меняются силы взаимодействия между частицами вещества при изменении расстояния между ними?
4. Какие твердые тела называются кристаллами?
5. В чем заключается самое характерное свойство кристаллов?
6. Чем отличаются монокристаллы от поликристаллов?
7. Говорят, что частицы, из которых состоит кристалл, образуют кристаллическую решетку. Что это значит?
8. Что означает понятие «дальний порядок»?
9. Реальные кристаллы имеют блочную структуру. Что это значит?
10. Какие дефекты кристаллической решетки вам известны?

Упражнения

1. Во сколько раз плотность паров ртути меньше плотности жидкой ртути?
2. Оцените, во сколько раз расстояние между молекулами воды меньше расстояния между молекулами водяного пара (см. § 2.6).
3. Сделайте такую же оценку для расстояний между атомами ртути в жидком и газообразном состоянии.

§ 2.8. ТИПЫ КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ СВЯЗЕЙ

I. В природе встречаются кристаллы различной структуры. Некоторые из них *состоят из нейтральных атомов* — это *атомные* (ковалентные) *кристаллы*, другие со-

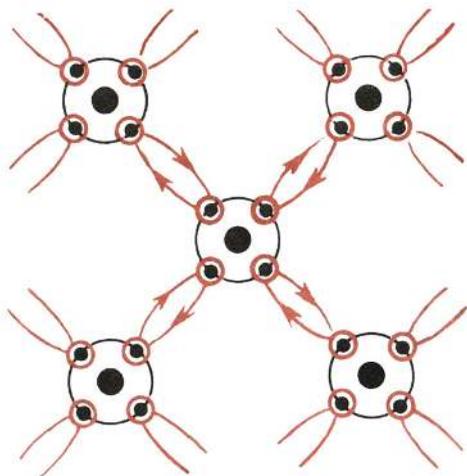


Рис. 2.17

стоят из разноименно заряженных ионов — это ионные кристаллы. Металлические кристаллы построены из положительно заряженных ионов и свободных электронов, а молекулярные кристаллы состоят из молекул. Различие в структуре определяет различие свойств кристаллов.

Рассмотрим структуру указанных кристаллов, а также некоторые их свойства.

II. Атомные (ковалентные) кристаллы образуются путем плотной упаковки атомов. Рассмотрим упаковку одинаковых атомов. Естественно, что при этом ионы не образуются, но возникают ковалентные связи путем спаривания валентных электронов. Такие связи характерны для элементов IV группы Периодической системы химических элементов Д. И. Менделеева: углерода, кремния, германия и др.

На рисунке 2.17 изображена плоская модель связей в кристалле германия. На внешней оболочке атома этого вещества находится 4 электрона, а для заполнения необходимо 8. Поэтому атом взаимодействует с четырьмя соседними; при этом пара валентных электронов одновременно принадлежит двум соседним атомам. Заметим, что в этом типе кристаллов нет отдельных молекул, весь кристалл — гигантская молекула.

III. Ионные кристаллы образуются путем плотной упаковки ионов, заряженных разноименно. К числу ионных кристаллов относится большинство неорганических соединений, например соли. В качестве примера рассмотрим строе-

ние кристалла поваренной соли — хлорида натрия NaCl . Известно, что атом натрия легко отдает свой валентный электрон, а атом хлора его принимает. Образуются два иона: положительный Na^+ и отрицательный Cl^- (рис. 2.18).

У обоих ионов внешняя электронная оболочка оказывается заполненной, ибо она содержит по 8 электронов. Электроны располагаются сферически, симметрично относительно ядер, так что оба иона можно считать шариками, но с разными радиусами: ион хлора больше иона натрия почти в 2 раза (точнее, в 1,85 раза).

Между разноименно заряженными ионами действуют кулоновские силы притяжения, удерживающие их в узлах кубической кристаллической решетки. Элементарная ячейка этой решетки показана на рисунке 2.18. Каждый ион натрия окружен шестью ионами хлора, и, наоборот, каждый ион хлора окружен шестью ионами натрия. В кристалле нет молекул NaCl .

Аналогично образуется ионная химическая связь и в других случаях, чаще всего между металлами и галогенами — фтором и хлором.

IV. *Металлические кристаллы* образуются следующим образом. При кристаллизации атомы сближаются, валентные электроны отделяются от атомов и коллективизируются — они уже принадлежат не отдельным атомам, а кристаллической решетке в целом. Совокупность этих свободных электронов образует *электронный газ*.

Кристаллическая решетка состоит из плотно упакованных положительно заряженных ионов, которые удерживаются в узлах решетки за счет взаимодействия с отрица-

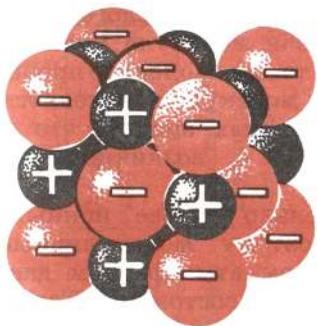


Рис. 2.18



Рис. 2.19

тельно заряженным электронным газом. Наличие свободных электронов и служит причиной того, что металлы — хорошие проводники электричества.

Все три вида рассмотренных выше химических связей — ионная, ковалентная и металлическая — обеспечивают значительную механическую прочность соответствующих кристаллов, их малую сжимаемость. Все они имеют электрическое происхождение, ибо связаны с перераспределением электронов между атомами.

V. Молекулярные кристаллы. Существует широкий класс кристаллов, состоящих из молекул. Типичными примерами являются лед, иод, бром, твердая углекислота (сухой лед), нафталин и т. п. В узлах кристаллической решетки здесь располагаются молекулы.

Примером может служить модель кристалла льда, изображенная на рисунке 2.19. Здесь атомы кислорода условно изображены в виде светлых шариков, атомы водорода — в виде темных шариков. Каждый атом кислорода окружен четырьмя атомами водорода, атом водорода служит связующим звеном между двумя соседними атомами кислорода. Формула для молекулы воды H_2O , конечно, сохраняется, но выделить в кристалле отдельную молекулу невозможно.

VI. Как известно, молекулы электрически нейтральны. Какие же силы обеспечивают молекулярную связь? Оказывается, что это тоже электрические силы. Здесь возможны два случая.

У некоторых веществ, например у воды, молекула имеет вид диполя. Электроны в молекуле воды смещены в сторону кислорода, здесь образуется отрицательный полюс, а два протона (ядра водорода) образуют положительный полюс (см. рис. 2.8). Молекулярная связь возникает за счет притяжения положительного полюса одной молекулы к отрицательному полюсу соседней молекулы.

У других веществ, например у углекислого газа CO_2 — оксида углерода (IV), свободная молекула полюсов не имеет. Однако при сближении таких молекул происходит смещение электронов и в молекулах наводятся (индуцируются) полюса противоположных знаков, что и приводит к притяжению молекул, т. е. возникновению молекулярной связи.

VII. Молекулярные связи значительно слабее ионных, ковалентных или металлических. Поэтому молекулярные кристаллы легко плавятся, а при низком атмосферном давлении испаряются, не переходя в жидкое состояние. Такой процесс называется *сублимацией* или *возгонкой*. Так, мокрое белье, вынесенное на мороз, замерзает и через некоторое время высыхает. Легко испаряются кристаллы нафталина,

Структура и свойства кристаллов

Тип связи	Структурные частицы	Механизм связи	Примеры	Относительная энергия связи (на один атом)	Свойства
Ионная	Положительные и отрицательные ионы	Электростатическое взаимодействие разноименных зарядов	Хлорид натрия (поваренная соль), хлорид калия, фторид калия	≈ 30—35 условных единиц	Твердые кристаллы; высокая точка плавления (около 1000 °С); растворимы в полярных жидкостях (например, в воде)
Ковалентная	Атомы	Спаривание валентных электронов	Алмаз, германий, кремний	≈ 60—70 условных единиц	Очень твердые кристаллы; высокие точки плавления (около 1000—3500 °С); нерастворимы
Металлическая	Положительно заряженные ионы и свободные электроны	Взаимодействие ионов с электронным газом	Все металлы	≈ 10—20 условных единиц	Ковки, имеют металлический блеск, высокую теплопроводность и электропроводность
Молекулярная	Молекулы	Межмолекулярное взаимодействие	Лед (вода), сухой лед (твердая углекислота), нафталин, бром, иод	≈ 1—5 условных единиц	Мягкие непрочные кристаллы; имеют низкие точки плавления и кипения (от 80 °С до 100 °С); легко сублимируют (при низком атмосферном давлении)

иода и др. Также прямо на глазах испаряется твердая углекислота — сухой лед.

Для лучшего представления указанных свойств кристаллов рассмотрите таблицу 2, где в качестве условной единицы энергии связи, рассчитанной на один атом, принято значение примерно 10^{-20} Дж/атом.

Вопросы для самопроверки

1. Какой пример вы можете привести в качестве атомного кристалла? Объясните, как возникает ковалентная связь.
2. Какой пример вы можете привести в качестве ионного кристалла? Объясните, как возникает ионная связь.
3. Какой пример вы можете привести в качестве металлического кристалла? Объясните, как он устроен.
4. Что такое электронный газ? Как он образуется? Почему металлы являются хорошими проводниками?
5. Какой пример вы можете привести в качестве молекулярного кристалла?
6. Что называется сублимацией? Приведите пример. Почему сублимация наблюдается в основном у молекулярных кристаллов?
7. Объясните, как возникает молекулярная связь.

Упражнения

1. Нарисуйте плоскую модель ионного кристалла KI. Радиус иона калия равен $1,33 \cdot 10^{-10}$ м, иона иода — $1,90 \cdot 10^{-10}$ м.
2. Нарисуйте плоскую модель ковалентных связей атомов углерода в кристалле.
3. Почему в металлах или атомных кристаллах не образуется ионная связь?
4. Радиус иона хлора равен $1,81 \cdot 10^{-10}$ м, иона натрия — $9,8 \cdot 10^{-11}$ м. Найдите силу взаимодействия между ними, когда они плотно упакованы.
5. Найдите силу взаимодействия между ионами калия и иода в кристалле KI.
6. На площади 1 см^2 хлорида натрия находится $6,4 \cdot 10^{14}$ пар ионов. Воспользовавшись результатом задачи 4, определите, какую силу надо приложить, чтобы разорвать стерженек из каменной соли сечением 1 см^2 .
7. Опыт показывает, что для разрыва стерженька из каменной соли сечением 1 см^2 требуется сила около 450 Н, т. е. в 4200 раз меньше результата, полученного теоретически в задаче 6. Какие причины, по вашему мнению, приводят к столь резкому уменьшению прочности кристалла?

§ 2.9. ЖИДКОСТИ. АМОРФНЫЕ ТЕЛА

I. Плотности кристаллов и соответствующих им расплавов — жидкостей отличаются незначительно. Следовательно, в жидкостях частицы вещества упакованы практически так же плотно, как и в кристаллах. Между тем свойства жидкостей и кристаллов совершенно разные: если для изменения формы кристаллов требуются значительные усилия, то, как известно, жидкости текучи. Поэтому под действием силы тяжести жидкость легко принимает форму любого сосуда, переливается из одного сосуда в другой, течет по трубам и т. д.

В чем же причина таких существенных различий в свойствах жидкостей и кристаллов? Ответить на этот вопрос позволили исследования структуры жидкости.

II. Оказалось, что, хотя частицы жидкости упакованы почти так же плотно, как в кристаллах, они не образуют кристаллической решетки. Правильное расположение частиц наблюдается в пределах двух-трех слоев, дальше этот порядок нарушается. Поэтому говорят, что при упаковке частиц в жидкости наблюдается *ближний порядок*.

В результате частицы, из которых состоит жидкость, могут довольно свободно скользить относительно друг друга, испытывая небольшие силы внутреннего трения, или вязкости. Этим объясняется хорошая текучесть жидкостей, их способность легко менять свою форму под действием даже незначительных сил.

Что же касается сжимаемости жидкостей, то она мало отличается от сжимаемости кристаллов. Причина заключается в плотной упаковке частиц вещества как в кристаллах, так и в жидкостях.

III. Исследования показали, что *структура аморфных твердых тел аналогична структуре жидкостей, а не кристаллов. В аморфных телах также наблюдается ближний порядок в упаковке частиц*. Поэтому принято истинно твердыми телами считать кристаллы, а аморфные тела рассматривать как очень густые, очень вязкие жидкости. Если ударом раздробить кристалл на мелкие части и сложить эти части в сосуд, то они вновь не соберутся в крупный кристалл. Если же ударить молотком по куску смолы, то она тоже разлетится на осколки. Сложив их в сосуд и оставив в покое, можно увидеть, что через несколько дней смола сольется в один кусок и примет форму сосуда.

Как видно, смола ведет себя наподобие жидкости, но очень вязкой. Поэтому в отличие от обычных жидкостей слияние отдельных частей аморфного тела происходит чрезвычайно медленно.

IV. Аморфное состояние вещества сравнительно неустойчиво; постепенно в нем происходит кристаллизация. Так, стекло имеет аморфную структуру, но со временем в нем образуются помутнения. Разглядывая их в микроскоп, можно увидеть, что эти помутнения состоят из мелких кристалликов кварца.

Сахар — это молекулярный кристалл. Если его расплавить и быстро охладить, то образуется леденец — аморфное состояние сахара. Однако через некоторое время в леденце начинают расти кристаллики сахара.

Кстати, именно по этой причине варенье, долго простоявшее в банке, начинает засахариваться, т. е. в нем выделяются кристаллики сахара. Если же варенье еще раз переварить, то кристаллики сахара расплавятся: варенье вновь окажется хорошим.

Вопросы для самопроверки

1. Какие данные свидетельствуют о том, что частицы жидкости упакованы почти так же плотно, как частицы твердых тел?
2. Почему сжимаемость жидкостей мало отличается от сжимаемости твердых тел?
3. Что означает понятие «ближний порядок»?
4. Чем объясняется хорошая текучесть жидкостей?
5. Какой порядок наблюдается в упаковке частиц аморфного тела: дальний или ближний?
6. Почему аморфное твердое тело по своим свойствам ближе к жидкости, чем к кристаллу?
7. Приведите пример, иллюстрирующий неустойчивость аморфного состояния вещества.

Упражнения

1. По данным § 2.6 рассчитайте, на сколько процентов плотность воды отличается от плотности льда.
2. По данным § 2.7 сделайте такой же расчет для ртути.

ДОМАШНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ЗАДАНИЯ

2.1. В стакан с водой налейте половину чайной ложки уксуса (или лимонного сока) и размешайте. Затем опустите в раствор половину чайной ложки соды. Какую реакцию вы наблюдаете? Чем характерна эта реакция?

2.2. У велосипедного (или автомобильного) насоса перегните шланг и завяжите его толстой ниткой или бечевкой. Попытайтесь вдвинуть поршень в цилиндр. Что вы почувствуете? Какое свойство газа при этом проявляется?

2.3. Расплавьте столовую ложку порошка гипосульфита. Расплав вылейте на чистое сухое блюдце и дайте остыть. Затем в жидкий холодный гипосульфит бросьте одну крупинку того же порошка и наблюдайте за процессом кристаллизации. Зарисуйте получившиеся кристаллики.

2.4. Семь одинаковых дробин (или горошин) сложите на блюдце так, чтобы они плотно касались той, которая оказалась в центре. Зарисуйте получившуюся фигуру. Получилась ли плотная упаковка шариков?

2.5. В стакан налейте теплую воду (около 30—50 °С). С помощью стеклянной трубки выдуйте на дно каплю подсолнечного, оливкового или соевого масла. Наблюдайте за процессом всплывания этой капли. Какую форму она при этом имеет? Какова форма капли масла на поверхности воды?

2.6. Кусок асфальтового пека или смолы разбейте ударом молотка на кусочки. Имеют ли поверхности разлома правильную огранку или нет? Почему?

2.7. Кусочки пека или смолы насыпьте в металлическую баночку из-под консервов или обувного крема и поставьте в теплое место (например, на освещенный Солнцем подоконник или батарею водяного отопления). Посмотрите, какой вид примет вещество через сутки. Объясните явление.

Г Л А В А 3. ТЕМПЕРАТУРА

§ 3.1. ДИФФУЗИЯ

I. В предыдущей главе вы ознакомились со строением твердых тел, жидкостей и газов, с частицами, из которых состоит вещество, а также с силами, которые связывают эти частицы.

Возникают вопросы: как ведут себя частицы вещества? Двигутся ли они или покоятся? Если движутся, то как: упорядоченно или беспорядочно? На эти вопросы вы найдете ответы в данной главе и выясните физический смысл такого понятия, как *температура*.

II. Еще в Древней Греции ученые пришли к выводу, что частицы вещества, которые они называли атомами, находятся в беспорядочном движении. На этой основе они и объясняли ряд явлений, например испарение жидкостей, растворение одних веществ в других, распространение запахов и т. д.

Если в одном углу комнаты открыть флакон с духами, то уже через несколько секунд во всей комнате будет ощущаться запах духов. Духи пахнут потому, что молекулы веществ, входящих в их состав, несут с собой те свойства, которые мы воспринимаем как запах. Такое восприятие связано с формой очень больших и сложных молекул. Но почему весь объем комнаты становится им доступным? Да и потом, духи — это ведь жидкость. Почему же молекулы душистых веществ переходят из жидкости самопроизвольно в воздух, распространяясь затем по всему помещению?

Аналогичный опыт можно проделать с крупинкой марганцевокислого калия (в быту это вещество называют марганцовкой, она используется для обеззараживания ран). Опустим в стакан с водой стеклянную трубочку и через нее бросим крупинку вещества, а затем трубочку уберем. Мы обнаружим, что без всякого перемешивания через некоторое время кристалл растворится и вся вода в стакане приобретет розовую окраску.

Точно так же растворяется сахар в стакане чая. Перемешивание воды лишь ускоряет процесс проникновения молекул сахара между молекулами воды.

Взаимное проникновение частиц одного вещества между частицами другого вещества при их соприкосновении называется *диффузией* (слово «диффузия» образовано от латинского слова *diffusio* — распространение, растекание).

III. Диффузия в газах хорошо видна, если на дно стакана опустить каплю брома. Его коричневые пары медленно

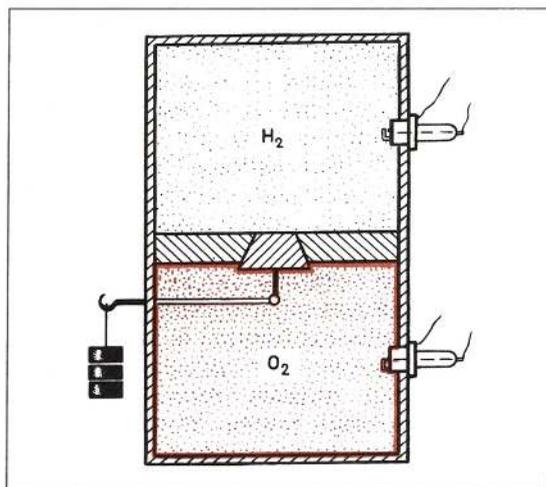


Рис. 3.1

диффундируют в верхние слои воздуха, хотя плотность паров брома значительно больше плотности воздуха. Также может быть поставлен такой эксперимент. Толстостенный стальной цилиндр разделен перегородкой с клапаном на две части (рис. 3.1). Нижняя половина цилиндра заполняется кислородом, верхняя — водородом. В боковых стенках имеются запальные свечи, между электродами которых может создаваться искра. В начале эксперимента искра не вызовет взрыва, так как кислород отделен от водорода. Если же клапан открыть, то через некоторое время газы перемешаются и образуют смесь — гремучий газ. Теперь искра вызовет взрыв этого газа. Заметим, что при диффузии более тяжелый кислород поднимается вверх, а водород, который легче кислорода в 16 раз, опускается вниз. Следовательно, газы могут двигаться вопреки действию силы тяжести.

Это явление естественно объясняется на основе молекулярно-кинетической теории. Дело в том, что молекулы обоих газов, двигаясь беспорядочно и сталкиваясь друг с другом, попадают в промежутки между соседними молекулами, что приводит к проникновению одного газа в другой. Постепенно возникает смесь двух газов с одинаковой концентрацией обоих сортов молекул.

Заметим, что именно благодаря диффузии окружающая нас атмосфера (по крайней мере ее нижний слой — тропосфера) представляет собой однородную смесь азота, кислорода, углекислого газа и небольшой примеси инертных газов и паров воды. При отсутствии диффузии произошло бы

расслоение атмосферы под действием силы тяжести: внизу оказался бы слой наиболее тяжелого углекислого газа, над ним — кислород, а еще выше — азот и инертные газы.

IV. Обратите внимание на тот факт, что диффузия в газах происходит во много раз быстрее, чем диффузия в жидкостях. Запах бензина или одеколona распространяется по всей комнате за считанные секунды, а заметного перемешивания частиц марганцовки или сахара и воды нужно ждать значительно дольше. Это различие легко объясняют современные представления о строении вещества. Действительно, в газах расстояние между молекулами велико и от одного столкновения до другого молекулы пролетают значительные расстояния. В жидкостях же каждая частица окружена плотной толпой других частиц. Она долго мечется в этом окружении почти на одном месте. Только в результате особо сильных толчков со стороны соседней частицы прорывается на небольшое расстояние и опять застревает и т. д. Неудивительно, что диффузия в жидкостях происходит относительно медленно.

В твердых телах частицы вещества совершают беспорядочные колебания в узлах кристаллической решетки, поэтому в идеальном кристалле диффузия была бы практически невозможна. Однако в реальных кристаллах всегда имеются дефекты, о чем говорилось ранее. Именно за счет этих дефектов и происходит диффузия: частицы другого вещества проникают в границы блоков, а затем в незаполненные узлы кристаллической решетки (вакансии). Но такие процессы в кристаллах происходят значительно реже, чем в жидкостях, поэтому диффузия в твердых телах происходит крайне медленно.

V. Скорость диффузии зависит не только от агрегатного состояния соприкасающихся веществ. Многочисленные наблюдения показывают, что взаимное проникновение соприкасающихся веществ происходит быстрее, если повысить их температуру.

Так, сахар быстрее растворяется в горячей воде, чем в холодной. Чтобы огурцы быстрее засолились, их заливают горячим рассолом. Любая хозяйка приведет много аналогичных примеров.

Что еще мы можем узнать о движении молекул, наблюдая за процессом диффузии? В каком направлении быстрее распространяется запах духов, если нет ветра? В каком направлении сильнее распространяется окраска около крупинки марганцовки в стакане с водой? Опыт показывает, что частицы вещества диффундируют во все стороны одинаково. Это наблюдение дает нам основание говорить, что движение молекул происходит одинаково во всех направлениях.

Для более точного понимания хаотичности, беспорядоч-

ности в движении молекул, атомов или ионов и для понимания причин такого движения следует учесть, что частицы очень часто сталкиваются между собой. Число таких столкновений огромно: миллиарды миллиардов раз в секунду. Если даже какая-то частица или группа их имела бы выбранное направление движения, то через короткое время из-за этих столкновений всякое упорядоченное движение разрушилось бы и сменилось бы хаотичным (слово «хаотичный» образовано от греческого слова chaos — беспорядочная смесь). Поэтому, говоря о тепловом движении частиц, следует обязательно добавлять, что речь идет о беспорядочном, хаотичном движении, что и отличает его от движения тела как целого, при котором каждая частица тоже движется, но все они вместе переносятся в одном направлении.

Следует учесть, что тепловое движение частиц вещества существует всегда, в любых телах, при любых условиях. Этим объясняются все процессы в живой и неживой природе, химические реакции, физические превращения и т. д. Остановить тепловое движение частиц нельзя, хотя с понижением температуры скорость движения частиц уменьшается.

VI. Многие явления и процессы в природе, а также на производстве и в быту происходят в результате диффузии, например получение растворов, красителей, клеев, пластмасс, сплавов и т. д.

Благодаря диффузии насекомые за многие километры обоняют аромат цветов и прилетают для сбора нектара, одновременно опыляя растения. По запахам хищники находят свои жертвы.

Вместе с тем диффузия приводит и к вредным последствиям. На химических предприятиях, в том числе и при работе с радиоактивными веществами, происходит выделение вредных и опасных для жизни веществ в газообразном состоянии, диффундирующих в атмосферу. Для их поглощения необходимо устанавливать специальные фильтры. Особенно опасны выбросы в атмосферу химических и радиоактивных веществ, что может губительно влиять на растительный и животный мир в радиусе на сотни и тысячи километров.

Вопросы для самопроверки

1. Какие явления свидетельствуют о беспорядочном движении частиц вещества? Приведите примеры.
2. Какое явление называется диффузией?
3. Как происходит диффузия газов?
4. Как влияет диффузия на строение атмосферы?

5. В чем отличие диффузии в жидкостях от этого же явления в газах?
6. В чем особенность теплового движения частиц в кристаллах?
7. Каков механизм диффузии в кристаллах?
8. Как влияет изменение температуры на скорость диффузии? Какой вывод отсюда следует?
9. Каковы технологические и экологические проявления диффузии?

§ 3.2. БРОУНОВСКОЕ ДВИЖЕНИЕ. ТЕМПЕРАТУРА И ДВИЖЕНИЕ МОЛЕКУЛ

I. Наблюдения за явлением диффузии позволили установить: *скорость движения частиц вещества зависит от температуры*. Однако мы не можем ответить на вопрос: с одинаковой или разной скоростью движутся частицы разных веществ при одной и той же температуре? Если допустить, что между частицами происходят упругие соударения, то скорости частиц после соударения будут зависеть от их масс. Между тем массы частиц разных веществ значительно различаются.

Как показали измерения, атом водорода имеет наименьшую массу среди атомов других веществ. Практически это масса протона — ядра атома водорода; она равна $1,67 \cdot 10^{-27}$ кг и в 1836 раз больше массы электрона. Атом гелия в 4 раза массивнее атома водорода, атом углерода — в 12 раз, кислорода — в 16 раз и т. д. Масса молекулы водорода в 2 раза больше массы атома водорода. Масса молекулы кислорода в 32 раза больше массы атома водорода. Возникает вопрос: одинаковы ли скорости теплового движения этих частиц со столь разной массой при одной и той же температуре?

В решении этой задачи важную роль сыграл анализ так называемого броуновского движения.

II. В 1827 г. английский ботаник Р. Броун наблюдал за поведением цветочной пыльцы в воде. Частицы эти имели размер около 10^{-6} м, т. е. каждая из этих частиц содержала более миллиарда молекул. Поэтому их можно было наблюдать в микроскоп, в то время как отдельную молекулу в микроскоп увидеть невозможно. Частицы пыльцы совершают неупорядоченные независимые движения по сложным зигзагообразным траекториям (рис. 3.2). Это движение не зависит от времени, происходит непрерывно и совершенно беспорядочно. С ростом температуры воды скорость движения броуновских частиц возрастает.

Оказалось также, что, чем меньше размеры броуновской частицы, тем быстрее она движется.

III. Причиной броуновского движения являются тепло-

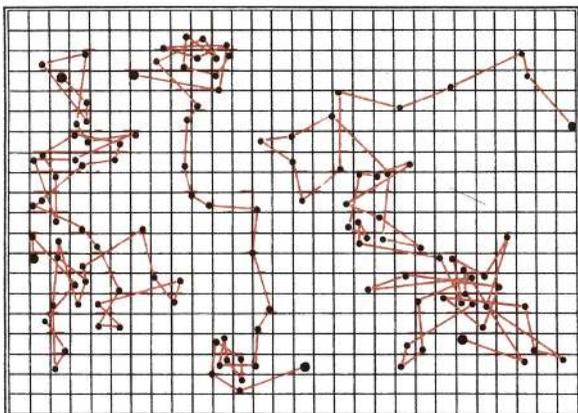


Рис. 3.2

вое движение молекул жидкости (или газа) и их столкновения с броуновской частицей.

Молекулы жидкости, в которую помещена броуновская частица, непрерывно движутся и сталкиваются с ней. Движение молекул хаотично, беспорядочно. Вдумаемся в смысл этих слов. Кроме всего прочего, хаотичность означает еще и случайность, непредсказуемость движения. Если бы тепловое движение молекул (атомов) было упорядочено, то число и сила ударов отдельных молекул о наблюдаемую частицу были бы одинаковы со всех сторон и в результате частица оставалась бы неподвижной. Случайность, непредсказуемость движения отдельных молекул приводит к тому, что в каждый момент времени число ударов слева и справа, сверху и снизу случайно, не согласовано друг с другом. Поэтому нельзя предсказать ни число ударов в отдельный момент времени, ни силу каждого удара. В результате броуновская частица испытывает в любой момент времени толчки с разных сторон, которые нельзя предсказать, и сама начинает двигаться по сосуду случайным и хаотичным образом.

IV. Броуновское движение — это наиболее наглядная иллюстрация справедливости основного положения молекулярно-кинетической теории о хаотичном тепловом движении частиц вещества. Исследовавшие в 1905—1906 гг. броуновское движение А. Эйнштейн и М. Смолуховский доказали, что броуновские частицы движутся как гигантские молекулы, средняя кинетическая энергия которых равна средней кинетической энергии окружающих молекул.

Таким образом, движение броуновских частиц — это как

бы замедленная киносъемка беспорядочного теплового движения частиц вещества. Мы не видим отдельные молекулы или атомы вещества: они слишком малы и не видны ни в какой микроскоп. Однако мы видим движение броуновских частиц, которое копирует, моделирует молекулярное движение, происходящее со значительно меньшей скоростью.

V. При данной температуре вещества равными оказываются не средние скорости молекул или атомов, а средние значения их кинетических энергий. Что же касается скоростей, то они больше у частиц с малой массой (например, у атомов или молекул водорода, у атомов гелия и т. д.) и меньше у частиц с большей массой (например, у молекул кислорода или воды).

Таким образом, мы приходим к выводу, что *температура — это физическая характеристика состояния вещества, определяемая средней кинетической энергией хаотического движения частиц вещества*. С ростом температуры растет их средняя кинетическая энергия.

Такие же результаты относительно связи между температурой и кинетической энергией молекул вытекают из молекулярно-кинетической теории, которую разработали в 1857—1859 гг. Р. Клаузиус и Дж. Максвелл, и из прямых опытов, которые поставили О. Штерн и И. Ламмерт в 1920—1929 гг.

Вопросы для самопроверки

1. Какое явление называется броуновским движением? Как его можно наблюдать?
2. Какова причина броуновского движения?
3. Какая связь имеет место между броуновским движением и тепловым движением молекул или атомов вещества?
4. Почему мы утверждаем, что при одной и той же температуре средние скорости атомов и молекул у разных веществ разные?
5. Что мы понимаем под температурой вещества?

Упражнения

1. Масса атома гелия в 2 раза больше массы молекулы водорода. Во сколько раз средняя скорость теплового движения молекулы водорода больше средней скорости атома гелия при той же температуре? **Указание.** Кинетическая энергия выражается формулой

$$E_k = mv^2 / 2.$$

2. Масса молекулы воды в 9 раз больше массы молекулы водорода. Сопоставьте средние скорости теплового движения молекул этих веществ при одной и той же температуре.

3. Средняя скорость теплового движения молекул кислорода при температуре 20°C равна 478 м/с . Найдите среднюю скорость молекул водорода и воды при этой же температуре.

§ 3.3. ЯВЛЕНИЯ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ

I. В предыдущем параграфе мы показали, что в современной физике температура рассматривается как величина, характеризующая среднюю кинетическую энергию беспорядочного (теплового) движения частиц вещества (атомов, молекул, ионов). Однако представление о температуре в науке возникло несколько столетий тому назад и отнюдь не в связи с движением молекул или атомов. Исторически представление о температуре идет от ощущения теплоты или холода, но все эти ощущения не точны и часто субъективны. Для объективных измерений температуры были созданы разного рода *термометры*.

Прежде чем рассматривать устройство термометров и правила измерения температуры, рассмотрим те явления, которые могут быть использованы для этой цели.

II. Прежде всего остановимся на понятии «тепловое равновесие». Опыт показывает, что если мы приведем в контакт два тела, из которых одно горячее, а другое холодное, то через некоторое время их температуры выравняются, т. е. горячее тело остынет, а холодное нагреется. Так, если в сосуд, разделенный на две половины металлической стенкой (рис. 3.3,а), налить кипятка (слева) и холодную воду

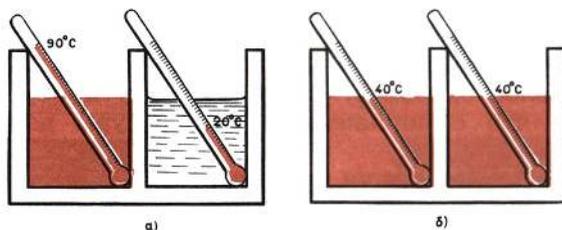


Рис. 3.3

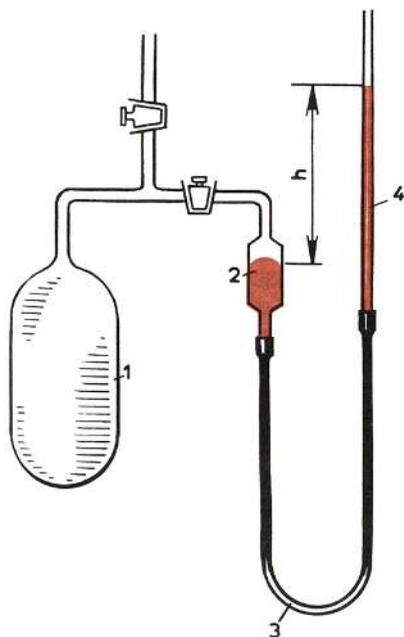


Рис. 3.4

(справа), то через некоторое время вода слева и справа примет одинаковую температуру (рис. 3.3,б).

Итак, опыт показывает, что при контакте двух тел через некоторое время наступает тепловое равновесие. Установление теплового равновесия между двумя или несколькими телами означает, что их температуры становятся одинаковыми и далее уже не различаются. С молекулярной точки зрения это означает, что в состоянии теплового равновесия у всех контактирующих тел средняя кинетическая энергия беспорядочного движения частиц вещества одинакова.

Отсюда сразу же вытекают некоторые правила измерения температуры: нужно погрузить колбочку термометра в ту среду, температура которой измеряется; необходимо подождать, пока столбик жидкости в трубке термометра остановится, т. е. пока установится тепловое равновесие; не вынимая термометр из среды, определить по его шкале значение температуры.

III. Нетрудно убедиться, что при повышении температуры газа возрастает его давление на стенки сосуда, а при охлаждении его давление уменьшается. Если колбу 1 прибора, изображенного на рисунке 3.4, опустить в горячую воду, то находящийся в колбе газ станет давить на ртуть сильнее и вытеснит ее из участка 2. Поднимая трубку 4 с резиновым шлангом 3, мы можем объем газа сохранить неизменным, тогда убедимся, что с ростом температуры ртуть в трубке поднимается. По высоте h столбика ртути мы можем вычислить давление при любой температуре газа. Если же газ в колбе охладить, то столбик ртути опустится. Это показывает, что с понижением температуры давление газа уменьшается.

С молекулярной точки зрения это явление легко объяснить. С ростом температуры возрастает средняя кинетическая энергия движения молекул (или атомов) газа. Значит, молекулы сильнее и чаще ударяются о стенки сосуда. А это мы фиксируем как увеличение давления газа.

Из рассмотренного свойства газов вытекает возможность связать *измерение температуры с измерением давления газа* (при условии, что его объем остается неизменным).

IV. Опыт показывает, что в основном все твердые тела и жидкости расширяются при повышении их температуры. В этом легко убедиться на следующем опыте. Металлический шарик в холодном состоянии свободно проходит через кольцо (рис. 3.5,а). Если же шарик нагреть, то он застрянет в кольце (рис. 3.5,б). Это значит, что его размеры при повышении температуры возросли. После охлаждения шарик вновь проходит сквозь кольцо.

При повышении температуры разные вещества по-разному расширяются. Так, если при комнатной температуре склепать две пластинки одинаковой длины (железная и алюминиевая), что показано на рисунке 3.6,а, а затем их нагреть, то пластины искривятся (рис. 3.6,б), так как алюминиевая окажется длиннее железной. Таким образом, с помощью этого опыта можно убедиться, что при повышении температуры алюминий расширяется сильнее железа.

V. Еще больше разница между тепловым расширением жидкостей и твердых тел. Нальем в колбу подкрашенную воду так, чтобы она частично попала и в трубку, пропущенную сквозь пробку (рис. 3.7). Если нагреть колбу вместе с

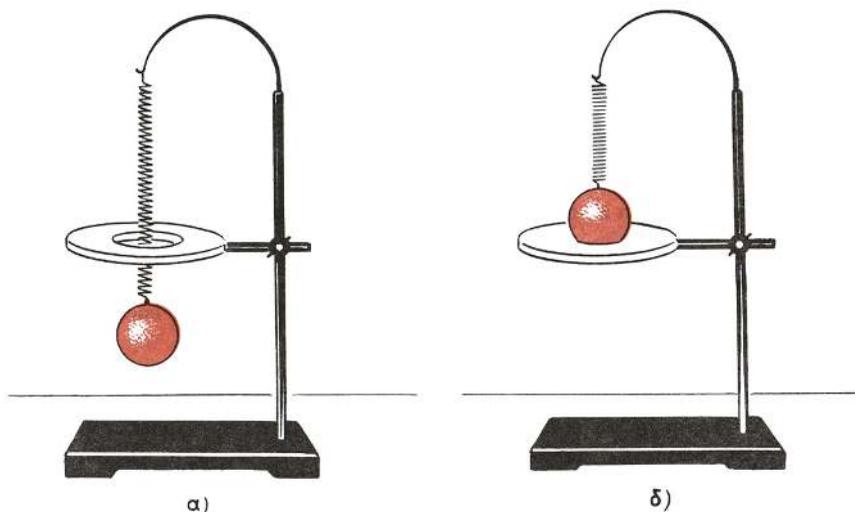


Рис. 3.5



а)



б)

Рис. 3.6



Рис. 3.7 Рис. 3.8

водой, то вода поднимется вверх по трубочке (рис. 3.8). Этот опыт показывает, что, хотя при повышении температуры расширяются и стекло, и вода, вода расширяется значительно больше стекла. В самом деле, если бы вода и стекло расширялись одинаково, то вода в трубке осталась бы на том же уровне.

Очевидно, что явление теплового расширения тел тоже может быть использовано для измерения температуры.

Вопросы для самопроверки

1. Стальную разогретую поковку опускают в воду. Как меняется температура поковки и воды?
2. В каком случае мы говорим, что тела находятся в состоянии теплового равновесия?
3. Что означает состояние теплового равновесия с молекулярной точки зрения?
4. Сформулируйте правила измерения температуры воды, воздуха.
5. Как меняется давление газа при изменении его температуры (при постоянном объеме)? Объясните это явление с молекулярной точки зрения.
6. При каких условиях объем газа возрастает при повышении его температуры? Почему это происходит?

7. Как меняются размеры твердых тел и жидкостей при изменении их температуры? Приведите примеры.
8. При нагревании расширяются как ртуть, так и стеклянная колбочка, где ртуть находится. Почему же ртутный столбик в капилляре все же ползет вверх?
9. Какой можете привести опыт, показывающий, что металлы при нагревании расширяются? Прodelайте этот опыт.

§ 3.4. ПЛАВЛЕНИЕ И КИПЕНИЕ

I. С возрастанием температуры твердых тел и жидкостей возрастает кинетическая энергия их частиц: они начинают колебаться с большей скоростью.

При некоторой температуре, вполне определенной для данного вещества, силы притяжения между частицами уже не в состоянии удержать их в узлах кристаллической решетки. Происходит разрушение, распад решетки (дальний порядок превращается в ближний), и кристалл начинает плавиться, т. е. вещество начинает переходить в жидкое состояние.

II. Оказывается, что в процессе плавления температура кристалла остается постоянной. Эта температура называется температурой плавления. У каждого вещества есть своя температура плавления.

Делают опыт. С улицы (или из морозильной камеры холодильника) приносят немного снега и наблюдают за изменением его температуры с помощью термометра. Видят, что сначала температура снега растет, а затем, в процессе плав-



Рис. 3.9



Рис. 3.10

ления, остается постоянной (показания термометра не изменяются). И только после того, как весь снег растает, температура образовавшейся воды опять начинает возрастать. На рисунке 3.9 изображен график такого процесса.

III. Аналогичное явление наблюдается при кипении жидкостей. Если поставить на электрическую плитку или газовую горелку сосуд с водой и поместить в нее термометр, то можно заметить, что вначале температура воды растет (ртуть поднимается по трубке термометра), а затем, когда вода закипает, ее температура перестает повышаться. График этого процесса показан на рисунке 3.10.

Температура, при которой происходит кипение жидкости, называется температурой кипения. Заметим: как температура плавления, так и температура кипения зависят от атмосферного давления.

Поскольку температуры плавления и кипения у каждого вещества имеют вполне определенные значения (при заданном атмосферном давлении), то этим можно воспользоваться при измерениях температуры. Именно по этим температурам и градуируется шкала термометра.

Вопросы для самопроверки

1. Какой процесс называется плавлением?
2. Что такое температура плавления?
3. Что называется температурой кипения?
4. В какое состояние переходит жидкость при кипении?

§ 3.5. ТЕРМОМЕТР

I. В предыдущих параграфах мы рассмотрели, как влияет изменение температуры вещества на его свойства. Все эти явления могут быть использованы при конструировании термометров разного вида.

Рассмотрим конструкции некоторых термометров и выясним, как градуируются их шкалы. Заодно уточним также определение *единицы температуры — градуса*.

II. Первый прибор для объективной оценки температуры, о котором сохранились сведения, был изобретен Галилеем в 1592 г. Это стеклянная колба 1 величиной с куриное яйцо и с горлышком 2, тонким, как пшеничный стебель. Горлышко погружалось в чашу с водой (рис. 3.11). Уровень воды в трубке находился примерно посередине ее длины. При нагревании колбы 1 уровень воды в горлышке понижался, а при охлаждении — повышался. *Термоскоп Галилея* был очень чувствителен к изменению температуры.

III. Газовый термометр постоянного объема, позволяющий производить весьма точные измерения температуры, изображен на рисунке 3.4. Здесь каждому значению температуры соответствует точное значение давления, фиксируемое по высоте столбика ртути в манометрической трубке. Остается только определить единицу температуры и сопоставить с ней определенное значение давления.

Газовый термометр, баллон которого заполнен водородом, используется в науке в качестве образцового прибора, по которому градуируют все остальные термометры. Однако для практических целей он очень громоздок и неудобен.

IV. Самое широкое применение на практике приобрели жидкостные термометры, в которых для регистрации температуры используется тепловое расширение жидкостей. Чаще всего для этой цели используется ртуть, в более дешевых термометрах — подкрашенный спирт. С устройством и принципом действия жидкостного термометра ознакомимся на примере медицинского термометра (рис. 3.12).

Здесь 1 — небольшой баллон (иногда имеющий вид шарика), в котором находится ртуть. К баллону припаяна длинная узкая трубочка 2, куда поступает ртуть, расширяющаяся при повышении температуры. Трубочка прикреплена к шкале 3, на которой нанесены деления, позволяющие регистрировать температуру в градусах и их десятых долях. Так, на рисунке 3.12 показана температура $36,6^{\circ}\text{C}$, что соответствует нормальной температуре человеческого организма.

Заметим, что в жидкостных термометрах, предназначенных для измерений в других диапазонах температур, цена деления шкалы может быть иной. Поэтому, прежде чем ис-

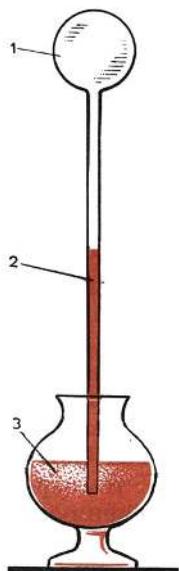


Рис. 3.11



Рис. 3.12



Рис. 3.13

пользовать термометр для каких-либо измерений, следует соблюдать следующие правила: определить, в каких диапазонах температур можно производить измерения с помощью данного термометра; определить цену деления шкалы и определить, с какой точностью можно измерить температуру с помощью данного термометра. Эти правила обеспечат сохранность термометра и правильность измерений.

V. Заметим, что у медицинского термометра есть одна особенность, которой нет у других термометров. Смотреть на шкалу, не вынимая термометр из-под мышки больного, очень неудобно. Поэтому термометр вынимают, а потом уже смотрят на шкалу. А чтобы столбик ртути не опустился за это время, канал около баллончика со ртутью сужен (участок 4 на рис. 3.12). При охлаждении столбик ртути в этом месте разрывается и ртуть самопроизвольно вниз не опускается. Чтобы ртуть прошла через сужение в баллончик, термометр встряхивают, и тем самым он приводится в рабочее состояние. Так как верхний предел шкалы медицинского термометра равен 42°C , то с его помощью нельзя измерять

более высокие температуры, например температуру горячей воды. При температуре выше 42°C ртуть, расширяясь, разорвет капилляр и термометр выйдет из строя. С термометром, особенно ртутным, надо очень осторожно обращаться. Следует помнить, что пары ртути очень ядовиты, поэтому надо предохранять баллон термометра от ударов, чтобы его не разбить.

Вопросы для самопроверки

1. Как устроен термоскоп Галилея? На каком принципе он работает?
2. При описании термоскопа Галилея обычно отмечают, что высота уровня воды в его трубке зависит не только от температуры, но и от атмосферного давления. Почему?
3. На каком физическом явлении основано действие жидкостных термометров?
4. Каковы правила измерения температуры?
5. В чем особенность устройства медицинского термометра? Зачем его перед измерением температуры встряхивают?
6. Нужно ли встряхивать перед измерением температуры термометр, изображенный на рисунке 3.13?

Упражнения

1. По рисунку 3.13 определите пределы измерения температуры с помощью данного термометра, цену деления шкалы и точность измерений.
2. Какую температуру регистрирует термометр, изображенный на рисунке 3.13?
3. Каждый термометр регистрирует свою собственную температуру. При каких условиях вы можете быть уверены, что он показывает температуру окружающей среды? На каком свойстве тепловых явлений основана эта уверенность?

§ 3.6. ТЕМПЕРАТУРНЫЕ ШКАЛЫ. ГРАДУС

I. Совершенствованием термометров занималось много ученых. Каждый из них создавал свою шкалу, используя в качестве опорных те точки, которые он считал наиболее разумными. Некоторые из этих шкал широко распространялись, другие, наоборот, быстро забывались. К концу XVIII в. число употреблявшихся шкал приблизилось к двум десяткам, что было и неудобно, и не нужно.

II. В настоящее время в большинстве стран для науч-

ных и практических целей используется *Международная практическая температурная шкала*. С достаточной для наших целей точностью данную шкалу можно описать следующим образом.

За нуль принимается температура плавления льда при нормальном атмосферном давлении (101 325 Па). Температуре кипения дистиллированной воды при нормальном атмосферном давлении приписывается значение 100 градусов. Шкала делится на 100 равных частей-градусов; каждый градус можно вновь делить на равные доли (обычно на 5 или 10).

Таким образом, *единица температуры 1 °C (один градус Цельсия) — это одна сотая температурного интервала между температурой плавления льда и температурой кипения дистиллированной воды при нормальном атмосферном давлении.*

III. Во Франции (и до революции в России) применялась *шкала Реомюра*, предложенная французским естествоиспытателем Р. Реомюром в 1730 г., у которой нуль определялся по температуре плавления льда, а температуре кипения воды приписывалось значение 80 °R (рис. 3.14).

В Англии и США до сих пор используется *шкала Фаренгейта*, предложенная немецким физиком Д. Фаренгейтом в 1714 г. В ней приняты три опорные точки. Первые две: температура особо суровой зимы 1709 г. (0 °F) и температура тающего льда (32 °F). Отметив наименьшее положение столбика жидкости зимой 1709 г. и положение столбика жидкости термометра при таянии льда, Фаренгейт поделил промежуток между этими отметками на 32 равные части. Третьей опорной точкой была температура человеческого тела, принятая за 98 °F. Расстояние между отметками 32° и 98° делится на 66 равных частей. Температура кипения воды по этой шкале оказывается равной 212 °F (см. рис. 3.14).

IV. Какие бы ни были приняты опорные (реперные) точки в той или иной шкале температур, шкала все равно делится на некоторое число равных частей. Однако будут ли совпадать показания термометров с разными термометрическими телами (газами или жидкостями)? И почему надо делить шкалу именно на равные части, т. е. считать термометрическую шкалу линейной?

Ответить на эти вопросы может только опыт. Но ведь в опыте надо измерять температуру каким-либо термометром, а именно в его показаниях мы сомневаемся. Как же выйти из этого затруднения?

Предположим, что у нас имеются газовый термометр и термометры с разными жидкостями. Погружим их в

тающий лед; уровень столба жидкости пометим на шкале каждого термометра цифрой 0° . Затем поместим все термометры в кипящую воду; получим отметку 100° . Расстояния между отметками на шкалах поделим на 100 равных частей. В результате каждый наш термометр будет совершенно одинаково проградуирован по известной вам стоградусной шкале.

Опустим теперь наши термометры в ведро с теплой водой. Предположим, что при этом ртутный термометр показывает, что температура воды равна 50°C . Что покажут термометры, в которых вместо ртути использованы другие жидкости? Что покажет газовый термометр?

Оказывается, только газовый термометр покажет почти точно 50°C , остальные — совершенно разную температуру. Спиртовой термометр покажет около 43°C , термометр с оливковым маслом — 49°C , с чистой водой — примерно $25,6^\circ\text{C}$, а с соленой водой — $45,4^\circ\text{C}$, глицериновый термометр покажет температуру $47,6^\circ\text{C}$. Какой же термометр считать правильным? Какая температура воды в ведре истинная: 50°C или другая?

Исторически сложилось так, что чаще всего для изготовления термометров использовали ртуть. Показания ртутного термометра в очень широком интервале темпе-

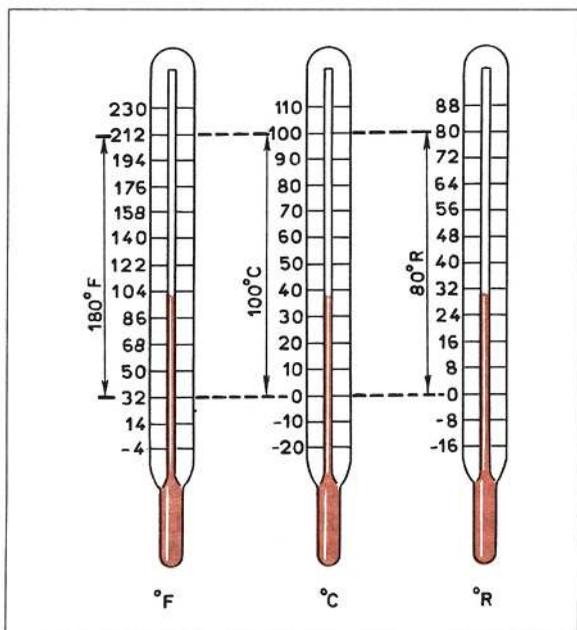


Рис. 3.14

ратур почти точно совпадают с показаниями газовых термометров. Но ведь это не доказательство, что ртутные термометры показывают истинную температуру, а водяные термометры ошибаются. Почему бы не наоборот?

А с теоретической точки зрения бесспорным преимуществом обладает газовый термометр. В самом деле, как давление газа, так и температура пропорциональны одной и той же величине — средней кинетической энергии молекул газа. Поэтому связь между давлением и температурой газа оказывается наиболее фундаментальной. Именно поэтому показания газового термометра (и совпадающие с ними показания ртутного термометра) мы будем считать образцовыми. В показаниях всех остальных термометров придется вносить соответствующие поправки.

Вопросы для самопроверки

1. Какие точки приняты в качестве основных на шкале Цельсия?
2. Что принято за единицу температуры на шкале Цельсия? Дайте определение.
3. Какие еще температурные шкалы вам известны?
4. Почему показания газового и ртутного термометров считаются образцовыми?

Упражнения

1. Найдите соотношение между 1°C и 1°R .
2. Температура воздуха равна 25°C . Какова температура по шкале Реомюра?
3. Температура воздуха равна 32°R . Какова температура по шкале Цельсия?
4. В одном из фантастических романов указано, что температура воздуха равна 120°F . Может ли человек вынести такую температуру? Что показал бы термометр, градуированный по шкале Цельсия; по шкале Реомюра?
5. Какова температура здорового человека по шкале Реомюра; по шкале Фаренгейта?
6. Можно ли шарик медицинского термометра опустить в кипящую воду? Почему?

§ 3.7. АБСОЛЮТНАЯ (ТЕРМОДИНАМИЧЕСКАЯ) ШКАЛА ТЕМПЕРАТУР

I. Во всех рассмотренных в предыдущем параграфе температурных шкалах нуль выбран произвольно. В шкалах Цельсия и Реомюра это точка плавления льда. Почему

именно льда, а не другого вещества? В шкале Фаренгейта это мороз в 1709 г. А почему именно этот мороз? И почему именно в Голландии, где в это время работал Фаренгейт? В Якутии или в Антарктиде морозы гораздо сильнее. Такой произвольный выбор нуля температур существенно усложняет теоретический вывод ряда зависимостей, приводит к громоздким формулам и ненужным вычислениям.

Исходя из этих соображений, У. Томсон (получивший за научные заслуги титул лорда Кельвина) предложил в 1848 г. ввести новую шкалу температур, которая называется либо *абсолютной*, либо *термодинамической шкалой температур*. Температура, измеренная по этой шкале, называется *абсолютной температурой* (или термодинамической температурой).

II. При введении этой шкалы будем исходить из следующих соображений. Мы уже установили, что температура определяется средней кинетической энергией беспорядочного (теплого) движения частиц вещества. В газах это движение молекул или атомов. Но поскольку мы вводим новую шкалу температур, то определим ее так, чтобы абсолютная температура была пропорциональна средней кинетической энергии беспорядочного движения молекул.

III. Как же измерить абсолютную температуру? Вспомним, что от средней кинетической энергии молекул зависит давление газа: чем больше кинетическая энергия молекул, тем с большей скоростью и чаще они соударяются со стенками сосуда.

При неизменном объеме газа и неизменном числе молекул в нем давление газа прямо пропорционально его абсолютной температуре.

Данное утверждение для любых двух значений давления p_2 и p_1 и соответствующих температур T_2 и T_1 можно записать так:

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

Это позволяет измерять абсолютную температуру с помощью газового термометра постоянного объема или с помощью ртутного термометра, проградуированного по газовому термометру.

IV. Нам осталось ввести *единицу абсолютной температуры* и установить нулевой уровень термодинамической шкалы.

За единицу абсолютной температуры принят *кельвин* (1 К); он равен одному градусу Цельсия:

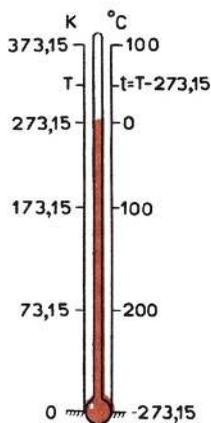


Рис. 3.15

$$1 \text{ К} = 1 \text{ }^\circ\text{С}.$$

Нулевой уровень абсолютной температуры принимают равным $-273,15 \text{ }^\circ\text{С}$. Эта температура называется *абсолютный нуль*. Отсюда следует: *температура плавления льда по абсолютной шкале температур равна 273,15 К*. Соответственно температура кипения воды равна 373,15 К.

Сравнение температур по шкале Цельсия и абсолютной шкале показано на рисунке 3.15. При не очень точных расчетах округляют значение точки плавления льда: $T_0 = 273 \text{ К}$. Соответственно округляют и все другие значения абсолютной температуры.

Если температура вещества по шкале Цельсия равна $t \text{ }^\circ\text{С}$, то абсолютная температура того же вещества $T = t + 273,15$.

V. Соотношение между абсолютной температурой и температурой по шкале Цельсия получают следующим образом. Помещают баллон газового термометра в тающий лед и определяют соответствующее этой температуре давление $p_1 = p_{\text{пл}}$. Температуру плавления льда обозначим как $T_{\text{пл}} = T_0$.

Переносят баллон в кипящую при нормальном атмосферном давлении воду и определяют новое значение давления газа: $p_2 = p_{\text{кип}}$. Температуру кипения обозначим $T_{\text{кип}}$.

Но поскольку $1 \text{ К} = 1 \text{ }^\circ\text{С}$, то абсолютная температура кипения воды больше абсолютной температуры плавления льда на 100 К:

$$T_{\text{кип}} = T_{\text{пл}} + 100 = T_0 + 100.$$

Подставив это значение в выражение, связывающее давление газа и его абсолютную температуру, получим

$$\frac{p_{\text{кип}}}{p_{\text{пл}}} = \frac{T_0 + 100}{T_0}.$$

Опыт показывает, что $p_{\text{кип}}/p_{\text{пл}} = 1,3661$. Отсюда следует: $T_0 + 100 = 1,3661 T_0$ и $T_0 = 273,15 \text{ К}$.

VI. Иногда из формулы $p_2/p_1 = T_2/T_1$ делают вывод, что при $T_2 = 0$ давление газа $p_2 = 0$, следовательно, пре-

кращается движение молекул. Но это рассуждение некорректно: при температурах вблизи абсолютного нуля давление газа не пропорционально абсолютной температуре, здесь справедливы более сложные закономерности.

Оказалось, что абсолютный нуль недостижим. Никакие физические процессы не позволяют охладить вещество до температуры абсолютного нуля, хотя в ряде лабораторий специальными методами удалось достичь температуры, которая лишь на $0,0001$ К выше абсолютного нуля.

Итак, *абсолютный нуль — это предельно низкая, недостижимая температура.*

Вблизи абсолютного нуля частицы вещества совершают так называемые нулевые колебания, энергия которых не зависит от температуры. Эти колебания удалось обнаружить в эксперименте. Энергию нулевых колебаний нельзя отнять у частиц вещества ни при какой температуре, вплоть до абсолютного нуля.

Вопросы для самопроверки

1. Каково соотношение между средней кинетической энергией теплового движения частиц вещества и абсолютной температурой?
2. Какова связь между давлением газа и его абсолютной температурой? При каких условиях это соотношение справедливо? Напишите соответствующую формулу.
3. С помощью каких приборов можно измерить абсолютную температуру? Ответ обоснуйте.
4. Что является единицей абсолютной температуры? Как она связана с градусом Цельсия?
5. Какова точка плавления льда по абсолютной шкале температур; точка кипения воды?
6. Что мы понимаем под абсолютным нулем?
7. Возможна ли температура ниже абсолютного нуля?

Упражнения

1. Рассчитайте абсолютную температуру тела здорового человека.
2. Выведите значение точки плавления льда по абсолютной шкале температур.
3. Температура тела возросла с 15°C до 75°C . Во сколько раз изменилась средняя кинетическая энергия частиц?
4. В закрытом сосуде температура газа уменьшилась со 100°C до -100°C . Как изменилось давление газа; во сколько раз?

5. Температура плавления твердого водорода равна -259°C , а температура кипения равна -253°C . Найдите абсолютные температуры плавления и кипения водорода с точностью в три значащие цифры.

§ 3.8. ОСОБЕННОСТИ ТЕПЛООВОГО РАСШИРЕНИЯ ВОДЫ

I. В § 3.6 мы отметили, что *водяной термометр* дает очень неточные показания в сравнении с ртутным или спиртовым. Это вызвано специфическим строением молекул воды, что приводит к особенностям ее расширения и имеет важное значение в природе.

У огромного количества веществ частицы в кристаллическом состоянии упакованы плотнее, чем в жидком состоянии (расплаве). Поэтому *плотность кристалла больше плотности расплава и кристалл тонет в своем расплаве*. В этом легко убедиться, расплавив свинец, олово или цинк и бросив в него кусочек этого же вещества; он обязательно утонет.

Лед же плавает на поверхности воды, значит, его плотность меньше плотности воды. Точно так же ведут себя чугун, висмут, галлий.

II. Кристалл льда имеет довольно рыхлую структуру; в нем имеются большие дыры. При плавлении льда вещество уплотняется.

Плотность воды при 0°C и нормальном давлении больше плотности льда при этих же условиях: $\rho_{\text{льда}} = 920 \text{ кг/м}^3$, $\rho_{\text{воды}} = 999,84 \text{ кг/м}^3$. Соответственно объем 1 кг льда равен 1,0869 л, объем 1 кг воды при 0°C равен 1,00016 л.

III. Следует отметить, что при плавлении льда не происходит сразу полного разрушения кристаллической решетки. Разрывается лишь небольшое число связей между молекулами; при 0°C число таких разрушенных

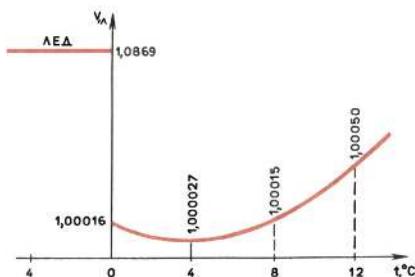


Рис. 3.16

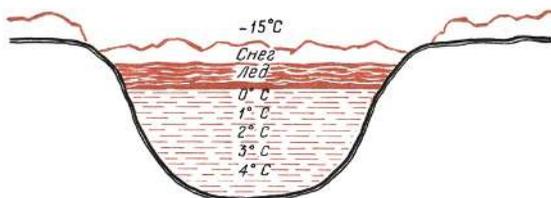


Рис. 3.17

связей составляет около 15%. Остальные молекулы сохраняют кристаллоподобную структуру внутри небольших областей.

Освободившиеся молекулы воды частично заполняют пустоты в сохраняющейся структуре льда, что приводит к уменьшению объема вещества и соответственно к росту плотности. При повышении температуры возрастает число разорванных связей и все больше пустот заполняется молекулами воды. Поэтому при нагревании воды от 0 °С до 4 °С она не расширяется, а сжимается, и ее плотность растет: при 4 °С она равна 999,973 кг/м³. И только при более высоких температурах плотность воды начинает уменьшаться, а ее объем — возрастать. На рисунке 3.16 изображена зависимость объема (в литрах) одного килограмма воды от температуры.

IV. Особенности теплового расширения воды имеют исключительно важное значение для жизни обитателей водоемов. Дело в том, что при охлаждении воды зимой на дне водоемов оказывается более плотная вода с температурой 4 °С, сверху — более холодная вода, а на поверхности — лед, плотность которого меньше плотности воды. Плохая теплопроводность льда и покрывающего его снежного покрова предохраняет водоемы от замерзания до дна и создает тем самым условия для жизни обитателей водоемов зимой (рис. 3.17).

Вопросы для самопроверки

1. Каково соотношение между плотностью кристалла и расплава у большинства веществ? Как это проверить опытным путем?
2. Каково соотношение между плотностью воды и льда?
3. Чем объясняется особенность изменения плотности (и объема) льда при его плавлении?
4. Как меняется плотность (и объем) воды при изменении температуры от 0 °С до 10 °С? Нарисуйте примерный график.

5. Какую роль в природе играют особенности теплового расширения воды?

Упражнения

1. Какая часть льдины выходит на поверхность воды, а какая часть находится в воде? Температуру воды можно принять равной 0°C .

2. Решите ту же задачу для айсберга, плавающего в морской воде, плотность которой равна 1050 кг/м^3 .

ДОМАШНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ЗАДАНИЯ

3.1. Рассмотрите устройство медицинского термометра. Объясните принцип его действия. Определите верхний и нижний пределы шкалы термометра, цену деления. Измерьте температуру собственного тела, вначале зажав термометр между пальцами руки на 2—3 мин, а затем под мышкой на такое же время.

3.2. Поместите один и тот же термометр вначале под солнечные лучи, а затем в тень. Во всех опытах нельзя пользоваться медицинским термометром. Сделайте выводы из опыта и определите действительную температуру воздуха, т. е. ту, о которой сообщают по радио.

3.3. Наберите в кружку кусочки льда (лед можно получить в холодильнике). С помощью наружного термометра, помещенного в кружку, наблюдайте за процессом плавления льда и последующим нагреванием воды. Ежеминутно фиксируйте показания термометра. По результатам измерений постройте график плавления льда и последующего нагревания воды.

3.4. На дно стакана положите несколько крупинок марганцовки и осторожно налейте сверху немного холодной воды. Наблюдайте, как меняется цвет воды. Какое это явление?

3.5. Проведите тот же опыт, но марганцовку залейте горячей водой. Что изменится в данном явлении? Почему?

3.6. На гладкую небольшую дощечку положите какую-либо монету и вбейте на противоположных концах диаметра монеты два гвоздика так, чтобы монета свободно проходила между этими гвоздиками. С помощью плоскогубцев возьмите монету и нагрейте ее в пламени газовой горелки. Пройдет ли она теперь между гвоздиками? Что будет, если дать монете остыть?

3.7. Легко убедиться, что лед плавает в воде. Будет ли кусочек твердого олова или свинца плавать в своем расплаве? Проверьте на опыте под наблюдением взрослых.

3.8. В прозрачной склянке из-под лекарств расплавьте парафин или воск. Объясните, почему неодинакова поверхность этих веществ в твердом и жидком состояниях. Опустите в расплав кусок твердого вещества. Плавает он или тонет?

3.9. В стакан налейте воды и поместите туда лед. Изменится ли уровень воды, когда весь лед растает? Зафиксируйте изменение температуры воды как функцию времени в процессе плавления льда. Постройте график изменения температуры воды.

3.10. Прикрепите к резервуару наружного термометра ватку, пропитанную одеколоном (духами). Приведите термометр в колебательное движение и следите за его показаниями. Объясните, почему и как изменяются показания термометра.

3.11. Измерьте температуру воздуха перед дождем и после дождя. Определите разность температур и объясните, почему после дождя стало прохладнее.

3.12. В два одинаковых стакана налейте поровну горячей воды. На поверхность воды одного из них накапайте 4—5 капель подсолнечного масла. Через 4—5 мин измерьте температуру воды в обоих стаканах. Объясните, почему показания термометра неодинаковы.

3.13. Перед носиком чайника с кипящей водой поместите металлический предмет (холодный утюг, нож, ложку, вилку). Проследите за образованием капель воды на этих предметах и объясните причины их появления.

3.14. Пронаблюдайте выход пузырьков из газированной воды и объясните сходство этого процесса с кипением. Налейте газированную воду в стакан, подождите, пока опадет пена и в воде будут подниматься вверх только отдельные пузырьки, хотя жидкость содержит еще много газа. Для ускорения его выхода необходимо образовать центры кипения. Это можно сделать, бросив в воду щепотку сахарного песка или соли. Проследите за процессом выхода пузырьков, опишите его и докажите его сходство с процессом кипения.

3.15. Возьмите ягоду или кусочек шоколада и бросьте в стакан с сырой водой. По мере достижения дна они образуют пузырьками газа, а затем всплывают и снова погружаются на дно. Пронаблюдайте за этим процессом и объясните его.

3.16. На подошву утюга, расположенную горизонтально и прогретую примерно до $300\text{ }^{\circ}\text{C}$, капните маленькую каплю воды. Капелька, упав на утюг, отскочит от него, как мячик от пола, а затем будет двигаться, не касаясь нагретой поверхности. Пронаблюдайте и объясните поведение капли воды как физическое явление.

3.17. Из колбы или бутылочки (например, от шампуня), стеклянных и резиновых трубок сконструируйте газовый термометр. В качестве манометрической жидкости используйте подкрашенную воду. Приняв температуру своего тела равной $36\text{ }^{\circ}\text{C}$, измерьте температуру воздуха, температуру холодной воды и т. п.

Г Л А В А 4. ВНУТРЕННЯЯ ЭНЕРГИЯ

§ 4.1. ЗАКОН СОХРАНЕНИЯ ЭНЕРГИИ И ТЕПЛОВЫЕ ЯВЛЕНИЯ

I. В прошлом году вы ознакомились с понятием «механическая энергия» W и двумя ее формами: потенциальной $E_{\text{п}}$ и кинетической $E_{\text{к}}$. Вы также знаете, что если в данной системе тел можно не учитывать действие силы трения и если на эту систему не действуют внешние силы, то полная механическая энергия этой системы равна: $W = E_{\text{к}} + E_{\text{п}} = \text{const}$. Иными словами, в такой системе тел кинетическая энергия может переходить в потенциальную, потенциальная — в кинетическую, но полная механическая энергия остается постоянной.

Однако во всякой реальной системе тел действуют силы трения (силы сопротивления); в ней происходят неупругие соударения тел. И во всех этих случаях механическая энергия уменьшается. Как же быть с законом сохранения энергии?

Чтобы разобраться в этом вопросе, рассмотрим некоторые конкретные случаи.

II. Поднимем тело над Землей и дадим ему возможность свободно падать. Ударившись о Землю один или несколько раз, оно останется лежать неподвижно. Его начальная потенциальная энергия превратилась при падении в кинетическую, и это происходит в полном соответствии с законом сохранения энергии. Но при ударе о Землю тело остановилось и его кинетическая энергия стала равной нулю, т. е. она как будто исчезла. Что же произошло на самом деле?

Оказывается, что при ударе (как показали опыты) температура тела возрастает. Но мы уже знаем, что возрастание температуры означает увеличение кинетической энергии беспорядочного (теплого) движения частиц вещества — атомов, молекул или ионов. Кроме того, при возрастании температуры твердые тела (и жидкости) расширяются, расстояние между частицами вещества меняется, а значит, возрастает потенциальная энергия их взаимодействия.

Итак, при ударе тела о Землю его кинетическая энергия не исчезла, она лишь превратилась в энергию движения и взаимодействия частиц, из которых состоит вещество: атомов, молекул, ионов.

Конечно, при однократном ударе тела о Землю повышение его температуры обнаружить очень трудно. Но если вы положите на наковальню кусок металла (например, гвоздь, кусок медной проволоки, кусок свинца и т. д.) и будете ча-

сто и сильно ударять по нему молотком, то убедитесь, что после десятка ударов металл сильно разогреется.

III. Значительное повышение температуры происходит, когда в земную атмосферу врываются небесные тела — *метеориты*. Эти тела влетают в атмосферу с огромной скоростью, порядка десятков километров в секунду, что в сотни раз больше скорости реактивных самолетов. При массе от нескольких килограммов до нескольких тонн они обладают колоссальной кинетической энергией.

Удар при вхождении в атмосферу и дальнейшее трение при движении в воздухе приводят к повышению температуры этих тел до нескольких десятков тысяч градусов. При этом небольшие тела полностью испаряются и сгорают, образуя то, что мы называем падающими звездами (рис. 4.1). Крупные тела — метеориты — полностью не сгорают в атмосфере и падают на Землю. Сильно нагреваются и космические корабли, входя в плотные слои атмосферы.

Кстати, на Луне, где нет атмосферы, метеориты с огромной скоростью врезаются в лунную поверхность и, разогревшись за счет удара, взрываются, выбрасывая во все стороны лунный грунт. За счет этого на поверхности Луны образуются кольцевые горы — кратеры (рис. 4.2).

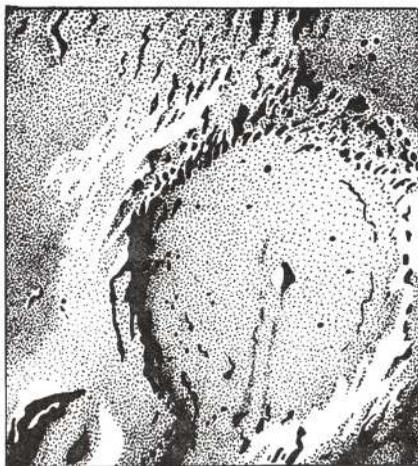
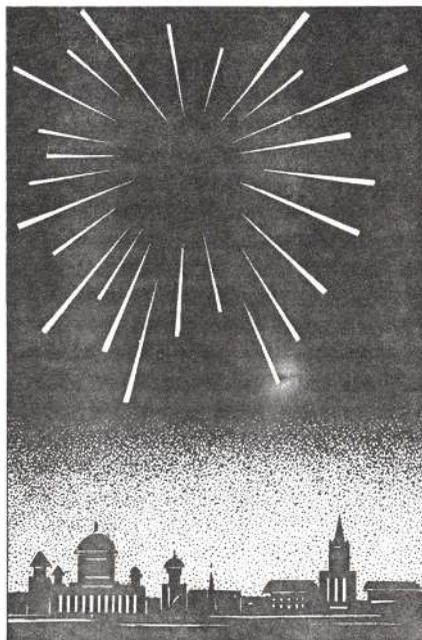


Рис. 4.2

← Рис. 4.1

Вопросы для самопроверки

1. Какие виды механической энергии вы знаете? Приведите примеры.
2. Как формулируется закон сохранения механической энергии? Приведите примеры.
3. Как изменяется при ударе о Землю энергия тела, предварительно поднятого вверх?
4. Во что превращается кинетическая энергия тела при его ударе о Землю?
5. Что такое падающие звезды?
6. Как образуются лунные кратеры?

Упражнения

1. Возьмите в руки кусок железной проволоки и быстро согните ее несколько раз. Затем коснитесь пальцем места сгиба. Что вы обнаружили? Объясните явление.
2. Положите на наковальню большой гвоздь и ударами молотка расплющите его. Прикоснитесь пальцем. Что вы почувствовали? Объясните явление.
3. Существуют особые артиллерийские снаряды (они называются кумулятивными), которые при ударе о танковую броню частично плавятся и прожигают в броне отверстие. Попробуйте объяснить принцип действия этих снарядов.

§ 4.2. ВНУТРЕННЯЯ ЭНЕРГИЯ

I. Когда мы говорим о кинетической энергии тела или потенциальной, то мы не вникаем во внутреннюю структуру тела. Такой подход к рассмотрению явлений называется *макроскопическим* (слово «макроскопический» образовано от греческого слова *makros* — большой). При анализе механических явлений такой макроскопический подход оказывается правильным.

Однако при рассмотрении тепловых явлений макроскопический подход оказывается недостаточным. Здесь необходимо учесть, что все тела состоят из мельчайших частиц — атомов, молекул или ионов, и именно движением и взаимодействием этих частиц определяется характер всех тепловых процессов. Поэтому анализ существования тепловых явлений требует *микроскопического* подхода (слово «микроскопический» образовано от греческого слова *mikros* — малый). В частности, оказалось необходимым ввести понятие *внутренняя энергия*.

Внутренней энергией называется сумма кинетических энергий всех частиц, из которых состоит тело, и потенциальной энергии взаимодействия этих частиц между собой. Сюда включается энергия взаимодействия электронов с ядрами и энергия взаимодействия составных частей ядра.

II. Выясним, от каких факторов зависит внутренняя энергия тела.

Прежде всего внутренняя энергия тела зависит от его температуры. В самом деле, температура характеризует среднюю кинетическую энергию частиц вещества. Значит, изменение температуры означает и изменение суммарной кинетической энергии всех частиц, следовательно, изменение внутренней энергии тела.

Кроме того, при изменении температуры твердого тела или жидкости меняется расстояние между частицами (тепловое расширение или сжатие тел). Но при изменении расстояния между частицами вещества меняется и энергия взаимодействия между ними, следовательно, изменяется внутренняя энергия.

III. Внутренняя энергия меняется также при переходе вещества из одного агрегатного состояния в другое: при плавлении твердых тел, испарении жидкостей или кристаллов, сублимации, обратных процессах конденсации паров и кристаллизации жидкостей. Правда, при плавлении кристаллов и кипении жидкостей, как известно, температура не меняется, но при этом существенно меняется энергия взаимодействия между частицами, а следовательно, меняется и внутренняя энергия.

Процессы, связанные с изменением температуры или агрегатного состояния вещества, называются тепловыми. Таким образом, тепловые процессы сопровождаются изменением внутренней энергии тела.

IV. *Химическими называются реакции, в результате которых происходит превращение одних веществ в другие, отличающиеся по составу и строению. Примером может служить процесс горения топлива, при котором происходит соединение углерода с кислородом и образование оксида углерода (IV); процесс горения водорода, при котором образуется водяной пар; процесс соединения цинка с соляной кислотой, при котором выделяется водород, и т. п.*

Во всех этих реакциях происходит перегруппировка атомов и молекул, распад одних молекул и образование новых, что сопровождается изменением энергии взаимодействия частиц вещества (потенциальной энергии) и очень часто — их кинетической энергии, т. е. изменением температуры. Таким образом, *химические реакции сопровождаются изменением внутренней энергии взаимодействующих тел.*

V. Атом состоит из ядра и электронной оболочки. Далее вы узнаете, что *атомы могут излучать и поглощать энергию при переходе электронов с одной оболочки на другую. При этом также меняется внутренняя энергия вещества.*

Кроме того, существуют реакции превращения ядер одних элементов в ядра других элементов. *Эти реакции называются ядерными.* С ними вы познакомитесь в следующем учебном году. *При ядерных реакциях меняется энергия взаимодействия частиц, из которых состоит атомное ядро, значит, меняется и внутренняя энергия веществ, в состав которых входят эти ядра.*

VI. Таким образом, мы приходим к выводу, что внутренняя энергия тела может меняться при тепловых процессах, химических и ядерных реакциях, при поглощении или излучении энергии атомами, в частности при излучении и поглощении света. Все эти процессы не являются вполне независимыми. Так, например, химические реакции всегда сопровождаются изменением температуры и очень часто изменением агрегатного состояния вещества. А пока мы будем рассматривать изменение внутренней энергии в основном при тепловых процессах.

Внутреннюю энергию мы будем обозначать буквой U , изменение внутренней энергии — символом ΔU .

Вопросы для самопроверки

1. Чем отличается микроскопический подход к описанию явлений от макроскопического?
2. Что мы называем внутренней энергией тела?
3. Какие процессы называются тепловыми?
4. Меняется ли внутренняя энергия при тепловых процессах? Ответ обоснуйте.
5. При плавлении кристалла его температура не меняется. Меняется ли при этом внутренняя энергия вещества? Увеличивается при этом внутренняя энергия или уменьшается?
6. При кипении жидкости ее температура не меняется. Меняется ли при этом внутренняя энергия вещества? Ответ обоснуйте.
7. Какие реакции мы называем химическими? Меняется ли внутренняя энергия при химических реакциях? Ответ обоснуйте.
8. Какие процессы изменения внутренней энергии вам известны?

§ 4.3. РАБОТА И ВНУТРЕННЯЯ ЭНЕРГИЯ

I. Вам уже известно, что работа является мерой изменения механической энергии. В самом деле, поднимая тело на некоторую высоту над поверхностью Земли, мы совершаем

работу против силы тяжести; при этом возрастает потенциальная энергия тела. Работа, совершаемая нами, равна приращению потенциальной энергии: $A = \Delta E_{\text{п}}$.

Если тело отпустить с какой-либо высоты, то под действием силы тяжести оно станет падать и его скорость по мере падения будет возрастать. Потенциальная энергия будет переходить в кинетическую, и в конце концов работа силы тяжести станет равна приращению кинетической энергии: $A_{\text{тяж}} = \Delta E_{\text{к}}$. Выясним: *каким путем можно изменить внутреннюю энергию?*

II. Нетрудно убедиться, что *одним из способов изменения внутренней энергии является работа*. Так, при трении двух тел происходит повышение их температуры, т. е. возрастает их внутренняя энергия. Работа силы трения в этом случае равна изменению внутренней энергии трущихся тел: $A_{\text{тр}} = \Delta U$.

Это явление учитывается в технике. Например, при обработке металлов — сверлении, обточке, фрезеровании — за счет работы сил сопротивления очень сильно возрастает температура как самого рабочего инструмента (сверла, резца, фрезы), так и обрабатываемой детали. Чтобы уменьшить нагрев, в место контакта рабочего инструмента с деталью подается смазочно-охлаждающая жидкость, что предупреждает перегрев детали и инструмента.

Вместе с тем повышение температуры за счет работы силы трения может оказаться полезным. Именно это явление использовали люди в древности для добывания огня.

III. Можно показать еще одно явление, когда за счет работы какой-либо силы происходит повышение температуры тела, а следовательно, и его внутренней энергии. Для этой цели рассмотрим опыт с так называемым воздушным огнивом (рис. 4.3). Эта установка представляет собой небольшой цилиндр из плексигласа, в котором перемещается поршень, и при этом газ под поршнем сжимается.

В цилиндр капают две-три капли легковоспламеняющейся жидкости (например, эфира) и вставляют поршень. При сильном ударе поршень быстро сжимает газ и эфир воспламеняется.

Здесь за счет работы внешней силы происходит возрастание внутренней энергии газа, а следовательно, повышение его температуры. Это и вызвало воспламенение эфира.

IV. Наконец, можно убедиться, что за счет уменьшения внутренней энергии тела последнее может совершить работу. Для этой цели берут установку, изображенную на рисунке 4.4, где в горловине стеклянного сосуда находится резино-

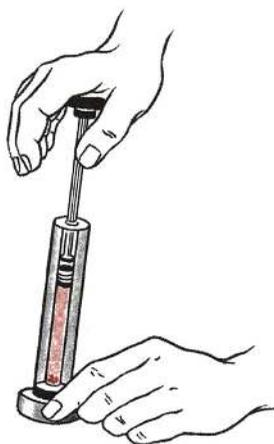


Рис. 4.3



Рис. 4.4

вая пробка, удерживаемая трением о стекло. Внутри сосуда находятся несколько капель воды, следовательно, и водяной пар.

Если с помощью насоса нагнетать воздух внутрь сосуда, то давление в сосуде будет повышаться. Наконец при определенном давлении пробка выскочит и в сосуде образуется туман.

Это явление с энергетической точки зрения объясняется следующим образом. При нагнетании воздуха давление в сосуде увеличивается, следовательно, внутренняя энергия воздуха возрастает. Когда же пробка выскакивает из сосуда, она приобретает кинетическую энергию за счет работы, совершаемой силой давления воздуха. При этом *внутренняя энергия воздуха уменьшается, что сопровождается уменьшением его температуры*. Вследствие этого водяной пар конденсируется, образуя мельчайшие капельки воды в виде тумана.

V. Все вышеизложенные явления приводят нас к выводу: одним из процессов, приводящих к изменению внутренней энергии, является преобразование механической энергии во внутреннюю или наоборот. *Работа является мерой изменения внутренней энергии при превращении механической энергии во внутреннюю или внутренней энергии в механическую.*

Вопросы для самопроверки

1. Какие преобразования энергии происходят за счет работы силы трения? Приведите примеры.
2. Почему при сверлении деталей сверло и изделие периодически смазывают, а в место контакта резца токарного станка с деталью подается все время смазочно-охлаждающая жидкость?
3. Приведите примеры нагревания вещества за счет работы. Какие превращения энергии здесь происходят?
4. Приведите пример превращения внутренней энергии тела в механическую. Как при этом меняется температура?
5. Чтобы стальной обод крепко держался на колесе телеги, его сильно разогревают и в таком состоянии надевают на колесо. При охлаждении обод сильно сжимает древесину, производя при этом большую работу. За счет какой энергии эта работа совершается?
6. Если стеклянную бутылочку или баночку с водой выставить на мороз, то при замерзании воды сосуд расколется. О чем свидетельствует этот опыт? За счет какой энергии совершается работа по разрушению сосуда?
7. Конек скользит по льду за счет того, что под его полозом лед плавится и образуется тонкий слой воды, играющий роль смазки. За счет какой энергии происходит плавление льда? Почему в сильный мороз коньки плохо скользят?

§ 4.4. ТЕПЛОБМЕН

I. Если в кастрюлю набрать немного чистого снега и поставить ее на плиту, то можно увидеть следующее: сначала температура снега повышается до 0°C , затем снег начинает таять; при этом его температура уже не меняется, а остается постоянной. Когда весь снег растает, температура образовавшейся воды станет снова повышаться от 0°C до 100°C ; наконец вода закипит.

Во всех этих случаях — при изменении температуры или агрегатного состояния вещества — внутренняя энергия тела меняется. В рассмотренном случае она возрастает. За счет чего же эта энергия возрастает?

II. Рассмотрим другой опыт. Если разогреем кусок железа до высокой температуры и опустим его в холодную воду, то окажется: температура железа уменьшается, воды — увеличивается, а через некоторое время их температуры сравниваются. Но при уменьшении температуры железа уменьшается его внутренняя энергия, зато температура воды, а следовательно, ее внутренняя энергия возрастают.

Таким образом, можно сделать вывод: *при контакте двух тел с разными температурами происходит передача энергии от тела с высокой температурой к телу с низкой*

температурой. При этом никакая макроскопическая работа не совершается.

Процесс передачи энергии от одного тела к другому, имеющему более низкую температуру, называется теплообменом.

III. Таким образом, в природе существуют два процесса, при которых меняется внутренняя энергия тела:

а) превращение механической энергии во внутреннюю и наоборот; при этом совершается работа;

б) теплообмен; при этом работа не совершается.

Конечно, возможен и такой случай, когда одновременно происходят оба процесса: теплообмен и совершается работа. Обратимся к рисунку 4.5. На нем изображена колба с водой, которая подогревается газовой горелкой. Между водой и пламенем осуществляется теплообмен. За счет энергии, переданной при теплообмене, внутренняя энергия воды возрастает, и она кипит. Пар, вырываясь из трубочки, за счет своей внутренней энергии совершает работу, вращая колесико с лопастями. Здесь внутренняя энергия пара преобразуется в кинетическую энергию вращающегося колесика.

IV. Следует обратить внимание на тот факт, что при теплообмене энергия всегда передается от горячего тела к холодному, т. е. от тела с высокой температурой к телу с низкой температурой. Обратный процесс сам собой никогда не происходит.

Так, если вылить расплавленный воск в холодную воду, то воск остынет, а вода нагреется, причем этот процесс произойдет самопроизвольно — без всякого внешнего вмешательства. Но если погрузить в воду кусок воска, температура которого равна температуре воды, то никогда не будет так,

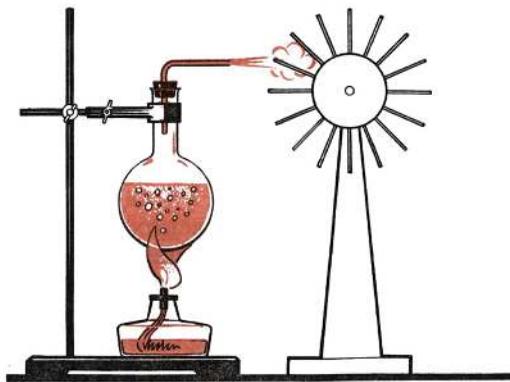


Рис. 4.5

чтобы, например, вода немного остыла и за счет этого воск нагрелся и расплавился.

Таким образом, процесс теплообмена необратим. Наш повседневный опыт показывает, что *энергия путем теплообмена всегда передается от тела с более высокой температурой телам с более низкой температурой.*

Вопросы для самопроверки

1. Какое явление называется теплообменом?
2. Чем отличается теплообмен от работы?
3. При каких условиях происходит теплообмен?
4. Что означает утверждение, что процесс теплообмена необратим?

§ 4.5. КОЛИЧЕСТВО ТЕПЛОТЫ. ЗАКОН СОХРАНЕНИЯ ЭНЕРГИИ

I. Мы установили, что *работа есть мера изменения энергии при превращении механической энергии из одного вида в другой: кинетической в потенциальную или, наоборот, потенциальной в кинетическую.* Известно также, что *работа является мерой превращения механической энергии во внутреннюю и обратно.* Теперь необходимо установить *меру передачи энергии при теплообмене.*

Энергия, переданная путем теплообмена, называется количеством теплоты.

Если в процессе теплообмена не совершается работа, то количество теплоты равно изменению внутренней энергии. Однако в тех случаях, когда в процессе теплообмена совершается работа, это равенство нарушается.

II. Количество теплоты обозначается буквой Q . Единицей в СИ для количества теплоты служит *джоуль*.

Естественно, что могут использоваться и кратные единицы, в частности *килоджоуль* (кДж), *мегаджоуль* (МДж) и *гигаджоуль* (ГДж). Напомним, что

$$1 \text{ кДж} = 10^3 \text{ Дж}, \quad 1 \text{ МДж} = 10^6 \text{ Дж}, \quad 1 \text{ ГДж} = 10^9 \text{ Дж}.$$

III. При рассмотрении механических явлений мы установили, что если в системе взаимодействующих тел отсутствуют силы трения, т. е. не происходит превращения механической энергии во внутреннюю, и если на эту систему не действуют внешние силы, то ее полная механическая энергия сохраняется:

$$W = E_{\text{к}} + E_{\text{п}} = \text{const.}$$

Система тел, на которые не действуют внешние силы, называется *замкнутой*. Следовательно, в механике закон сохранения энергии можно сформулировать так: *полная механическая энергия замкнутой системы тел сохраняется*. При этом предполагается, что в этой системе отсутствуют силы трения.

IV. В случае, если в изолированной системе тел происходят тепловые процессы, то ее механическая энергия не сохраняется. Но это не значит, что при этом энергия системы тел не сохраняется; следует учесть, что уменьшение механической энергии сопровождается возрастанием внутренней энергии.

Назовем *полной энергией системы тел сумму механической энергии W и внутренней U*

$$E = W + U = E_{\text{к}} + E_{\text{п}} + U.$$

Как видно, полная энергия учитывает не только энергию макроскопического движения и взаимодействия тел, но и микроскопическую энергию движения и взаимодействия частиц вещества.

Так как внутренняя энергия может меняться как за счет работы сил, так и за счет теплообмена, то этим же свойством обладает и полная энергия. *При каких же условиях полная энергия системы тел останется неизменной?*

Очевидно, что работа внешних сил должна быть равна нулю, т. е. *система должна быть замкнутой*. Но этого мало — *рассматриваемая система не должна участвовать в теплообмене с окружающей средой*. Такая система тел называется *теплоизолированной*. Следовательно, в случае, если в системе тел происходят не только механические, но и тепловые, химические, ядерные и другие процессы, то *закон сохранения энергии* формулируется так:

Полная энергия замкнутой и теплоизолированной системы тел сохраняется.

Сокращенно это можно записать так: если $A_{\text{внеш}} = 0$, $Q_{\text{внеш}} = 0$, то $E = \text{const}$.

Вопросы для самопроверки

1. Что такое количество теплоты?
2. Назовите единицу количества теплоты в СИ и ее производные.
3. Как формулируется закон сохранения энергии в системах, где не происходят тепловые процессы?
4. Какая система тел называется замкнутой?
5. Какая система тел называется теплоизолированной?
6. Что называется полной энергией системы тел?

7. За счет каких процессов может измениться полная энергия системы тел?

8. Как формулируется закон сохранения полной энергии?

§ 4.6. КАК ВЫЧИСЛИТЬ КОЛИЧЕСТВО ТЕПЛОТЫ

I. Если в процессе теплообмена не происходит изменений агрегатного состояния вещества, то оказывается, что полученное телом количество теплоты Q пропорционально массе тела m и разности температур $\Delta t = t_2 - t_1$, где t_1 — начальная температура, а t_2 — конечная:

$$Q = cm\Delta t = cm(t_2 - t_1).$$

II. Величина c , являющаяся коэффициентом пропорциональности в данном выражении, называется *удельной теплоемкостью* вещества:

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

Удельная теплоемкость вещества показывает, какое количество теплоты необходимо, чтобы изменить температуру единицы массы данного вещества на 1°C . Единицей удельной теплоемкости в СИ служит джоуль на килограмм-градус Цельсия $\left(\frac{\text{Дж}}{\text{кг}\cdot^\circ\text{C}}\right)$. Используется также кратная единица килоджоуль на килограмм-градус Цельсия $\left(\frac{\text{кДж}}{\text{кг}\cdot^\circ\text{C}}\right)$.

Опыт показывает, что в достаточно большом интервале температур удельную теплоемкость данного вещества можно приближенно считать постоянной величиной. Кроме того, оказывается, что у разных веществ удельная теплоемкость имеет разные значения.

III. Если вещество плавится, то его температура не меняется. Однако это не значит, что в процессе плавления к телу не надо подводить энергию. Опыт показывает, что если подача энергии путем теплообмена прекращается, то прекращается и процесс плавления.

Итак, в процессе плавления к телу подводится некоторое количество теплоты, которое называется *теплотой плавления*:

$$Q_{\text{пл}} = \lambda m.$$

Теплота плавления пропорциональна массе расплавленного вещества. Величина λ , играющая роль коэффициента пропорциональности в данном выражении, называется удельной теплотой плавления вещества:

$$\lambda = Q_{\text{пл}}/m.$$

Удельная теплота плавления показывает, какое количество теплоты необходимо, чтобы расплавить единицу массы данного вещества при температуре плавления. Единицей удельной теплоты плавления в СИ служит джоуль на килограмм (Дж/кг), а также килоджоуль на килограмм (кДж/кг).

На что же расходуется теплота плавления? Большая ее часть идет на уменьшение связей между частицами вещества, т. е. на разрушение кристаллической решетки. При этом возрастает энергия взаимодействия между частицами. Небольшая же часть теплоты плавления расходуется на совершение работы по изменению объема тела при его плавлении.

IV. Заметим, что температура плавления и удельная теплота плавления вещества зависят от внешнего давления. У большинства веществ при плавлении объем возрастает на 3—4%, у алюминия даже на 6%. В этом случае с ростом давления температура плавления повышается, а удельная теплота плавления немного уменьшается.

Однако есть ряд веществ (висмут, галлий, германий, кремний, лед), у которых в процессе плавления объем уменьшается на 2—5%, у льда — на 8,3%. Кстати, именно поэтому лед плавает на поверхности воды, а не тонет. У этих веществ с ростом давления температура плавления понижается, а удельная теплота плавления немного увеличивается.

V. Аналогично в процессе парообразования (и кипения жидкости) при постоянной температуре к веществу следует подводить энергию путем теплообмена, т. е. подводить теплоту парообразования:

$$Q_{\text{п}} = rm.$$

Теплота парообразования пропорциональна массе вещества, превратившегося в пар. Величина r , играющая роль коэффициента пропорциональности в данном выражении, называется удельной теплотой парообразования:

$$r = Q_{\text{п}}/m.$$

Удельная теплота парообразования показывает, какое количество теплоты необходимо, чтобы превратить в пар единицу массы данного вещества при температуре кипения. Единицей удельной теплоты парообразования в СИ служит джоуль на килограмм (Дж/кг) или килоджоуль на килограмм (кДж/кг).

С ростом давления температура кипения жидкости повышается, а удельная теплота парообразования уменьшается.

VI. Теплота парообразования большей частью идет на разрыв связей между частицами вещества. При этом энергия взаимодействия между частицами увеличивается. В самом деле, на разрыв связей надо затратить энергию, следовательно, в том агрегатном состоянии, где связи между частицами слабее, энергия их взаимодействия больше.

А это означает, что при одной и той же температуре, например при температуре плавления, энергия взаимодействия между частицами расплава (т. е. жидкого состояния вещества) больше, чем у кристалла. Соответственно при температуре кипения энергия взаимодействия между частицами пара больше, чем между частицами жидкости (или частицами кристалла при сублимации).

Принято считать энергию взаимодействия между частицами газа равной нулю. Тогда энергия взаимодействия между частицами в кристаллах или жидкостях оказывается меньше нуля, т. е. является отрицательной величиной. В этом ничего удивительного нет. В самом деле, если принять потенциальную энергию тела, лежащего на столе, равной нулю, то энергия этого же тела на полу окажется отрицательной.

Наряду с тем, что наибольшая часть теплоты парообразования расходуется на разрыв связей между частицами, некоторая ее часть расходуется на работу, совершаемую при расширении пара.

Вопросы для самопроверки

1. Тело нагревается от температуры t_1 до температуры $t_2 > t_1$. Как рассчитать количество теплоты, которое к нему надо подвести?

2. Что показывает удельная теплоемкость вещества? Какие единицы удельной теплоемкости вам известны?
3. Напишите выражение для теплоты плавления тела.
4. Что показывает удельная теплота плавления вещества? Какие единицы удельной теплоты плавления вам известны?
5. При плавлении кристаллов их температура не меняется. На что же расходуется теплота плавления?
6. Напишите выражение для теплоты парообразования.
7. Что показывает удельная теплота парообразования? Какие единицы удельной теплоты парообразования вам известны?
8. На что расходуется теплота парообразования?

Упражнения

1. Какое количество теплоты необходимо, чтобы нагреть 1 л воды от комнатной температуры 18°C до кипения?
2. Какое количество теплоты необходимо, чтобы нагреть воздух от температуры 5°C при нормальном атмосферном давлении до температуры 25°C в комнате, размеры которой равны $3 \times 6 \times 2,8 \text{ м}^3$? Плотность воздуха в этих условиях равна в среднем $1,25 \text{ кг/м}^3$, удельная теплоемкость равна $1 \text{ кДж/(кг}\cdot^\circ\text{C)}$.
3. Какое количество теплоты необходимо, чтобы расплавить ледяную глыбу массой $12,5 \text{ т}$ при температуре плавления? Удельная теплота плавления равна 332 кДж/кг .
4. Какое количество теплоты необходимо, чтобы 2 кг льда, температура которого -15°C , превратить в пар при температуре 100°C ? Начертите график этого процесса, откладывая на оси абсцисс подводимое количество теплоты, а на оси ординат — температуру вещества. Удельная теплота парообразования равна $2,26 \text{ МДж/кг}$.

§ 4.7. КАК РЕШАТЬ ЗАДАЧИ НА ЯВЛЕНИЕ ТЕПЛООБМЕНА

На практике часто встречаются задачи на явление теплообмена между двумя или несколькими телами. Наиболее просто задача решается в том случае, когда система тел является теплоизолированной, а работой в процессе теплообмена можно пренебречь.

Рассмотрим некоторые задачи данного типа.

Задача 1. В медном сосуде массой 200 г находится вода объемом $0,5 \text{ л}$ при температуре 15°C . В воду опустили медное тело массой 600 г , температура которого

100 °С. Какая окончательная температура установится? Систему считайте теплоизолированной.

Решение. В процессе теплообмена тело с более высокой температурой передает энергию холодному сосуду и воде. Суммарная энергия системы не меняется, ибо система теплоизолированная и замкнутая. Обозначим величины, относящиеся к медному телу, индексом 1, к сосуду — индексом 2 и к воде — индексом 3. Мы можем записать условие сохранения энергии при теплообмене следующим образом:

$$Q_1 = Q_2 + Q_3.$$

Так как здесь нет изменений агрегатного состояния, то уравнение примет вид

$$c_1 m_1 (t_1 - t) = c_2 m_2 (t - t_2) + c_3 m_3 (t - t_3),$$

где t — температура, установившаяся в результате теплообмена.

Мы не будем решать задачу в общем виде, а подставим данные в вышеуказанное уравнение и проведем численный расчет. Недостающие данные возьмем из таблицы 4.1.

СИ		
$m_1 = 600 \text{ г}$	$m_1 = 0,6 \text{ кг}$	$0,38 \cdot 10^3 \cdot 0,6 (100 - t) =$
$m_2 = 200 \text{ г}$	$m_2 = 0,2 \text{ кг}$	$= 0,38 \cdot 10^3 \cdot 0,2 (t - 15) +$
$V_3 = 0,5 \text{ л}$	$m_3 = 0,5 \text{ кг}$	$+ 4,18 \cdot 10^3 \cdot 0,5 (t - 15);$
$t_1 = 100^\circ\text{C}$	$t_1 = 100^\circ\text{C}$	$0,228 (100 - t) =$
$t_2 = t_3 = 15^\circ\text{C}$	$t_2 = t_3 = 15^\circ\text{C}$	$= (0,076 + 2,09) (t - 15);$
<hr/>	$c_1 = c_2 =$	$0,228 \cdot 100 - 0,228t =$
$t - ?$	$= 0,38 \cdot 10^3 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}}$	$= 2,166t - 2,166 \cdot 15;$
	$c_3 = 4,18 \cdot 10^3 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}}$	$22,8 + 32,49 =$
	$t - ?$	$= t (2,166 + 0,228);$
		$55,29 = t \cdot 2,394$
		$t = \frac{55,29}{2,394} = 23^\circ\text{C}$

Задача 2. Сосуд содержит воду массой 3,5 кг при комнатной температуре (18 °С). После того как в воду впустили пар при температуре 100 °С, масса воды стала равна 3,7 кг, а температура 52 °С. Пренебрегая теплоемкостью сосуда и считая систему теплоизолированной, определите удельную теплоту парообразования воды.

Решение. Пар массой 0,2 кг конденсируется, отдавая теплоту парообразования воде, содержащейся в сосуде. При конденсации пара образуется вода, температура которой равна 100 °С. И эта горячая вода охлаждается до 52 °С, отдавая свою теплоту холодной воде. В результате последняя нагревается до 52 °С.

Пренебрегая теплоемкостью сосуда и считая систему теплоизолированной, запишем следующее уравнение:

$$Q_{\text{п}} + Q_1 = Q_2$$

Раскроем эти величины:

$$rm_1 + m_1c_1(t_1 - t) = m_2c_2(t - t_2).$$

Запишем данные задачи в СИ:

$m_1 = 0,2 \text{ кг}$	$0,2r + 0,2 \cdot 4,18 \cdot 10^3 (100 - 52) =$
$m_2 = 3,5 \text{ кг}$	$= 3,5 \cdot 4,18 \cdot 10^3 (52 - 18);$
$t_1 = 100 \text{ °С}$	$0,2r + 0,2 \cdot 4,18 \cdot 10^3 \cdot 48 =$
$t_2 = 18 \text{ °С}$	$= 3,5 \cdot 4,18 \cdot 10^3 \cdot 34;$
$t = 52 \text{ °С}$	$r = \frac{(497,42 - 40,13) \cdot 10^3}{0,2} =$
$c_1 = c_2 = 4,18 \cdot 10^3 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{°С}}$	$= 2,3 \cdot 10^6 \text{ Дж/кг} = 2,3 \text{ МДж/кг.}$
$r - ?$	

Задача 3. На газовой плите находится алюминиевый чайник с водой при комнатной температуре 18 °С. Масса чайника 0,2 кг, масса воды 3,0 кг. Определите массу и объем газа, который должен сгореть, чтобы вода нагрелась до кипения и 10% ее выкипело. КПД нагревателя равен 70%. Плотность природного газа в этих условиях равна 0,72 кг/м³.

Решение. При сгорании топлива освобождается энергия (теплота сгорания), которая пропорциональна массе топлива:

$$Q_{\text{сгор}} = qm,$$

где q — удельная теплота сгорания топлива (см. табл. 4.4).

По условию задачи полезная теплота, идущая на нагревание системы, составляет 70% от теплоты сгорания газа:

$$Q_{\text{пол}} = \eta Q_{\text{сгор}}.$$

Полезная теплота расходуется на нагревание чайника, воды и на парообразование:

$$Q_{\text{пол}} = m_1 c_1 (t_2 - t_1) + m_2 c_2 (t_2 - t_1) + r m_3$$

окончательно имеем

$$\eta q m = (m_1 c_1 + m_2 c_2) (t_2 - t_1) + r m_3.$$

Отсюда находим массу сгоревшего газа. Выпишем данные задачи:

$\eta = 0,7$	$0,7 \cdot 49 \cdot 10^6 m = (0,2 \cdot 0,92 \cdot 10^3 +$
$m_1 = 0,2 \text{ кг}$	$+ 3,0 \cdot 4,18 \cdot 10^3) \cdot (100 - 18) +$
$m_2 = 3,0 \text{ кг}$	$+ 0,3 \cdot 2,257 \cdot 10^6;$
$m_3 = 0,1 \cdot 3,0 = 0,3 \text{ кг}$	$34,3 \cdot 10^6 m =$
$c_1 = 0,92 \cdot 10^3 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C})$	$= 12,7 \cdot 10^3 \cdot 82 + 0,677 \cdot 10^6;$
$c_2 = 4,18 \cdot 10^3 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C})$	$34,3 \cdot 10^6 m =$
$r = 2,25 \cdot 10^6 \text{ Дж}/\text{кг}$	$= 1,04 \cdot 10^6 + 0,667 \cdot 10^6 = 1,707 \cdot 10^6$
$t_1 = 18 \text{ }^\circ\text{C}$	$m = \frac{1,707}{34,3} = 0,05 \text{ кг} = 50 \text{ г}$
$t_2 = 100 \text{ }^\circ\text{C}$	$V = \frac{0,05}{0,72} = 0,069 \text{ м}^3 = 69 \text{ л}$
$q = 49 \cdot 10^6 \text{ Дж}/\text{кг}$	
$\rho = 0,72 \text{ кг}/\text{м}^3$	
$m - ?$	
$V - ?$	

Упражнения

1. В сосуд, содержащий 5 л воды при температуре $20 \text{ }^\circ\text{C}$, влили 3 л воды при температуре $90 \text{ }^\circ\text{C}$. Какова будет окончательная температура воды? Потери пренебречь.
2. В алюминиевом сосуде массой 200 г содержится 600 г керосина при температуре $20 \text{ }^\circ\text{C}$. В керосин опустили железную гиру массой 500 г, температура которой была $100 \text{ }^\circ\text{C}$. Какая установится окончательная температура? (Систему считать теплоизолированной.) Удельная теплоемкость алюминия равна $0,92 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C})$, керосина — $2,1 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C})$, железа — $0,46 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C})$.
3. В холодную воду в виде капель выливается расплавленный свинец. Масса воды равна 10 кг, начальная температура $20 \text{ }^\circ\text{C}$. Какова будет температура воды, если в нее вылить расплавленный свинец массой 5 кг? (Теплообменом с окружающей средой пренебречь.) Удельная теплоемкость свинца равна $0,13 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C})$, удельная теплота плавления $24 \text{ кДж}/\text{кг}$; температура плавления $327 \text{ }^\circ\text{C}$.

4. Какую массу керосина надо сжечь, чтобы выделившееся количество теплоты позволило расплавить глыбу льда массой 0,5 т? Начальная температура льда -10°C , КПД установки равен 60%. Удельная теплоемкость льда равна $2,1 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot^{\circ}\text{C})$, удельная теплота плавления $332 \text{ кДж}/\text{кг}$.

§ 4.8. ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ

I. Выше мы рассмотрели процесс теплообмена как один из процессов, при котором происходит передача энергии от тела с высокой температурой к телу с низкой температурой. Существует три вида теплообмена: теплопроводность, конвекция и лучистый теплообмен. Рассмотрим каждый из них в отдельности.

Теплопроводностью называется явление передачи энергии от более нагретых участков тела к менее нагретым в результате теплового движения и взаимодействия частиц, из которых состоит тело.

В существовании теплопроводности нас убеждает ряд наблюдений и экспериментов.

Налейте в стакан кипятка и опустите туда чайную ложечку, придерживая ее пальцами. Вы почувствуете, что ложечка, которая вначале была холодной, быстро становится горячей. Еще быстрее это произойдет, если ваша ложечка окажется серебряной или алюминиевой.

II. Чтобы показать, что у разных веществ теплопроводность разная, ставят следующий опыт. В стальной шарик, изображенный на рисунке 4.6, вставляют три стержня одинаковой длины и толщины — медный, стальной и стеклянный. На каждом из них на равных расстояниях приклеи-

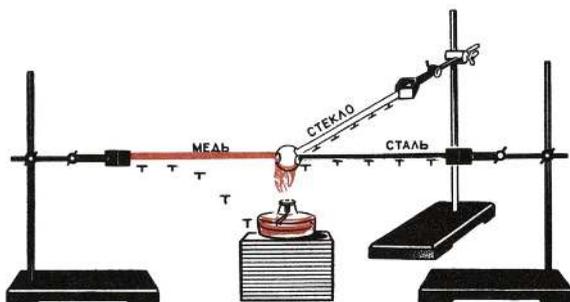


Рис. 4.6

вают воском гвоздики. Нагревая шарик пламенем спиртовки или газовой горелки, видят, что сначала отваливаются гвоздики от медного стержня, а затем — от стального. На стеклянном стержне гвоздики очень долго держатся. Мы приходим к выводу, что теплопроводность меди велика, поэтому она быстро прогревается, воск тает и гвоздики отпадают. Теплопроводность стали значительно меньше теплопроводности меди, а теплопроводность стекла — совсем маленькая.

III. Наибольшей теплопроводностью обладают металлы — она у них в сотни раз больше, чем у воды. Исключением являются ртуть и свинец, но и здесь теплопроводность в десятки раз больше, чем у воды (см. таблицу 4.5).

Среди изоляторов лишь алмаз обладает большой теплопроводностью. У остальных веществ теплопроводность примерно такая же, как у воды, — в несколько раз больше или меньше. Значительно меньше теплопроводность газов. Но обычные ссылки на низкую теплопроводность газов далеко не всегда справедливы. Так, теплопроводность гелия равна теплопроводности асбеста или бумаги, теплопроводность водорода больше теплопроводности войлока, керосина, эбонита, некоторых сортов бетона и равна теплопроводности плексигласа или эбонита.

Вещества с низкой теплопроводностью используются в качестве теплоизоляторов. Войлок, сукно, вата, меха используются широко для этой цели. Двойные стекла с прослойкой воздуха хорошо теплоизолируют окна.

IV. Явление теплопроводности газов аналогично диффузии. Оба эти явления суть следствия беспорядочного теплового движения молекул (или атомов) газа.

Из слоя с высокой температурой быстрые молекулы перемещаются в более холодный слой. При этом в этот слой они переносят избыток энергии, следовательно, температура газа возрастает. Молекулы, которые движутся с меньшими скоростями, из холодного слоя переходят в более нагретый слой, замещая молекулы, движущиеся с большими скоростями. За счет этого средняя кинетическая энергия молекул в нагретом слое уменьшается, следовательно, снижается его температура.

V. Совершенно иначе выглядит механизм теплопроводности жидкостей и твердых тел. Здесь частицы вещества колеблются относительно положений равновесия и их перескоки из одного слоя в другой происходят сравнительно редко.

Когда мы повышаем температуру какого-либо участка твердого тела или жидкости, то частицы вещества этого участка начинают более интенсивно коле-

баться, т. е. возрастают их кинетическая и потенциальная энергии. Соударяясь с частицами соседнего слоя, где температура ниже, более энергичные частицы передают в этот слой избыток энергии, и его температура возрастает. Затем энергия передается в следующий слой и т. д. Описанный механизм теплопроводности жидкостей и твердых тел характерен для изоляторов. Он происходит достаточно медленно, в результате чего теплопроводность изоляторов мала и сопоставима с теплопроводностью газов.

VI. Чем же вызвана столь большая теплопроводность металлов, которая в сотни и тысячи раз больше, чем у изоляторов? Дело, очевидно, в структуре металлов, в особенностях металлической связи.

В самом деле, если бы теплопроводность металлов определялась только колебаниями частиц в узлах кристаллической решетки, то она бы не отличалась от теплопроводности изоляторов. Но в металлах есть еще множество свободных электронов — *электронный газ*, который и обеспечивает их высокую теплопроводность.

В участке металла с высокой температурой часть электронов приобретает большую кинетическую энергию. Так как масса электронов очень мала, то они легко проскакивают десятки промежутков между ионами. Говорят, что у *электронов большая длина свободного пробега*. Сталкиваясь с ионами, находящимися в более холодных слоях металла, электроны передают им избыток своей энергии, что приводит к повышению температуры этих слоев.

Чем больше длина свободного пробега электронов, тем больше теплопроводность. Именно поэтому у чистых металлов, где в кристаллической решетке дефектов относительно мало, теплопроводность велика. У сплавов, где дефектов решетки гораздо больше, длина свободного пробега меньше, соответственно меньше и теплопроводность.

Вопросы для самопроверки

1. Какой вид теплообмена называется теплопроводностью?
2. Как доказать, что у разных веществ теплопроводность разная?
3. Какие вы знаете вещества с малой теплопроводностью?
4. Какие вы знаете тела с большой теплопроводностью?
5. Какие материалы используются в качестве теплоизоляторов? Приведите примеры.

Упражнения

1. В каком здании при одинаковой толщине стен теплее — в деревянном или кирпичном?

2. Почему из алюминиевой кружки трудно пить горячий чай, а из стеклянного стакана пить гораздо легче?
3. Теплопроводность расплавленного алюминия в 3 раза меньше, чем твердого. Чем это можно объяснить?
4. Почему теплопроводность стали и чугуна меньше, чем теплопроводность чистого железа?

§ 4.9. КОНВЕКЦИЯ

I. С помощью опыта можно убедиться, что имеется еще один способ теплообмена. Если подогревать воду в верхней части пробирки (рис. 4.7, а), то она в этом же месте и закипит, а внизу останется холодной. Это свидетельствует о плохой теплопроводности воды. Но если вы будете подогревать пробирку снизу, то вся вода прогреется и закипит по всему объему (рис. 4.7, б). Итак, во втором случае мы имеем дело с другой формой теплообмена — *конвекцией*. Выясним механизм этого процесса.

В большую колбу наливают воду (рис. 4.8). На дно колбы опускают несколько крупинок марганцовокислого калия. Вода у дна окрашивается. Когда колбу начинают нагревать горелкой, то видно, как со дна поднимается вверх поток воды, а около более холодных стенок вода опускается вниз. Так образуется непрерывная циркуляция жидкости, которая сопровождается переносом энергии. Эта циркуляция жидкости и называется *конвекцией*. Таким образом, можно дать определение: *конвекция — это процесс теплопередачи, осуществляемый путем переноса энергии потоками жидкости или газа*. (Слово «конвекция» образовано от греческого слова *convectio* — доставка, принесение.)

II. Явление конвекции можно объяснить законом Архимеда и явлением теплового расширения тел. При повышении температуры объем жидкости возрастает, а плотность уменьшается. Под действием архимедовых сил менее плотная нагретая жидкость поднимается вверх, а более плотная холодная жидкость опускается вниз. Если же жидкость нагревать сверху (см. рис. 4.7, а), то менее плотная теплая жидкость там и останется и конвекция не возникнет.

Так устанавливается круговорот жидкости, сопровождающийся переносом энергии от нагретых участков к более холодным. Совершенно аналогичным образом возникает конвекция в газах.

Данный процесс часто называется *естественной конвекцией*. Для ее возникновения требуется подогрев жидкости снизу (или охлаждение сверху), причем нагрев в разных участках должен быть неравномерным.

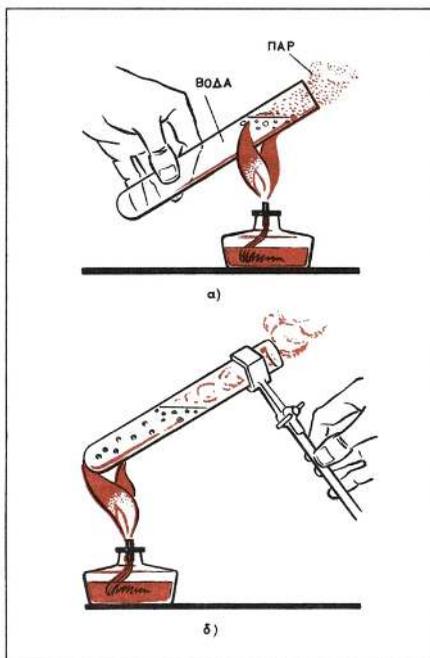


Рис. 4.7

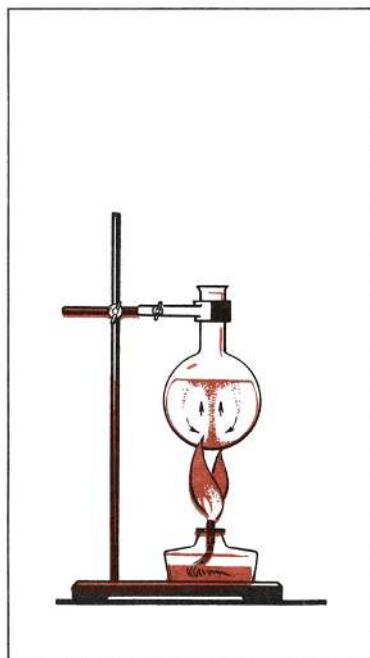


Рис. 4.8

Кроме естественной конвекции, возможна и *принудительная конвекция*: потоки нагретой (или охлажденной) жидкости или газа переносятся под действием насосов. Такая конвекция используется в тех случаях, когда естественная конвекция оказывается недостаточно эффективной, а также в состоянии невесомости, когда естественная конвекция невозможна.

III. Явление конвекции весьма распространено в природе.

Типичными примерами конвекции в атмосфере являются ветры, в частности бризы и муссоны, с которыми вы знакомились при изучении географии. Нагреваясь над одними участками Земли и охлаждаясь над другими, воздух начинает циркулировать, перенося с собой энергию и влагу. Явление это весьма сложное. На процесс естественной конвекции накладывается ряд факторов, в частности суточное вращение Земли, рельеф местности, влияние морских течений и т. д. Но в основе ветрообразования лежит именно явление конвекции.

Особенно прост и нагляден механизм возникновения берегового бриза. Днем суша прогревается быстрее воды, у которой теплоемкость очень велика. Поэтому температура

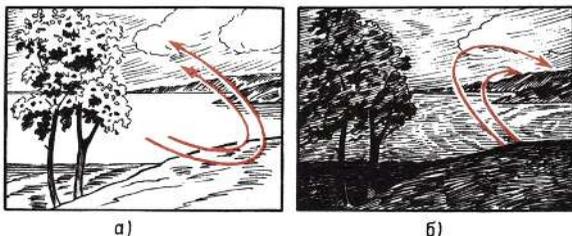


Рис. 4.9

суши выше температуры воды. Нагретый над сушей воздух поднимается вверх, на его место поступает холодный воздух с моря, и у поверхности Земли ветер дует с моря на берег (рис. 4.9,а). Ночью картина меняется на противоположную: земля быстрее остывает, вода сохраняет более высокую температуру, и ветер у поверхности Земли направлен с берега в сторону моря (рис. 4.9,б).

IV. С явлением конвекции связаны процессы горообразования. В первом приближении земной шар можно рассматривать как систему, состоящую из трех концентрических слоев (рис. 4.10). Внутри находится массивное ядро, состоящее в основном из металлов (железа, никеля и т. п.) в виде очень плотной жидкой массы. Радиус ядра равен примерно 3500 км. Ядро окружают полужидкая **мантия** и **литосфера** общей толщиной около 2900 км, состоящие из горных пород в твердом состоянии (слово «литосфера» образовано от греческого lithos — камень и sphaira — шар). Самый верхний слой литосферы, толщиной в среднем 60—70 км, — это *земная кора*.

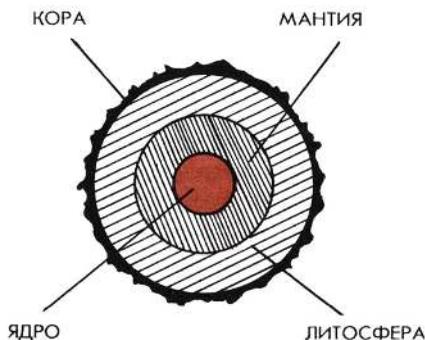


Рис. 4.10

Литосфера состоит из отдельных плит, которые как бы плавают на поверхности мантии. Дело в том, что вещество мантии находится под колоссальным давлением литосферы и приобретает за счет этого свойства очень вязкого, но все же текучего вещества. Вследствие неравномерного разогрева отдельных участков мантии, а также разной плотности горных пород в разных участках мантии в ней возникают конвективные потоки. Они вызывают перемещения литосферных плит, несущих континенты и ложа океанов.

Там, где литосферные плиты расходятся, возникают океанические впадины. В других местах, где плиты сталкиваются и одна из них наползает на другую, образуются горные массивы. При этом возникают неустойчивые участки с очень большими напряжениями — *сейсмические зоны*. При переходе этих участков в более устойчивое состояние происходят землетрясения.

Вещество мантии обладает колоссальной вязкостью. Поэтому скорость перемещения конвективных потоков в мантии очень мала. Соответственно мала и скорость перемещения литосферных плит (около 2—3 см за год). Однако за геологические эпохи порядка десятков миллионов лет литосферные плиты могут переместиться на сотни и тысячи километров.

Вопросы для самопроверки

1. В чем заключается явление конвекции? Приведите примеры.
2. Чем отличается конвекция от теплопроводности?
3. За счет каких сил происходит естественная конвекция? Как это связано с законом Архимеда?
4. Какая связь существует между конвекцией и тепловым расширением тел?
5. Что такое принудительная конвекция?
6. Как возникает ветер?
7. Какова роль конвекции в процессах, происходящих в мантии Земли?

Упражнения

1. Почему нагревательный элемент в электроплитке, электрочайнике и других нагревательных приборах размещается на дне прибора?
2. Почему в холодильниках морозильная камера помещается в верхней части корпуса, а не внизу? Поясните, как здесь происходит конвекция.
3. Возможна ли конвекция в твердых телах? Почему? Приведите примеры.

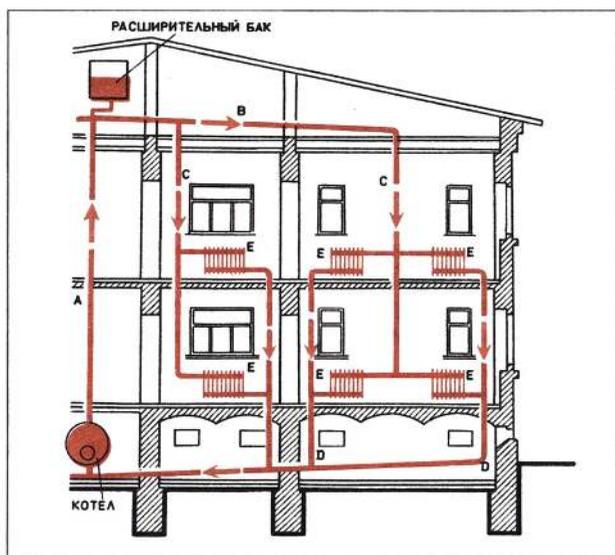


Рис. 4.11

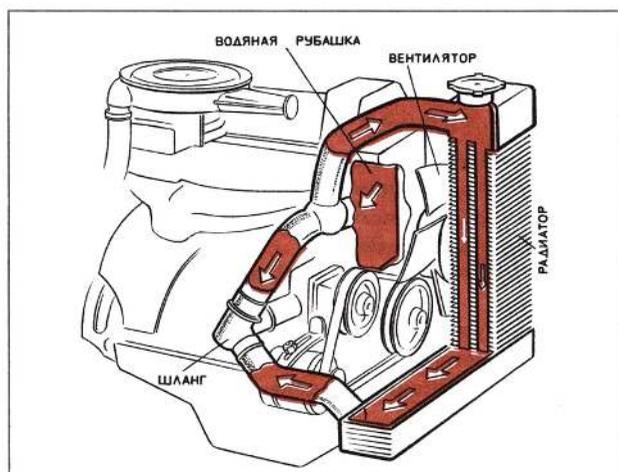


Рис. 4.12

4. Будет ли происходить естественная конвекция в кабине космического корабля в состоянии невесомости? Ответ обоснуйте.
5. Почему в водоеме, покрытом сверху льдом (см. рис. 3.17), конвекция не наблюдается и более теплая вода не всплывает на поверхность?

6. Объясните принцип работы водяного отопления (рис. 4.11).
7. Почему в высотных зданиях в системе водяного отопления устанавливаются нагнетательные насосы?
8. Объясните принцип действия водяного охлаждения автомобильного двигателя (рис. 4.12). Какую роль здесь играет вентилятор?
9. Будет ли свеча гореть в кабине космического корабля в состоянии невесомости? Ответ обоснуйте.

§ 4.10. ЛУЧИСТЫЙ ТЕПЛОБМЕН

I. Существует еще один вид теплообмена, играющий очень важную роль в природе. С проявлениями этого вида теплообмена мы встречаемся повседневно. Солнечное излучение — основа жизни на Земле; оно поддерживает на Земле теплый климат. За счет энергии солнечного излучения в зеленых листьях растений происходит синтез углеводов (крахмала) из неорганических веществ — оксида углерода (IV) и воды. За счет этой же энергии далее идет синтез белков и жиров. Растения служат пищей для животных, которые фактически используют при этом энергию солнечного излучения.

Сжигая каменный уголь, торф, нефть, газ, дрова и другие виды топлива, мы используем энергию солнечного излучения, запасенную древними растениями или другими организмами. Круговорот воды в природе, атмосферная циркуляция — все это результат нагрева отдельных участков Земли солнечным излучением. Значит, тепловые, гидравлические и ветряные электростанции работают фактически также за счет энергии солнечного излучения.

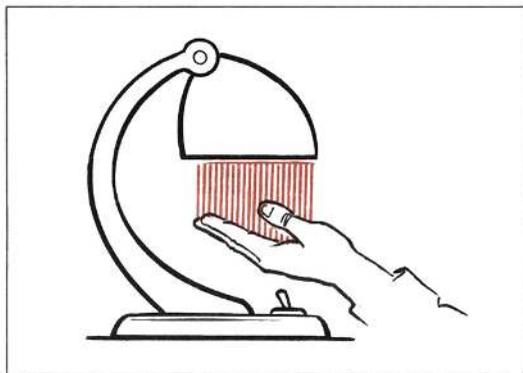


Рис. 4.13

II. С лучистым теплообменом мы встречаемся в быту. Если вы зажжете настольную лампу и подставите руку, как показано на рисунке 4.13, то почувствуете тепло. Однако теплообмен в данном случае — это не теплопроводность и не конвекция. Теплообмен имеет другую природу.

В самом деле, теплопроводность воздуха мала. Что же касается конвекции, то за счет этого процесса нагреваются тела над лампой, а не под ней. Значит, здесь мы имеем дело с другим видом теплообмена — *лучистым теплообменом*.

Точно так же путем лучистого теплообмена мы ощущаем тепло от костра, нагретой печи, раскаленного куска металла или тлеющих углей и т. д.

III. Передача тепла от горячего тела к холодному путем теплопроводности возможна лишь в том случае, если между этими телами находится вещество: газ, жидкость или твердое тело. Конвекция возможна также лишь в том случае, если между горячим и холодным телами имеется вещество в виде газа или жидкости. Лучистый теплообмен хорошо происходит и в вакууме, т. е. в пространстве, где практически нет вещества. (Слово «вакуум» образовано от латинского слова *vacuum* — пустота.) Так, излучение от Солнца до Земли, расположенных друг от друга на расстоянии 150 млн. км, проходит через очень высокий, космический вакуум. Однако лучистый теплообмен возможен и через вещество, прозрачное для данного вида излучения.

IV. Что же такое лучистый теплообмен?

Лучистым теплообменом называется процесс переноса энергии от одного тела к другому с помощью электромагнитного излучения.

Электромагнитное излучение — это электромагнитные волны: радиоволны, инфракрасное, ультрафиолетовое, рентгеновское излучения, а также излучение видимое, т. е. свет. Об этом подробно будет сказано в IX классе.

V. Характер излучения существенно зависит от температуры тела. Так, при температурах до 600 °C испускается невидимое инфракрасное излучение, которое мы хорошо воспринимаем кожей. Хотя при низких температурах мощность излучения очень мала, оно может быть зарегистрировано специальными чувствительными приборами, которые называются *тепловизорами*. Эти приборы позволяют человеку различать тела на расстояниях 10—15 км, несмотря на то что температура этих тел всего на несколько градусов отличается от температуры окружающей среды.

Тепловизоры, иногда называемые приборами ночного видения, широко применяются в медицинской диагностике, в военном деле, в навигации, геологоразведке и т. д.

VI. При температурах порядка 800°C тело испускает гораздо больше энергии и появляется видимое излучение вишнево-красного цвета. С повышением температуры до $1000\text{--}2000^{\circ}\text{C}$ мощность излучения еще более возрастает и возникает излучение оранжевого и желтого цвета.

При температуре около 6000°C (температура поверхности Солнца) излучение становится голубовато-белым. Но это не значит, что в нем есть только видимое глазом излучение. В нем присутствует и инфракрасное излучение, которое в основном и дает ощущение тепла, а также ультрафиолетовое излучение, действие которого вызывает загар, и рентгеновское излучение.

При еще более высокой температуре, около $10\,000\text{--}15\,000^{\circ}\text{C}$, цвет излучения становится голубым. Именно по цвету звезд в астрономии определяют их температуру.

VII. Все ли тела одинаково нагреваются с помощью электромагнитного излучения, которое они поглощают?

Чтобы ответить на этот вопрос, рассмотрим следующий опыт (рис. 4.14). К жидкостному манометру подсоединяют теплоприемник — металлическую коробочку, у которой одна сторона блестящая, а другая — темная. Сначала коробочку подносят темной стороной на небольшое расстояние к нагретой гире. Видят, что уровень жидкости в одном колене манометра опускается, а в другом — поднимается. Это происходит потому, что под действием инфракрасного излучения, испускаемого гирей, нагрелась темная сторона коробочки, а от нее и воздух в ней. Он стал сильнее давить на жидкость в манометре. Если коробочку подносят блестящей стороной к гире, то уровень жидкости в коленах манометра меняется гораздо меньше. Из опыта можно сделать вывод: *темные тела лучше нагреваются излучением, чем блестящие*. Это происходит потому, что темные тела хорошо поглощают по-

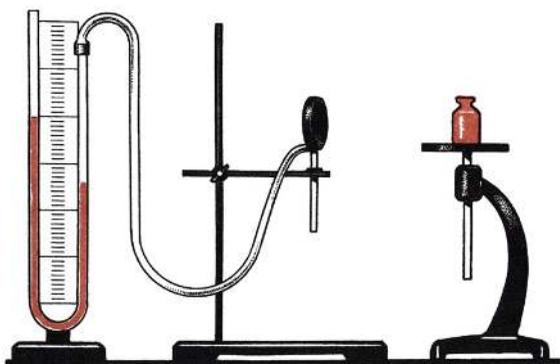


Рис. 4.14



Рис. 4.15

ступающие к ним электромагнитные волны, а тела с блестящей и светлой поверхностью большую часть поступающих электромагнитных волн отражают.

VIII. Опыт показывает, что мощность излучения зависит не только от температуры излучающего тела, но и от его цвета. Сильнее всего излучают при данной температуре черные тела, гораздо слабее — белые или зеркальные. В этом позволяет убедиться следующий опыт.

В сосуд кубической формы, у которого одна боковая стенка черная, вторая — серая, третья — белая и четвертая — зеркальная, наливают горячую воду. Вблизи сосуда ставят приемник излучения, связанный с манометром (рис. 4.15). Помещая приемник на одном и том же расстоянии от различных стенок сосуда, сравнивают, какая из них излучает сильнее, а какая — слабее. Опыт показывает, что сильнее всего излучает черная стенка, слабее — серая, еще слабее — белая и совсем слабо излучает зеркальная, хотя температуры всех стенок одинаковы.

Вопросы для самопроверки

1. Какое явление называется лучистым теплообменом?
2. Какие виды теплообмена возможны в вакууме?
3. Солнце — источник жизни на Земле. Можете ли вы обосновать это утверждение?
4. Какие виды излучения вам известны?
5. Какие тела лучше поглощают излучение? Опишите опыты.
6. Какие тела лучше излучают? Опишите опыты.
7. Как по цвету звезд оценивается их температура?

Упражнения

1. Хорошо ли нагревается зеркало?

2. На рисунке 4.16 показано устройство термоса, который представляет собой стеклянный сосуд 1 с двойными стенками. Из пространства между стенками удален воздух. Стеклянный сосуд помещается в металлический кожух 2. Стенки сосуда изнутри и снаружи покрыты зеркальным слоем. Объясните, зачем это сделано. Какую жидкость — горячую или холодную — можно хранить в таком термосе?

3. Почему пожарные носят на голове блестящие металлические каски?

4. Какие почвы при одинаковых условиях сильнее прогреваются на солнце: черноземные или подзолистые?

5. Почему летом люди предпочитают носить светлую одежду, а не темную?

6. Какой снег скорее тает весной: чистый на полях или грязный в городах?

7. Почему холодильные вагоны и домашние холодильники окрашивают в белый цвет?

8. Можно ли по цвету раскаленного металла или угля оценить его температуру?

9. Почему при выходе в открытый космос космонавты надевают белые скафандры, а лицо перекрывают посеребренным полупрозрачным экраном?

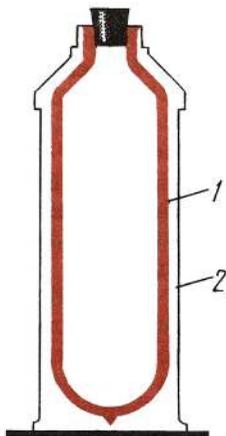


Рис. 4.16

§ 4.11. ЗАКОНЫ ТЕРМОДИНАМИКИ

I. Рассмотренные выше закономерности тепловых явлений являются частью общей теории, изучающей условия превращения энергии из одного вида в другой и характеризующей эти превращения количественно, не вникая в микроструктуру вещества. Эта общая теория называется *термодинамикой*. (Слово «термодинамика» образовано от греческих слов *therme* — тепло и *dynamis* — сила.)

Основу термодинамики составляют два закона, которые часто называют началами или принципами термодинамики.

II. *Первый закон термодинамики* является обобщением закона сохранения энергии для систем, где наряду

с механическими и электрическими процессами происходят тепловые и химические процессы.

Математически первый закон термодинамики записывается следующим образом:

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

что означает: *количество теплоты, полученное системой, расходуется на изменение ее внутренней энергии и на работу, производимую системой против внешних сил.*

Конечно, возможны случаи, когда одна из величин равна нулю. Например, если система не производит работы, т. е. $A = 0$, то вся полученная теплота расходуется на изменение внутренней энергии самой системы. Когда же система теплоизолирована, т. е. $Q = 0$ и система не вступает в теплообмен с окружающей средой, то она совершает работу за счет уменьшения своей внутренней энергии. Возможны и другие процессы, описываемые первым законом термодинамики.

III. *Второй закон термодинамики связан с необратимостью тепловых явлений, с их односторонней направленностью.*

Так, явление диффузии необратимо. Сахар сам собой растворяется в воде, однако он никогда из раствора сам по себе не выделится и вода не станет пресной. Точно то же можно сказать и о диффузии газов.

Это не значит, что сахар нельзя выделить из раствора. Если дать раствору выкипеть, а испарившуюся воду сконденсировать, то мы получим отдельно сахар и отдельно пресную воду. Но это — не самопроизвольный процесс, он требует затраты энергии на выпаривание воды из раствора и отвод тепла при конденсации пара. А вот сам процесс диффузии идет самопроизвольно, без внешнего вмешательства. Это и означает, что процесс диффузии необратим.

IV. Необратим и процесс теплообмена. Энергия путем теплообмена самопроизвольно переходит от горячего тела к более холодному, а обратный процесс сам по себе не происходит.

Обобщая это свойство тепловых явлений, Р. Клаузиус в 1850 г. предложил одну из формулировок второго закона термодинамики, который называют *постулатом Клаузиуса: невозможен процесс, единственным результатом которого был бы переход энергии путем теплообмена от холодного тела к более теплomu.*

Обращаем ваше внимание на слова «единственным результатом». Дело в том, что мы не утверждаем, будто

теплота не может передаваться от холодного тела к более теплomu. Это сделать можно, о чем свидетельствует принцип действия холодильника (см. § 5.6).

В самом деле, в холодильнике энергия от морозильной камеры передается более теплomu воздуху. Именно поэтому и поддерживается низкая температура морозильной камеры. Однако этот процесс в работе холодильника не является единственным. Перекачка теплоты от холодного тела к более теплomu осуществляется за счет электрической энергии, которая поступает к холодильнику от сети.

Но самопроизвольно, в качестве единственного результата, такой процесс невозможен.

Вопросы для самопроверки

1. Как формулируется первый закон термодинамики? Дайте словесную и математическую формулировки.
2. Может ли система совершить работу, не получив при этом энергию извне путем теплообмена?
3. Приведите примеры необратимости явления диффузии.
4. Приведите примеры необратимости явления теплообмена.
5. Может ли энергия путем теплообмена переходить от холодного тела к более теплomu?
6. Сформулируйте постулат Клаузиуса.

Упражнения

1. Газ, расширяясь, совершил работу. Предположим, что система теплоизолирована. Изменится ли температура газа? Ответ обоснуйте.
2. Газу передано количество теплоты, равное 5 кДж. При этом он совершил работу, равную 2 кДж. Как изменилась внутренняя энергия газа?
3. Возможен ли процесс, при котором газу передается количество теплоты 7 кДж, а он при этом совершает работу 10 кДж? Что в этом случае произойдет с внутренней энергией газа; с его температурой?
4. Возможен ли процесс, при котором газ совершит работу, равную тому количеству теплоты, которое ему передано? Что можно сказать о внутренней энергии газа при таком процессе?
5. Какому из законов термодинамики противоречит допущение о самопроизвольном переходе энергии путем теплообмена холодного тела к горячему: первому; второму; обоим? Ответ обоснуйте.

4.1. Сравните по ощущению температуру деревянной ложки и металлической до погружения их в горячую воду, а затем через 4—5 мин после погружения. Объясните причину ощущения разной температуры для ложек как в первом, так и во втором случаях. Тот же опыт проделайте с посеребренной, алюминиевой и мельхиоровой ложечками.

4.2. Подержите над баллоном электрической лампы или над пламенем свечи деревянный цилиндр, завернутый в бумагу. При этом бумага быстро обугливается. Объясните, почему этого не происходит, если в бумагу завернуты металлические предметы (гиря, цилиндр, трубка).

4.3. Измерьте наружным термометром температуру воздуха у цоколя и над баллоном настольной электрической лампы накаливания. Объясните, куда идет теплый воздух.

4.4. Пламя свечи, газовой горелки часто коптит. Если поднести сверху вертикальную трубку из стекла, диаметр которой больше ширины пламени, то копоть исчезнет. Она появится снова, если трубку закрыть сверху. Изучите и объясните это явление.

4.5. При осмотре камеры холодильника вы увидите, что трубки испарителя размещены в верхней части аппарата. Какой вид теплопередачи учитывается при этом?

4.6. В стакан, где находится холодная вода, осторожно долейте горячей. Измерьте температуру воды у дна стакана, в его середине и у поверхности. Где температура выше и почему? Как получить воду с одинаковой температурой по всей глубине стакана?

4.7. Используя термометр, определите скорость естественного перемешивания воды в случае, когда горячую воду наливают в холодную, холодную воду наливают в горячую. Объемы холодной и горячей воды следует взять одинаковыми. В чем причина различной скорости выравнивания температуры?

4.8. Опустите в стакан с горячей водой термометр и через каждые 30 с отмечайте его показания. Постройте график остывания воды в зависимости от времени. По графику объясните, когда вода остывала быстрее — в начале или в конце опыта.

4.9. В кружку или чашку известной емкости налейте заварку чая до половины и измерьте ее температуру наружным термометром. Заполните кипятком эту чашку, перемешайте смесь термометром и снова измерьте темпера-

туру. Рассчитайте и сравните количество теплоты, полученное заваркой, с количеством теплоты, отданным кипятком. Считайте удельную теплоемкость воды и заварки одинаковой.

4.10. Определите количество теплоты, выделенное за 45 мин вашим организмом, если известно, что 1 кг человеческого тела излучает каждую секунду 1,6 Дж энергии. Какова мощность вашего тела как излучателя теплоты?

4.11. Во время болезни люди пользуются грелкой с водой или мешочком с песком. Какой из предметов, согревающих тело человека и имеющих одинаковую температуру и массу, отдает больше теплоты при остывании до одной и той же температуры? Проверьте это экспериментально.

Г Л А В А 5. ТЕПЛОВЫЕ МАШИНЫ

§ 5.1. ТЕПЛОВЫЕ МАШИНЫ И РАЗВИТИЕ ТЕХНИКИ

I. Прогресс человечества теснейшим образом связан с развитием энергетики. Овладение новым источником энергии, открытие новых путей ее преобразования и использования — это обычно целая эпоха в истории материальной культуры.

Мощный расцвет промышленности в XIX в. был связан с изобретением и использованием паровых машин и двигателя внутреннего сгорания, создание которого послужило базой для развития автомобильного транспорта и самолетостроения. Газовая турбина в последние три десятилетия вызвала переворот в авиации, тихоходные самолеты с поршневыми двигателями были заменены реактивными и турбовинтовыми лайнерами, скорость которых приближается к скорости звука, а иногда и превышает ее. С помощью реактивных тепловых двигателей осуществлена вековая мечта человечества — выход в космическое пространство.

Основная доля электроэнергии вырабатывается тепловыми электростанциями, генераторы которых приводятся в действие паровыми турбинами. На атомных электростанциях энергия, выделяющаяся при ядерных реакциях, также преобразуется сначала в энергию пара, который приводит в движение паровую турбину, а последняя — ротор генератора, в котором вырабатывается электрический ток.

II. Все тепловые машины, независимо от их конструкции, по своему назначению делятся на два типа: *тепловые двигатели* и *холодильные установки*.

Тепловые двигатели, независимо от их конструктивных особенностей, решают одну и ту же задачу — *превращение внутренней энергии в механическую*. Для этой цели энергия, выделяющаяся при сгорании топлива или ядерных реакциях, передается путем теплообмена какому-либо газу. Расширяясь, газ производит работу против внешних сил, приводя в движение какой-либо механизм.

Холодильные установки служат для того, чтобы, отбирая некоторое количество теплоты от холодного тела, например морозильной камеры, поддерживать в ней низкую температуру.

Вопросы для самопроверки

1. Какую роль тепловые машины сыграли в развитии промышленности и транспорта? Приведите примеры.

2. В каких устройствах используются тепловые двигатели? Приведите примеры.
3. На какие два типа подразделяются все тепловые машины?
4. Какую задачу решают тепловые двигатели?
5. Какую задачу решают холодильные установки?

§ 5.2. ПАРОВАЯ ТУРБИНА

1. На рисунке 5.1 приведена схема паросиловой установки с паровой турбиной. Из котла 1 в паропровод 2 выходит перегретый водяной пар с температурой около 300—500 °С и давлением 17—23 МПа.

Пар приводит во вращение ротор паровой турбины 3, которая приводит во вращение ротор электрического генератора 4, вырабатывающего электрический ток. Отработанный пар поступает в конденсатор 5, где сжижается. Образовавшаяся вода с помощью насоса 6 поступает в паровой котел и снова превращается в пар. Распыленное жидкое или твердое топливо сгорает в топке 7, подогревая тем самым котел. На рисунке 5.2 дан разрез турбины. Паропровод соединен с неподвижным барабаном 1 паровой турбины, на котором установлена система сопел — расширяющихся трубок особой конфигурации. Такие же сопла имеются и на вращающейся части турбины 2 — ее роторе. Путь пара из паропровода через сопла барабана 1 и ротора 2 показан на разрезе участка барабана и ротора (5.3).

Профиль сопла рассчитан таким образом, чтобы пар, пе-

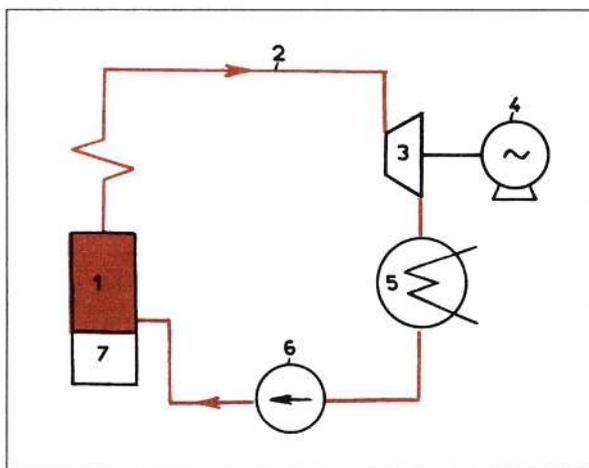


Рис. 5.1

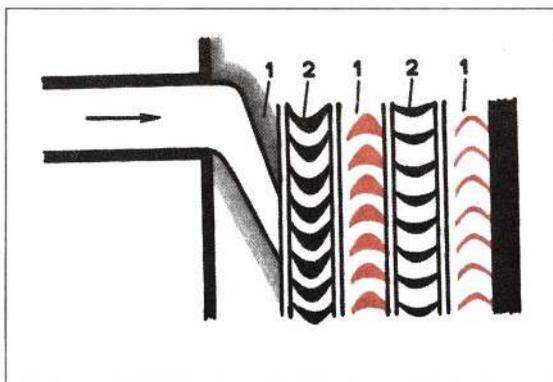


Рис. 5.2

реходя через него, интенсивно расширялся. При этом температура и давление пара резко уменьшаются и из сопла струя пара вырывается с очень большой скоростью, порядка 600—800 м/с. Таким образом, с помощью сопла внутренняя энергия горячего пара превращается в кинетическую энергию струи пара.

II. Вплотную с барабаном расположен *ротор* турбины — вращающийся диск с системой лопаток 2 (рис. 5.2 и 5.3). Струи пара, с огромной скоростью вырывающиеся из сопел, направляются на лопатки ротора турбины, дают на них и приводят ротор во вращение с большой скоростью, обычно 50 оборотов в секунду. Происходит преобразование внутренней энергии пара в механическую энергию вращения ротора турбины, основанное на известном вам явлении: *газ (пар), расширяясь при выходе из сопла, совершает работу и охлаждается.*

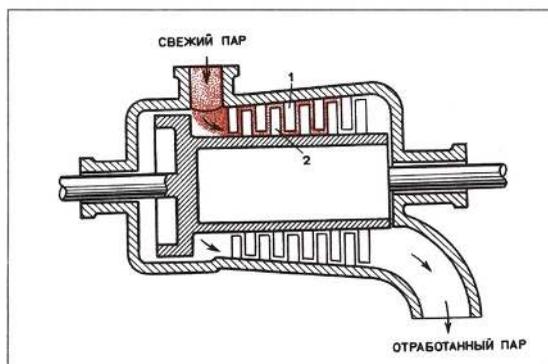


Рис. 5.3

Первая паровая турбина, нашедшая практическое применение, была изготовлена Г. Лавалем в 1889 г.

III. Основной причиной потерь энергии в паровой турбине является неполное использование внутренней энергии пара, поскольку он покидает ротор еще довольно горячим. Потери будут тем меньше, чем больше разность температур между паром, входящим из котла в сопло, и паром, сходящим с лопаток ротора.

Чтобы полнее использовать энергию пара, ротор турбины делают многодисковым: пар совершает работу на первом диске ротора и, несколько охладившись, направляется на сопла и лопасти следующих дисков (см. рис. 5.3). Там пар вновь расширяется и охлаждается еще больше, совершая дополнительную работу. Затем пар направляется к следующему диску. Этот процесс повторяется до тех пор, пока пар не охладится до температуры немного выше 100°C . Такая турбина называется многоступенчатой.

IV. Потери энергии возникают и в том случае, когда отработанный пар выбрасывается непосредственно в атмосферу. Следовательно, ему необходимо преодолеть атмосферное давление. Поэтому обычно в паросиловых установках устанавливается конденсатор, охлаждаемый холодной водой. Давление внутри конденсатора оказывается в несколько раз меньше атмосферного. Отработанный пар выходит из последней ступени турбины, встречая минимальное сопротивление.

Сконденсировавшаяся в конденсаторе вода оказывается очень чистой, почти дистиллированной. Она вновь направляется в котел, что позволяет избежать образования накипи на его стенках и в трубках.

Несмотря на непрерывное совершенствование паровых турбин, их КПД не превышает 40%.

V. Важной частью паросиловой установки является паровой котел. В топке парового котла сжигают либо твердое топливо (уголь, сланцы, торф), либо жидкое топливо (нефть, мазут) или природный газ. Для лучшего сгорания твердого топлива его дробят, растирают в пыль и вдувают воздушной струей в топку; жидкое топливо струей воздуха разбрызгивают с помощью форсунок. Распыленное топливо хорошо сгорает, практически не давая сажи в продуктах сгорания.

Разогретые до температуры около 1000°C продукты сгорания проходят через паровой котел, где отдают воде и пару значительную часть своей внутренней энергии. Чтобы продукты сгорания не выбрасывались в атмосферу еще горячими и не уносили с собой значительное количество теплоты, нужно облегчить теплопередачу от горячих газов воде и водяному пару, увеличив площадь разделяющих их перегородок и их теплопроводность.

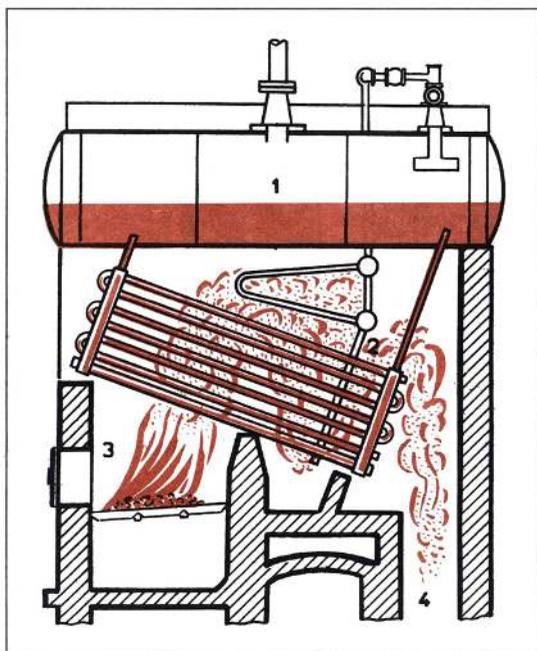


Рис. 5.4

Одной из наиболее удачных конструкций котла является водотрубный котел (рис. 5.4). Вода из цилиндра 1 поступает в змеевик 2 из тонкостенных труб, заполняющих почти все пространство топки 3 и дымохода 4. Продукты сгорания топлива проходят в промежутках между большим числом труб змеевика и передают им практически весь избыток внутренней энергии. Проходя по трубам змеевика, вода испаряется; образовавшийся пар при своем продвижении по змеевику нагревается до температуры около 300—500°C.

Вопросы для самопроверки

1. По рисунку 5.1 ознакомьтесь со схемой паросиловой установки. Каково назначение котла; топки; паровой турбины; конденсатора?
2. Каково назначение сопла?
3. Каково назначение ротора турбины?
4. С какой целью паровую турбину делают многоступенчатой?
5. Как устроен водотрубный паровой котел?

§ 5.3. ДВИГАТЕЛЬ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ

I. Двигателем внутреннего сгорания (ДВС) называется тепловая машина, в которой в качестве рабочего тела используются газы высокой температуры, образующиеся при сгорании жидкого или газообразного топлива непосредственно внутри камеры поршневого двигателя или газовой турбины. Таким образом, в ДВС отсутствует самая громоздкая часть паросиловой установки: котел с топкой.

Первый поршневой двигатель внутреннего сгорания был создан в 1860 г. французским инженером Э. Ленуаром. КПД его двигателя был равен 3,3%. Но достоинства этого двигателя были очевидны: малые размеры и масса. Его совершенствование пошло очень быстро.

Это позволило использовать двигатель внутреннего сгорания на транспорте (автомобиль, трактор, тепловоз), в авиации, на кораблях (дизель-электроход, катер, подводная лодка и т. д.). Современное общество немислимо без широкого использования разнообразных типов двигателей внутреннего сгорания.

В качестве примера рассмотрим четырехтактный автомобильный двигатель.

II. Схематический разрез одного цилиндра автомобильного двигателя показан на рисунке 5.5. Здесь имеется цилиндр 1, вверху которого расположена камера сгорания 2. Вдоль цилиндра совершает возвратно-поступательное движение поршень 3. В камере сгорания имеются два клапана: входной 4 и выходной 5. В верхней части камеры находится запальная свеча 6. Поршень с помощью шатуна 7 и

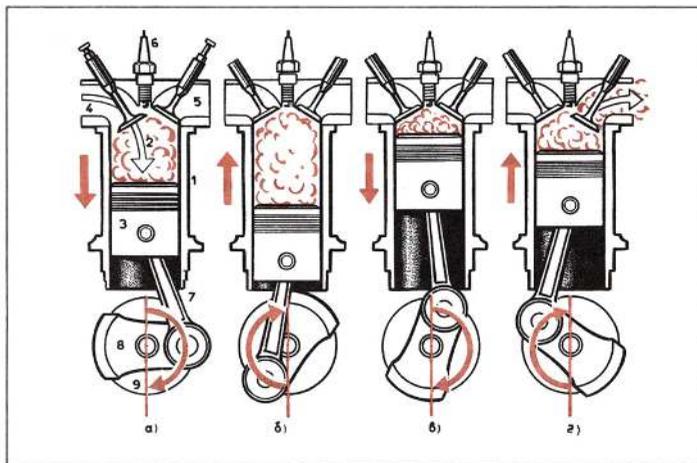


Рис. 5.5

кривошипа 8 соединен с коленчатым валом, который связан еще с несколькими цилиндрами в четырехцилиндровом или шестцилиндровом двигателях. За счет действия шатунов и кривошипов коленчатый вал вращается, приводя во вращение связанный с ним механизм, например колеса автомобиля или ротор генератора. На оси коленчатого вала насажен массивный маховик 9, который сглаживает неравномерность его вращения. Система зубчатых колес, приводимых во вращение, с помощью специальных кулачков позволяет в нужные моменты открывать и закрывать клапаны 4 и 5.

Каждый ход поршня вверх или вниз называется тактом. Рассмотрим процессы, происходящие в течение каждого такта.

III. Пусть поршень движется вниз из крайнего верхнего положения (рис. 5.5,а) и впускной клапан 4 открыт. При опускании поршня через этот клапан в камеру сгорания всасывается горючая смесь — пары бензина с воздухом. Этот такт называется *всасыванием*. В конце такта клапан 4 закрывается, клапан 5 тоже закрыт.

Поршень начинает подниматься вверх, сжимая горючую смесь (рис. 5.5,б). Этот такт называется *сжатием*. Незадолго до того как поршень придет в крайнее верхнее положение, в запальной свече 6 проскакивает искра, и горючая смесь воспламеняется.

Третий такт двигателя (рис. 5.5,в) называется *рабочим ходом*. У газообразных продуктов сгорания температура достигает 1600—1800 °С, а давление соответственно 1—10 МПа. Эти газы с большой силой давят на поршень, который опускается вниз и с помощью шатуна и кривошипа приводит во вращение коленчатый вал.

В конце рабочего хода, когда поршень приходит в крайнее нижнее положение, открывается выхлопной клапан (рис. 5.5, г). Начинается четвертый такт — *выхлоп*. Поршень, поднимаясь вверх, выталкивает отработавшие газы в атмосферу. После этого начинается снова первый такт — всасывание горючей смеси.

Таким образом, за полный цикл совершается лишь один рабочий такт, остальные три являются подготовительными. Следовательно, такой двигатель не может самостоятельно начать работу. Его вал надо раскрутить, для чего и служит специальный электрический двигатель — *стартер*.

IV. Рассмотренный выше двигатель может работать на бензине или природном газе. Но есть еще один тип ДВС, работающий на более тяжелых сортах топлива: керосине, нефти и др. Это дизельный двигатель внутреннего сгорания. Внедрил его немецкий изобретатель Р. Дизель (1897). Рассмотрим работу четырехтактного дизеля.

В течение первого такта происходит всасывание атмосферного воздуха. Во время второго такта воздух быстро сжимается, и его температура возрастает примерно до 1000°C . В конце сжатия с помощью форсунки в камеру сгорания впрыскивается распыленное дизельное топливо, которое воспламеняется за счет высокой температуры сжатого воздуха. Таким образом, в дизеле не нужна запальная свеча. Рабочий ход и выхлоп у дизеля практически такие же, как у бензиновых ДВС.

До последнего времени дизели из-за их массивности устанавливались на тракторах, а также на разного рода судах. В последнее время удалось сконструировать компактные дизели и для автомобилей.

V. Как бензиновый ДВС, так и дизель выбрасывают в атмосферу весьма горячие газы (около $500\text{--}600^{\circ}\text{C}$). Это снижает их КПД: у бензиновых двигателей он равен $20\text{--}25\%$, у дизеля — $30\text{--}36\%$.

Вопросы для самопроверки

1. Какая тепловая машина называется двигателем внутреннего сгорания?
2. По рисунку 5.5 ознакомьтесь со схемой автомобильного ДВС. Каково назначение отдельных элементов?
3. Какие явления происходят в течение четырех тактов работы ДВС?
4. В чем преимущества ДВС по сравнению с паросиловой установкой?
5. Чем отличаются четыре такта работы дизеля от бензинового двигателя?

§ 5.4. ГАЗОВАЯ ТУРБИНА И РЕАКТИВНЫЕ ДВИГАТЕЛИ

I. Достоинства паровой турбины и двигателя внутреннего сгорания объединены в *газовой турбине*. Важное преимущество этой турбины — упрощенное преобразование внутренней энергии газа во вращательное движение вала; в турбине нет кривошипно-шатунного механизма. С другой стороны, как и в любом двигателе внутреннего сгорания, в газовой турбине отсутствуют топка и котел.

В камеру сгорания газовой турбины с помощью компрессора подается сжатый воздух при температуре примерно 200°C и впрыскивается жидкое топливо (керосин, мазут) под большим давлением. Во время горения топлива воздух и продукты от сгорания нагреваются до

температуры 1500—2200 °С. Движущийся с большой скоростью газ направляется на лопасти турбины. Переходя от одного ротора турбины к другому, газ отдает свою внутреннюю энергию, приводя ротор во вращение. Получаемая механическая энергия используется для вращения, например, винта самолета или электрического генератора.

Объединение преимуществ ДВС и турбины в одной установке позволило создать двигатель с большой мощностью, что определило преимущественное применение газовых турбин в авиации.

II. В ракетах горючее (например, пороховой заряд) сгорает в камере сгорания и образовавшиеся газы с большой силой давят на стенки камеры. С одной стороны камеры имеется сопло, через которое продукты сгорания вырываются в окружающее пространство. С другой стороны расширяющиеся газы давят на ракету как на поршень и толкают ее вперед. Такие двигатели получили название реактивные. Итак, в реактивном двигателе внутренняя энергия топлива непосредственно преобразуется в кинетическую энергию движущегося аппарата.

Пороховые ракеты являются двигателями на твердом топливе. Они постоянно готовы к работе, легко запускаются, но остановить начавший работать двигатель невозможно, тем более невозможно управлять его работой. Значительно надежнее в управлении *жидкостные ракетные двигатели* (ЖРД), подачу топлива в которые можно регулировать.

Впервые возможность и необходимость использования ЖРД для запуска человека в космическое пространство были обоснованы К. Э. Циолковским в 1903 г. Он предложил конструкцию ракеты, схема которой показана на

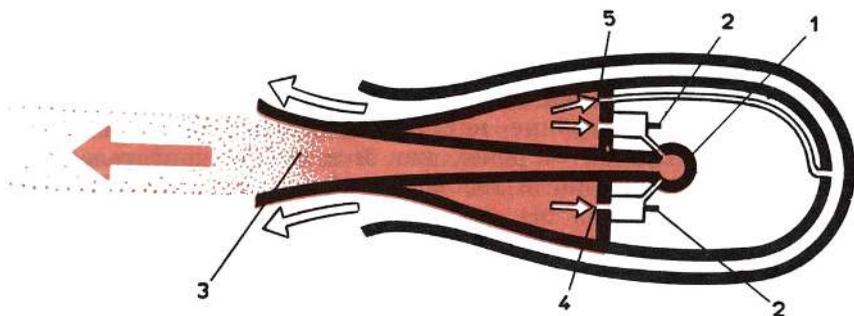


Рис. 5.6

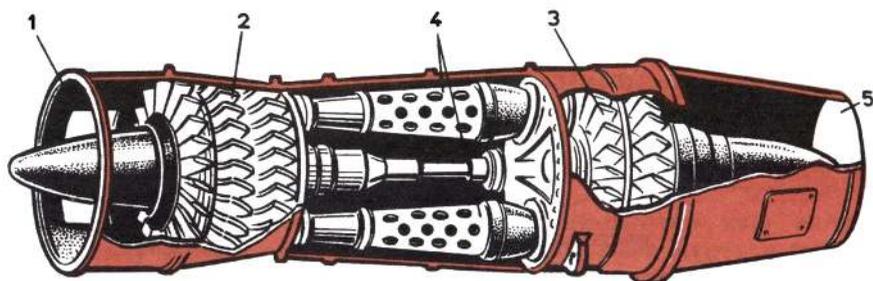


Рис. 5.7

рисунке 5.6. Здесь 1 — камера сгорания, 2 — насосы, 3 — выходное сопло, 4 — жидкое горючее, 5 — окислитель.

III. В ракетных двигателях имеются специальные камеры, наполненные веществом, окисляющим горючее. Но для окисления горючего можно использовать кислород непосредственно из атмосферы. На рисунке 5.7 показан разрез *турбокомпрессорного воздушно-реактивного двигателя* (ТКВРД), который устанавливается на реактивных самолетах.

Воздух через входное сопло 1 попадает в компрессор 2, сидящий на одном валу с газовой турбиной 3, сжимается до давления в 6—7 раз больше атмосферного. Сжатый воздух поступает в камеру сгорания 4. Туда же форсунками непрерывно подается распыленное жидкое топливо. Продукты сгорания, температура которых около 800°C и давление порядка $0,5\text{--}0,8$ МПа, попадают на лопасти ротора газовой турбины 3, который приводят во вращение с частотой около 70—80 об/с. При этом температура продуктов сгорания уменьшается до 550°C , давление — до $0,2$ МПа. Горячие газы вытекают через выходное сопло 5; при этом их температура падает до $400\text{--}480^{\circ}\text{C}$, давление — до $0,12$ МПа, а скорость вытекающей струи достигает 500 м/с. Эта струя и создает реактивную силу тяги. Такой двигатель, установленный на первом в нашей стране реактивном пассажирском самолете Ту-104 (1956), используется и сейчас на известных всему миру самолетах. На рисунке 5.8 показана схема этого двигателя.

Заметим, что в турбокомпрессорном воздушно-реактивном двигателе реализуются те же четыре такта, что и в дизеле — *всасывание воздуха, его сжатие, сгорание топлива и выхлоп*. Разница лишь в том, что в дизеле

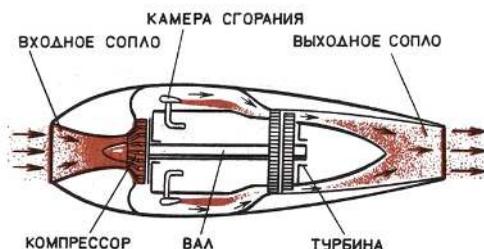


Рис. 5.8

все четыре такта осуществляются в одном и том же месте (в цилиндре и камере сгорания), но последовательно в разные моменты времени, а в реактивном двигателе все эти такты происходят одновременно, но в разных участках.

Вопросы для самопроверки

1. В чем преимущества газовой турбины перед паровой и поршневым ДВС?
2. Как устроена и действует ракета на твердом топливе? Может ли она двигаться в безвоздушном пространстве?
3. Чем воздушно-реактивный двигатель отличается от ракеты? Может ли он двигаться в безвоздушном пространстве?

§ 5.5. КОЭФФИЦИЕНТ ПОЛЕЗНОГО ДЕЙСТВИЯ ТЕПЛООВОГО ДВИГАТЕЛЯ

I. У всех тепловых двигателей КПД невысок, он не достигает даже 50%. А это означает, что более половины энергии, содержащейся в топливе, теряется. Естественно, что перед учеными встал вопрос: как повысить КПД тепловых двигателей? Как уменьшить потери?

Оказалось, что основная причина низкого КПД тепловых двигателей заключается в том, что пар или газ, получив энергию от сгоревшего топлива, не может ее полностью превратить в механическую энергию. После того как газ совершил работу при расширении, он удаляется из машины, имея достаточно высокую температуру, следовательно, обладая еще большой внутренней энергией.

II. В самом деле, в паровой турбине пар, покидая лопасти последней ступени, имеет еще температуру выше 100 °С, а это значит — и большой запас внутренней энергии. В конденсаторе он отдает эту энергию воде и конденсируется, что

может использоваться лишь для обогрева помещений, но работу уже произвести нельзя.

При выхлопе из цилиндра ДВС газ выходит при температуре около 500—600 °С, из газовой турбины — при температуре около 400—500 °С. Эта теплота идет на нагрев атмосферы, но использовать ее для совершения работы тоже нельзя.

Таким образом, принципиально невозможно всю энергию, полученную при сжигании топлива, превратить в механическую. Часть ее неизбежно рассеивается в окружающем пространстве и не может быть использована полезно. Этот вывод относится к любым тепловым машинам, независимо от их конструкции.

III. Еще в 1824 г. французский ученый С. Карно показал, что в любой тепловой машине можно получить полезную работу лишь в том случае, если энергия путем теплообмена переходит от горячего тела к холодному; при этом лишь часть этой теплоты может пойти на совершение полезной работы. Если абсолютная температура горячего тела равна T_1 , а холодного — T_2 , то максимальный КПД машины равен:

$$\eta_{\text{макс}} = \frac{T_1 - T_2}{T_1}.$$

Более высокого КПД при данных значениях температур получить невозможно. В реальных же условиях КПД оказывается гораздо меньше: $\eta < \eta_{\text{макс}}$ за счет разного рода потерь.

Как видно из формулы, радикальный путь повышения КПД теплового двигателя — это повышение температуры газа при начале рабочего хода, т. е. до расширения, и снижение его температуры после окончания расширения.

Вопросы для самопроверки

1. Что является основной причиной низкого КПД тепловых двигателей?
2. Почему принципиально КПД теплового двигателя не может быть близок к 100%?
3. Каков основной путь повышения КПД тепловых двигателей?

Упражнения

1. Каков теоретический максимальный КПД паросиловой установки? Сравните с КПД паровой турбины.

2. Рассчитайте теоретический максимальный КПД турбокомпрессорного воздушно-реактивного двигателя. Данные возьмите из § 5.4.

3. Рассчитайте теоретический максимальный КПД бензинового двигателя и дизеля. Расчеты сравните с реальными значениями. Данные возьмите из § 5.2, 5.3.

§ 5.6. ХОЛОДИЛЬНАЯ УСТАНОВКА

I. Вам известно, что тепловые процессы необратимы, т. е. не может самопроизвольно произойти процесс передачи энергии от холодного тела к горячему. Но как же работает домашний холодильник? Как поддерживается лед на искусственном катке? Какой процесс можно использовать для охлаждения?

Протрите одеколоном руку, рука почувствует приятную прохладу. На испарение жидкости затрачивается энергия, т. е. при быстром испарении происходит уменьшение внутренней энергии жидкости. Это явление используется в работе холодильных машин.

II. На рисунке 5.9 показана схема устройства холодильной установки. Для охлаждения используется вещество, которое легко испаряется, например аммиак (кипит при $-33,4^{\circ}\text{C}$) или фреон (кипит при $-29,8^{\circ}\text{C}$). Через вентиль 1 жидкий фреон подается в испаритель 2 и в нем быстро испаряется. Испарение сопровождается поглощением энергии от стенок змеевика-испарителя 2, от воздуха, соприкасающегося с ним, и от продуктов, находящихся в холодильной камере 3.

Чтобы поддерживать в холодильной камере температуру, которая ниже температуры окружающей среды, необходимо поддерживать процесс испарения. Пары фреона из змеевика-испарителя удаляются с помощью компрессора 4, который перекачивает их в конденсатор 5. В конденсаторе фреон конденсируется и вновь поступает через вентиль в змеевик-испаритель. Дополнительно конденсатор может охлаждаться водой или потоком воздуха. Компрессор приводится в действие электродвигателем.

Итак, за счет энергии от электрической сети совершается процесс перекачки тепла от холодной камеры к более нагретым телам: конденсатору и окружающей его среде.

III. Трудно назвать область техники, где искусственное охлаждение не нашло бы себе применения. В жаркие дни охлаждают воздух в заводских цехах, аудиториях, концертных залах. Осуществляют этот процесс установки, в которых идут химические реакции, проте-

кающие только при пониженной температуре. Замораживают грунт при проходке шахт и туннелей, чтобы преградить путь грунтовыми водам. На заводах обрабатывают сталь: после закалки ее охлаждают до -70°C и выдерживают при этой температуре несколько часов, чтобы металл стал твердым и менее хрупким. Для хранения и перевозки рыбы используют сударефрижераторы — плавучие холодильники. Пищевые продукты перевозят в авторефрижераторах и поездах-рефрижераторах.

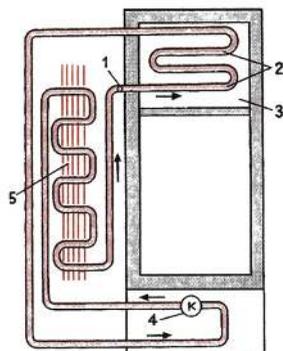


Рис. 5.9

Вопросы для самопроверки

1. По рисунку 5.9 проанализируйте устройство и назначение отдельных частей холодильника.
2. Для чего в холодильнике используют легкокипящие жидкости: фреон, аммиак и др.?
3. Где применяются холодильные установки? Приведите примеры.

§ 5.7. ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТЕПЛОВЫХ МАШИН

I. В своей жизни вы постоянно встречаетесь с разнообразными двигателями. Они приводят в движение автомобили и самолеты, трактора, корабли и железнодорожные локомотивы. Электрический ток вырабатывается преимущественно с помощью тепловых машин. Именно появление и развитие тепловых машин создало возможность для быстрого развития промышленности в XVIII—XX вв.

Работа тепловых машин связана с использованием ископаемого топлива. Современное мировое сообщество использует энергетические ресурсы в громадных масштабах. Например, за 1979 г. энергопотребление составило примерно $3 \cdot 10^{17}$ кДж.

Все тепловые потери в различных тепловых двигателях приводят к повышению внутренней энергии окружающих тел и в конечном счете атмосферы. Казалось бы, что выработка $3 \cdot 10^{17}$ кДж в год энергии, отнесенная к площади освоенной человеком суши (8,5 млрд. га), даст ничтожную величину $0,11 \text{ Вт/м}^2$ по сравнению с поступлением лучистой энергии Солнца на земную поверхность: $1,36 \text{ кВт/м}^2$. Од-

нако при повышении ежегодного использования первичных энергоресурсов всего в 100 раз средняя температура на Земле повысится примерно на 1 °С. Дальнейшее повышение температуры может привести к интенсивному таянию ледников и катастрофическому повышению уровня Мирового океана, к изменению природных комплексов, что существенно изменит условия жизни человека на планете. Но темпы роста энергопотребления увеличиваются, и сейчас создалось такое положение, что до предсказываемого увеличения температуры атмосферы потребуется всего несколько десятков лет.

Однако человечество не может отказаться от использования машин в своей деятельности. Чтобы произвести одну и ту же необходимую работу, следует повысить КПД двигателя, что позволит расходовать меньше топлива, т. е. позволит не увеличивать энергопотребление. Бороться с негативными последствиями применения тепловых машин можно только путем увеличения эффективности использования энергии, путем ее экономии.

II. Топки тепловых электростанций, двигатели внутреннего сгорания автомобилей, самолетов и других машин выбрасывают в атмосферу вредные для человека, животных и растений вещества, например сернистые соединения (при сгорании каменного угля), оксиды азота, углеводороды, оксид углерода (угарный газ CO), хлор и т. д. Эти вещества попадают в атмосферу, а из нее — в различные части ландшафта. В атмосфере Северной Америки и Западной Европы сформировались два гигантских зонта загрязнения. В большой степени этому способствовали высокие трубы котелен (300 м и выше), которые рассеивают загрязняющие вещества над очень большими территориями. Оксиды серы и азота, образующиеся при сгорании топлива (особенно угля), соединяются с атмосферной влагой, образуя серную и азотную кислоты. Это стало причиной устойчивого выпадения кислотных осадков на ландшафты востока Северной Америки и почти всей Европы.

Огромный ущерб от кислотных осадков проявился в первую очередь в Канаде и Скандинавии, затем в Средней Европе в форме уничтожения хвойных лесов, уменьшения численности или вымирания ценных популяций рыб, снижения урожайности зерновых культур и сахарной свеклы. Загрязнение воздуха и водоемов, гибель хвойных лесов и некоторые другие факты отмечены в ряде регионов не только европейской, но и азиатской части России.

Особую опасность в увеличении вредных выбросов в атмосферу представляют двигатели внутреннего сгорания, установленные на автомобилях, самолетах, ракетах. Число их угрожающе растет, а очистка отработанных газов затруд-

нена. Проводится регулировка двигателей для более полного сгорания топлива и уменьшения содержания угарного газа CO в выбрасываемых продуктах сгорания. Разрабатываются двигатели, не выбрасывающие вредные вещества с отработанными газами, например работающие на смеси водорода и кислорода.

III. Применение паровых турбин на электростанциях требует много воды и больших площадей, занимаемых под пруды для охлаждения отработанного пара. Например, в 1980 г. в нашей стране для этих целей потребовалось около 200 км³ воды, что составило 35% промышленного водоснабжения. С увеличением мощности электростанций потребность в воде и новых площадях резко возрастает.

Для экономии площади и водных ресурсов целесообразно сооружать комплексы электростанций, но обязательно с замкнутым циклом водоснабжения.

IV. Из-за большого энергопотребления в ряде регионов планеты возможность самоочищения их воздушных бассейнов оказалась уже исчерпанной. Необходимость значительно снизить выброс загрязняющих веществ привела к использованию новых видов топлива, в частности к строительству атомных электростанций (АЭС). Но на атомных электростанциях встают другие проблемы: захоронение опасных радиоактивных отходов, а также проблема безопасности. Это показала катастрофа на Чернобыльской АЭС.

При решении экологических проблем, связанных с использованием тепловых машин, важнейшую роль должны играть постоянная экономия всех видов энергии, переход на энергосберегающие технологии.

Вопросы для самопроверки

1. Чем опасен перегрев атмосферы при работе тепловых машин?
2. Какие вредные вещества выбрасывают в атмосферу тепловые машины?
3. Что такое кислотные дожди и какое влияние они оказывают на природу?
4. Каков основной путь решения экологических проблем, связанных с использованием тепловых машин?

ДОМАШНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ЗАДАНИЯ

5.1. Определите массу свечи на весах и удельную теплоту сгорания воска (парафина) по таблице. Рассчитайте энергию, которая выделилась бы при полном сгорании свечи.

5.2. Ознакомьтесь с внешним видом двигателя внутрен-

него сгорания какого-либо транспортного средства. Какой вид охлаждения здесь применяется? Имеются ли запальные свечи, коленчатый вал, маховик?

5.3. Если у вас есть возможность попасть в мастерскую, где ремонтируют автомобили, мотоциклы или трактора, ознакомьтесь с внешним видом поршня, поршневых колец, запальных свечей, коленчатого вала и других деталей. Попросите ремонтных мастеров рассказать вам о назначении этих деталей.

5.4. Запишите значение мощности какого-либо транспортного ДВС (автомобиля, мотоцикла), среднюю скорость его движения и расход топлива на 100 км пути. По этим данным определите КПД двигателя.

5.5. Дотроньтесь рукой до решетки конденсатора, который расположен на задней стенке домашнего холодильника. Отличается ли его температура от температуры окружающего воздуха?

5.6. Как регулируется температура в холодильной камере домашнего холодильника?

ГЛАВА 6. ПРИРОДА ТЕЛ СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ

Научные методы исследования, физические теории и методы измерений позволяют познать окружающий нас мир, исследовать движение Солнца, звезд, планет и выдвинуть обоснованные предположения о строении небесных тел. Знания о свойствах электромагнитного излучения позволяют с помощью соответствующих приборов производить астрономические наблюдения, измерять и рассчитывать расстояния между небесными светилами, их скорости, массы и плотности. По характеру излучения можно рассчитать температуру и другие характеристики небесных светил.

Результаты астрономических наблюдений и измерений, а также их сопоставления с явлениями на Земле позволяют выдвигать гипотезы о происхождении небесных тел, их внутреннем строении, источниках энергии и т. д. Запуски искусственных спутников Земли и космических кораблей позволили уточнить ряд наблюдений и открыли возможности для непосредственной проверки правильности научных гипотез и выводов.

В VII классе вы познакомились со строением Солнечной системы. Сейчас, на основе знаний о строении вещества и механизме тепловых явлений, мы сможем рассмотреть природу тел Солнечной системы, строение и свойства всей совокупности составляющих ее небесных тел. Напомним, что изучение строения и свойств небесных тел составляет содержание *астрофизики* — важнейшего раздела астрономии.

§ 6.1. СОЛНЦЕ И ЕГО РОЛЬ В СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЕ

I. Основная часть массы вещества Солнечной системы приходится на долю Солнца. Масса Солнца в 750 раз больше массы всех планет, вместе взятых, и в 330 000 раз больше массы Земли. Движение планет и многих других тел Солнечной системы вокруг Солнца происходит под действием силы притяжения. *Расстояние от Земли до Солнца называется астрономической единицей (а.е.)*. По современным данным, $1 \text{ а.е.} = 1,49600 \cdot 10^{11} \text{ м} \approx 1,5 \cdot 10^8 \text{ км}$.

Угол, под которым виден диаметр Солнца, определяется достаточно резкой границей того слоя, от которого приходит свет на Землю, — так называемой фотосферой. Он составляет около $0,5^\circ$. Зная расстояние от Земли до Солнца, нетрудно вычислить его линейные размеры.

Солнце дает в космическое пространство колоссальное по

мощности излучение. Оно-то в значительной мере и определяет *физические условия* в межпланетном пространстве и на поверхности планет. На площадь, равную 1 м^2 , перпендикулярную солнечным лучам и находящуюся за пределами атмосферы Земли, падает за 1 с энергия, равная $1,36 \text{ кДж}$. Земля получает от Солнца всего лишь одну двухмиллиардную долю излучаемой им полной энергии. *Полная мощность излучения Солнца называется его светимостью*. Она равна $3,8 \cdot 10^{23} \text{ кВт}$.

II. Солнце, как и многие звезды, представляет собой огромный шар, состоящий из плазмы. Поскольку из наблюдений известно, что размеры Солнца практически не меняются, следует считать, что в каждом его слое соблюдается условие гидростатического равновесия: силы внутреннего давления газа (плазмы) уравниваются силами тяжести. На этой основе можно рассчитать физические условия внутри Солнца. Однако мы ограничимся тем, что приведем готовые данные.

Расчеты показывают, что в недрах Солнца температура составляет около десяти миллионов градусов, а давление примерно в сто миллионов раз больше атмосферного давления на поверхности Земли. При таких условиях протекают так называемые термоядерные реакции превращения водорода в гелий, которые вы изучите в следующем году. Эти реакции и служат источником энергии, излучаемой Солнцем в течение примерно десятка миллиардов лет.

III. Передача энергии на Солнце от центральной части (ядра) к более холодным наружным слоям, а оттуда — в космическое пространство осуществляется двумя способами: излучением и конвекцией. Третий способ — теплопроводность — в газовом шаре не играет существенной роли. К ядру, у которого радиус примерно вдвое меньше, чем радиус самого Солнца, непосредственно примыкает зона, где главную роль играет передача энергии излучением; выше расположена конвективная зона. Толщина этих зон примерно одинакова.

Для возникновения конвекции необходимо, чтобы перепад температур между отдельными слоями газа был достаточно велик. Если в глубине Солнца температура некоторой массы газа повышается за счет энергии, поступающей из центральной области, то газ начинает расширяться; плотность его уменьшается; он становится легче окружающей среды и поднимается вверх. Его место занимают более холодные области газа из наружных слоев.

IV. На уровне фотосферы, т. е. того слоя, который мы видим как поверхность Солнца, за счет притока энергии из недр устанавливается температура около $6000 \text{ }^\circ\text{C}$. Следствием конвективного движения вещества является *грануляция*. Это

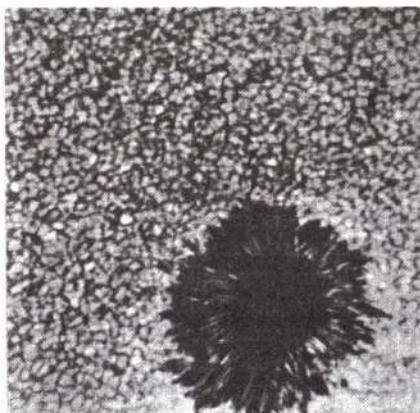


Рис. 6.1

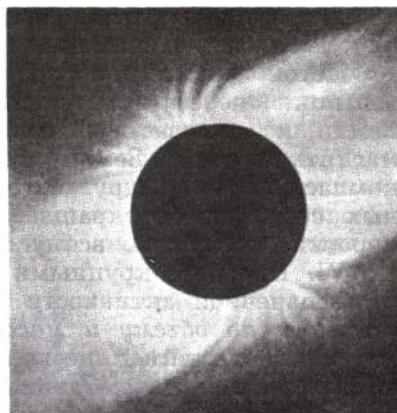


Рис. 6.2

своеобразный вид фотосферы, который хорошо виден на фотографиях (рис. 6.1). Каждую гранулу можно представить как огромный фонтан горячего газа, наблюдаемый сверху. Размеры отдельных гранул — это несколько сот километров в поперечнике, а время жизни — всего 5—10 мин. На месте исчезнувшей гранулы возникает новая.

Фотосфера — самый нижний слой солнечной атмосферы. Прилегающий к ней сверху слой называют хромосферой, еще выше простирается солнечная корона. Корону удобно наблюдать во время полных солнечных затмений, когда более яркая фотосфера закрывается диском Луны (рис. 6.2).

V. Описанный облик фотосферы наблюдается в период спокойного Солнца. Однако в солнечной атмосфере наблюдаются многообразные проявления солнечной активности: пятна, протуберанцы, хромосферные вспышки и др.

Солнечные пятна наблюдались в древности и были описаны Галилеем в начале XVII в. Как правило, это сначала сравнительно маленькие темные участки диаметром 2000—3000 км, большинство из которых в течение суток исчезает, но некоторые увеличиваются в размерах и иногда достигают десятков тысяч километров в поперечнике (рис. 6.3). У крупных пятен вокруг наиболее темной центральной части (тени) наблюдается менее темная полутень. Если температура фотосферы равна 6000 °С, то температура в области полутени — около 5400 °С, а в центре пятна — около 4000 °С.

Самыми мощными процессами активности Солнца являются хромосферные вспышки, при которых за несколько минут выделяется энергия порядка 10^{25} Дж. Вспышки видны как внезапные усиления яркости солнечной поверх-

ности в районе пятна. Они продолжаются в среднем около 3 ч, а слабые — примерно 20 мин.

Поток частиц (корпускулярный поток) из района вспышки через сутки или двое достигает окрестностей Земли и вызывает магнитные бури — сильные изменения магнитного поля Земли, беспорядочные колебания стрелки компаса, а также другие геофизические явления. При сильных вспышках прекращается слышимость радиопередач на коротких волнах по всему освещенному полушарию Земли.

VI. Наиболее крупными по своим масштабам проявлениями солнечной активности являются *наблюдаемые в короне огромные по объему и массе облака газа — протуберанцы*. Их масса достигает несколько миллиардов тонн; различаются они характером движения газов, наблюдаемых в виде различных по форме объектов (рис. 6.4, а, б).

Все протуберанцы представляют собой массы сравнительно холодного плотного газа, температура которого равна всего 5—7 тыс. градусов, в то время как сама корона разогрета до температуры 1 млн. градусов и более.

Вследствие такой высокой температуры плазма короны не удерживается тяготением Солнца, она расширяется и как бы испаряется в космическое пространство. *Этот непрерывный*



Рис. 6.3

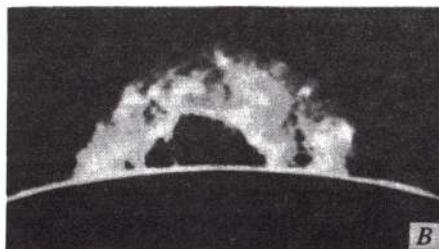
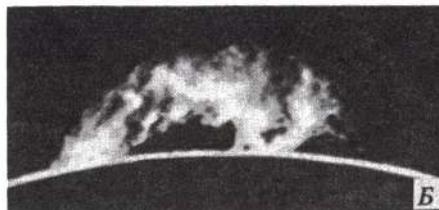
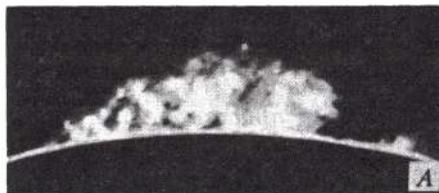


Рис. 6.4 →

поток плазмы носит название солнечного ветра. Распространяясь с большой скоростью, солнечный ветер заполняет собой Солнечную систему до расстояний, равных примерно 100 а.е. Основными составляющими солнечного ветра являются протоны и электроны. Кроме того, в его составе обнаружены альфа-частицы (ядра гелия), ионы кислорода, кремния, серы, железа, неона, аргона и других элементов. Средняя концентрация частиц в солнечном ветре — около 6 протонов в 1 см^3 . Скорость частиц равна сотням километров в секунду.

Вопросы для самопроверки

1. Какие силы обеспечивают устойчивость Солнца?
2. В каком состоянии находится вещество в недрах Солнца?
3. Каков механизм передачи энергии от центральной области Солнца к наружным слоям?
4. Как передается энергия от Солнца к планетам?
5. Какой слой Солнца называется фотосферой? Какова температура этого слоя?
6. Как называются слои солнечной атмосферы, лежащие над фотосферой? При каких условиях они хорошо наблюдаются?
7. Почему солнечные пятна кажутся черными, хотя они имеют очень высокую температуру?
8. Что представляют собой вспышки в хромосфере; протуберанцы?
9. Что представляет собой солнечный ветер?

Упражнения

1. Солнечная постоянная равна $1,36 \text{ кВт/м}^2$. Зная расстояние от Земли до Солнца, найдите *светимость Солнца*, т. е. *полную излучаемую Солнцем мощность*.
2. В 1988 г. производство электроэнергии во всем мире составило $1,1 \cdot 10^{13} \text{ кВт} \cdot \text{ч}$. На сколько бы лет хватило энергии, если бы можно было для этой цели использовать всю энергию, излучаемую за это время Солнцем (т. е. его полную светимость)?
3. Сколько угля надо сжечь, чтобы получить энергию, излучаемую каждую секунду Солнцем?

§ 6.2. ДВЕ ГРУППЫ ПЛАНЕТ. ПРОИСХОЖДЕНИЕ СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ

I. Основная масса вещества, движущегося вокруг Солнца, содержится в девяти больших планетах. К их числу принадлежит и наша Земля — единственная из планет, имеющая разумных обитателей. Освоение природных ресурсов земного шара, современная и будущая производ-

ственная деятельность человечества немислимы без глубокого изучения процессов, происходящих на поверхности, в океане и в атмосфере планеты, ее прошлого и будущего. Поэтому вполне понятен тот интерес, который проявляет современная наука к сравнительному изучению природы Земли и других планет, что позволяет более полно и глубоко познать те общие закономерности, которые свойственны миру этих небесных тел.

Однако если раньше возможно было только использовать знания о Земле для познания природы других планет, то теперь положение существенно изменилось. Современная космонавтика открывает возможности получить о планетах такие сведения, которые по своей полноте и точности приближаются к данным, получаемым о нашей собственной планете. Следовательно, теперь знания о других планетах помогают нам более глубоко изучать природу Земли.

II. Большие планеты по своим физическим характеристикам разделяются на две группы. Одну из них образуют планеты типа Земля, т. е. земной группы: Меркурий, Венера, Земля, Марс.

Вторую группу образуют планеты-гиганты: Юпитер, Сатурн, Уран и Нептун. Данных о девятой планете — Плуtone — пока мало, но уже ясно, что ее нельзя отнести ни к одной из этих групп.

Планеты земной группы (как и наша планета) состоят из оксидов и других соединений тяжелых химических элементов: железа, алюминия и других металлов, а также кремния и других неметаллов. Из всех химических элементов преобладает кислород, входящий в состав большинства соединений.

Планеты-гиганты состоят в основном из водорода и гелия, а также таких соединений, как метан и аммиак. Химический состав этих планет близок к среднему химическому составу Солнца, в котором преобладают наиболее просто устроенные атомы водорода и гелия. По своей массе планеты-гиганты в десятки и сотни раз превосходят крупнейшую из планет земной группы — нашу Землю. Вместе с тем суммарная масса всех планет значительно меньше массы Солнца.

У планет-гигантов большое число спутников; их скорость вращения вокруг оси больше, чем у планет земной группы. Подобное различие двух групп планет находит естественное объяснение в рамках современных космогонических гипотез. (Слово «космогония» образовано от греческого слова *kosmogonia* — происхождение мира.)

III. Согласно современным представлениям, все тела, обращающиеся вокруг Солнца, имеют общее происхождение. Они возникли в ходе продолжавшегося несколько миллиардов лет процесса эволюции огромного первоначально холод-

ного газопылевого облака, частицы которого двигались по самым разнообразным орбитам вокруг Солнца, находившегося тоже в стадии формирования.

Столкновение частиц и обмен энергией между ними приводили к изменению их орбит и формы облака в целом. Орбиты частиц становились круговыми, а облако постепенно сплющивалось. Крупные частицы присоединяли к себе мелкие, и эти сгустки образовывали вокруг Солнца диск, толщина которого была в тысячу раз меньше его диаметра.

В первоначально однородном по своему составу облаке происходило одновременно перераспределение вещества. Сильный нагрев облака вблизи Солнца привел к тому, что наиболее распространенные в нем водород и гелий улетучивались на окраины, а в его центральной части остались только твердые тугоплавкие частицы. Из них-то и образовались планеты земной группы. В удаленных от Солнца частях газопылевого облака царил низкая температура, поэтому газы здесь замерзали на твердые частицы. Планеты-гиганты образовались из этого вещества, в составе которого преобладают водород и гелий.

В планетах на протяжении миллиардов лет происходили процессы расплавления, кристаллизации и другие физико-химические процессы, которые значительно изменили первоначальный состав и строение вещества, из которого образовались все ныне существующие тела Солнечной системы.

IV. Далеко не все сгустки выросли в планеты. Многие остались в Солнечной системе в виде астероидов и более мелких метеоритных тел. На окраинах Солнечной системы эти сгустки в виде ледяных глыб существуют до сих пор. В этом космическом холодильнике в виде ядер комет сохранилось в неизменном виде вещество допланетного облака.

Вопросы для самопроверки

1. Чем отличаются планеты земной группы и планеты-гиганты?
2. Из чего образовались все тела Солнечной системы?
3. Как объясняется различие физико-химического состава планет обеих групп?
4. Откуда взялись астероиды и метеоритные тела?
5. Каково происхождение ядер комет?

§ 6.3. ЗЕМЛЯ И ЕЕ СПУТНИК ЛУНА

I. Знакомство с индивидуальными особенностями тел планетного типа мы начнем с «двойной планеты», как нередко называют систему Земля—Луна. Эти два тела, несмо-



Рис. 6.5

тря на их совместное происхождение, весьма различны по своим характеристикам.

Многочисленные фотографии Земли получены с борта космических аппаратов; одна из них показана на рисунке 6.5. Другие снимки дают возможность увидеть *три основные оболочки земного шара: атмосферу и ее облака, гидросферу и литосферу с ее природными покровами*. Соответствующие этим оболочкам три агрегатных состояния вещества — твердое, жидкое и газообразное — являются привычными для нас, жителей Земли.

Атмосфера есть у большинства планет Солнечной системы, твердая оболочка характерна для планет земной группы, спутников планет и астероидов. В то же время гидросфера Земли — уникальное явление в Солнечной системе; ни у одной другой планеты гидросферы нет. Вода является весьма распространенным химическим соединением во Вселенной, но на других небесных телах мы встречаем воду лишь в твердом состоянии, известном и на Земле в виде снега, инея и льда. Дело в том, что в жидком виде вода может существовать только в том случае, когда ее температура не ниже 0°C и не выше 100°C . Для того чтобы на планете был такой температурный режим, она должна находиться не слишком близко к Солнцу, но и не слишком далеко от него. Наша планета оказалась расположенной в этой благоприятной зоне. Благодаря наличию жидкой воды на Земле стало возможным развитие жизни, что в конце

концов привело к появлению разумного существа — человека.

Моря и океаны существенно влияют на тепловой режим планеты вследствие очень большой теплоемкости воды. Кроме того, вода, видимо, сыграла важную роль в формировании атмосферы Земли, поглотив значительное количество углекислого газа, который содержался в первичной атмосфере миллиарды лет тому назад. Насыщению атмосферы Земли кислородом и поглощению углекислого газа способствовала также жизнедеятельность растений.

II. Около 90% массы атмосферы Земли приходится на ее *приземной слой* — *тропосферу*, которая простирается до высоты 16—18 км в экваториальных широтах и 8—10 км — в полярных. Именно в этой части атмосферы происходят основные метеорологические явления: образование облаков и выпадение осадков, разряды атмосферного электричества (молнии) и перемещения воздушных масс, называемые ветрами.

Периодические изменения температуры в средних широтах связаны со сменой времен года, а непериодические, внутрисезонные изменения происходят в результате сложных метеорологических процессов, главным образом возникновения и перемещения циклонов и антициклонов.

Воздух представляет собой смесь газов, в которой у поверхности Земли основную массу составляют азот (78%) и кислород (21%). Оставшийся 1% приходится почти целиком на долю аргона; углекислого газа уже значительно меньше (0,03%). Незначительное количество составляют инертные газы и водород, вода в виде пара, капелек или кристалликов, а также пылинки. Температура, плотность и давление в тропосфере с высотой уменьшаются.

На высоте 8 км давление примерно в 3 раза меньше, чем на уровне моря. На высоте 100 км давление и концентрация молекул уменьшаются примерно в миллион раз (т. е. в 10^6 раз) по сравнению с их значениями на уровне моря. Следующее уменьшение концентрации в миллион раз достигается на высоте около 500 км, где в единице объема молекул в 10^{12} раз меньше, чем на уровне моря. Уменьшение давления с высотой происходит медленнее при более высокой температуре и меньшей массе молекул. Таким образом, концентрация легких элементов должна медленнее падать с высотой, а их относительное содержание должно возрастать.

III. На высотах 400—500 км атмосфера состоит главным образом из атомарного кислорода. Выше 700 км основными составляющими становятся водород и гелий, а *самые внешние области атмосферы, называемые геокороной*, которые простираются до расстояний в несколько земных радиусов, состоят из атомов и ионов водорода. Общая схема строения

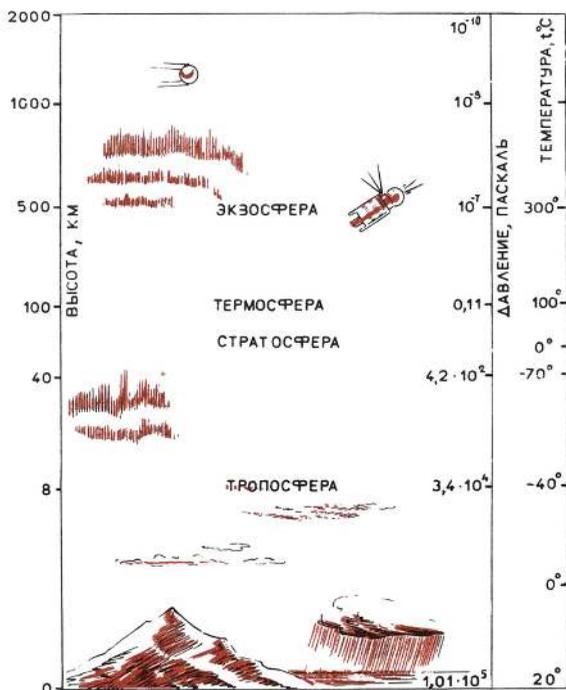


Рис. 6.6

атмосферы показана на рисунке 6.6. Для наглядности масштаб на оси высот для разных уровней разный — у поверхности Земли масштаб растянут, а на больших высотах сжат.

Тепло поступает в атмосферу главным образом от нагревом Солнцем земной поверхности и передается вверх посредством конвективного движения воздуха. Существенную роль играет также выделение тепла при конденсации водяного пара в верхнем облачном слое. Водяной пар чаще всего конденсируется на высоте 1—2 км, где температура, как правило, на 10—15° ниже, чем в приземном слое воздуха. Падение температуры с высотой вблизи верхней границы тропосферы замедляется, а затем в слое толщиной около двух километров температура остается постоянной, порядка от -40°С до -60°С. Этот слой отделяет тропосферу от расположенной до высоты около 50—55 км *стратосферы*, температура которой меняется примерно от -70°С до 10—12°С в ее верхнем слое.

Существенную роль играет расположенный в стратосфере слой озона (O_3), который поглощает значительную часть ультрафиолетового излучения Солнца и тем защищает жи-

вотный и растительный мир нашей планеты. На высоте около 80 км температура постепенно понижается до наиболее низкого уровня (около -100°C). Выше расположена *термосфера*, в которой происходит быстрый рост температуры с высотой за счет поглощения солнечного ультрафиолетового излучения. Рост температуры прекращается примерно на высоте 200—300 км, так как здесь поглощение солнечного излучения уже незначительно. На высотах 800—1000 км начинается самый внешний слой атмосферы, называемый *экзосферой*, где концентрация частиц очень мала — менее 10^7 частиц в 1 см^3 .

IV. Атмосфера надежно защищает жизнь на нашей планете, поглощая (рассеивая) значительную часть поступающих от Солнца ультрафиолетового и рентгеновского излучений, большие дозы которых вредны для человека и других живых организмов. Кроме того, благодаря так называемому парниковому эффекту атмосфера обеспечивает на Земле благоприятный температурный режим, снижает амплитуду изменений температуры от дня к ночи.

Сущность парникового эффекта заключается в том, что атмосфера хорошо пропускает поступающий от Солнца видимый свет, нагревающий земную поверхность. В то же время тепловое (инфракрасное) излучение самой поверхности в значительной степени поглощается содержащимися в воздухе молекулами воды и углекислого газа. Поэтому температура приземного слоя воздуха на несколько градусов выше той, какая была бы в отсутствие парникового эффекта. Хорошо известно, например, что в пасмурную погоду в ночное время охлаждение почвы и воздуха происходит менее интенсивно, чем при ясном безоблачном небе, когда случаются заморозки.

Ультрафиолетовое излучение вызывает ионизацию кислорода и азота, т. е. образование ионов и электронов в верхней атмосфере. Эта часть атмосферы (выше 80 км), где газы ионизованы, называется *ионосферой*. Наличие заряженных частиц является признаком того, что атмосфера в этих слоях представляет собой плазму. Являясь в целом нейтральной, плазма тем не менее ведет себя иначе, чем газ, состоящий из нейтральных частиц. Это происходит потому, что электроны более подвижны, чем массивные ионы, и быстрее реагируют на изменения электрического и магнитного полей. Поэтому ионосфера преломляет, отражает и поглощает радиоволны.

V. Современное состояние литосферы Земли и химический состав ее вещества являются результатами тех изменений, которые происходили на протяжении нескольких миллиардов лет. За счет энергии, выделяю-

щейся при распаде радиоактивных элементов, происходили расплавление и дифференциация вещества нашей планеты. В результате легкие соединения, в основном силикаты, оказались сверху — в коре, а более тяжелые железоникелевые сплавы образовали вокруг центра планеты ее ядро, внешняя часть которого находится в жидком состоянии. Температура в центральной части Земли составляет около 6000 °С. Толщина твердой коры очень невелика: от 10 км под океанами до 80 км под горными хребтами на материках. Ядро имеет радиус вдвое меньший радиуса всей планеты, а между ядром и корой располагается мантия, состоящая из веществ более плотных, чем вещества в коре (см. рис. 4.10).

Таково же в основном и внутреннее строение Луны, а также планет земной группы, которые отличаются друг от друга толщиной коры, размерами ядра, температурой и другими физическими условиями в их недрах.

При сравнении внешнего облика планет земной группы с Землей следует иметь в виду, что 2/3 поверхности нашей планеты скрыто под водой. С помощью эхолотов, определяющих глубину по времени возвращения отраженного от дна звукового сигнала, был в последние 15—20 лет исследован подводный рельеф. В целом он оказался весьма не похож на рельеф материков: выявлены опоясывающие весь земной шар срединно-океанические хребты, поднимающиеся на высоту 4 км, узкие ущелья с крутыми стенками, островные дуги.

VI. Физические условия на Луне, как и на любом другом небесном теле, в значительной мере определяются ее массой и размерами. Как уже говорилось в учебнике для VII класса, сила тяжести на поверхности Луны в шесть раз меньше, чем на поверхности Земли, поэтому молекулам газа гораздо легче, чем на Земле, преодолеть силу тяжести и улететь в космическое пространство. Этим и объясняется отсутствие на нашем естественном спутнике атмосферы и гидросферы.

Условия на поверхности тел планетного типа, к числу которых относится и Луна, определяются также потоком энергии, приходящим от Солнца (или из недр планеты). Отсутствие у Луны атмосферы и большая продолжительность дня и ночи (лунные сутки составляют около 99 земных суток) приводят к резким температурным колебаниям на ее поверхности: от +120 °С в подсолнечной точке до -170 °С в диаметрально противоположной. Речь, разумеется, идет о *температуре вещества самой поверхности, так называемого реголита*. Теплопроводность этого мелкозернистого вещества крайне мала, поэтому-то лунная поверхность быстро нагревается и быстро остывает в течение лунных су-

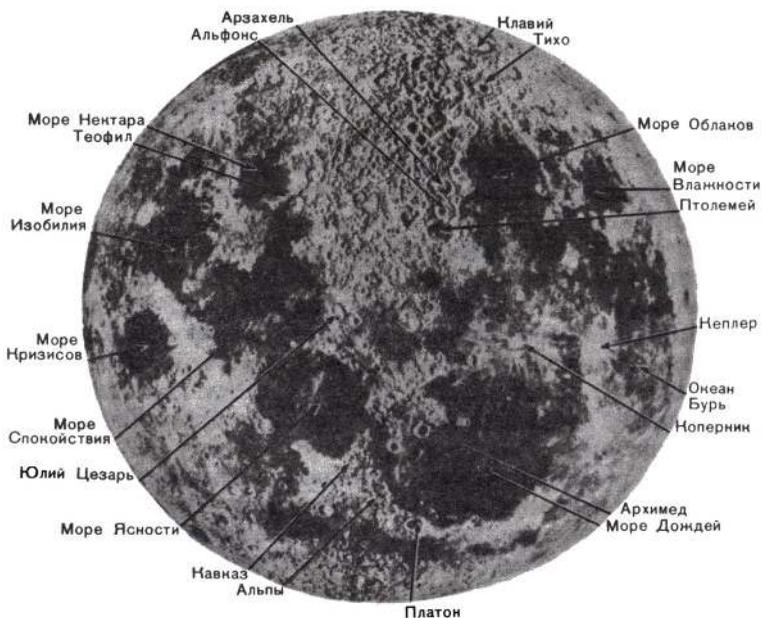


Рис. 6.7

ток, а на глубине порядка метра суточные колебания температуры практически отсутствуют.

Основной причиной дробления поверхностных пород Луны является падение на ее поверхность метеоритных и других, более мелких, тел из космического пространства. Из-за отсутствия атмосферы эти тела до удара о лунную поверхность сохраняют скорость порядка десятков километров в секунду. Отсутствие газовой оболочки вокруг Луны обуславливает также особые механические свойства реголита: слипание отдельных частиц (из-за отсутствия у них оксидных пленок) в пористые скопления. Как описывают астроnavты, побывавшие на Луне, и как показывают снимки следов луноходов, это вещество по своим физико-механическим свойствам (размер частиц, прочность и т. д.) похоже на мокрый песок.

VII. По своему рельефу лунная поверхность делится на два типа, что видно на карте Луны (рис. 6.7): материки, наблюдаемые с Земли как светлые области, и моря, видимые как более темные участки. Заметим, что в этих морях нет и капли воды. Эти области отличаются, как мы теперь знаем, по внешнему виду, по геологической истории и по химическому составу. Наиболее типичной формой лунного

рельефа являются кратеры самого различного размера. Диаметр самых крупных кратеров 200 км, а те кратеры-лунки, которые заметны на панорамах лунной поверхности, имеют в диаметре несколько сантиметров. Самые же мелкие кратеры видны на отдельных частицах лунного грунта (реголита) при их исследовании под микроскопом.

VIII. Формы рельефа лунных морей более разнообразны. Здесь мы видим валы, растянувшиеся на сотни километров по их поверхности, некогда покрытой жидкой лавой, которая затопила древние кратеры. На окраинах морей, да и в других частях лунной поверхности заметны трещины, по которым происходит смещение коры. При этом иногда образуются горы сбросового типа. Складчатые горы, так типичные для нашей планеты, на Луне не встречаются. Все эти формы рельефа можно хорошо увидеть при наблюдениях Луны в телескоп.

Хорошее представление о лунном пейзаже дают панорамы, составленные на основе документальных снимков. Обращают на себя внимание сглаженность очертаний, отсутствие остроконечных вершин, обрывистых склонов, бедность окраски ландшафта и наличие довольно большого числа камней и комьев. Отсутствие на Луне процессов размывания и выветривания приводит к тому, что ее поверхность является своеобразным геологическим заповедником, где на протяжении миллионов и миллиардов лет сохраняются в неизменном виде все возникшие за это время формы рельефа, иначе говоря, записана вся геологическая история Луны. Это обстоятельство помогает в изучении геологического прошлого Земли, которое интересует нас с точки зрения поисков запасов полезных ископаемых, образовавшихся на нашей планете в те далекие эпохи, о которых в ее рельефе не сохранилось никаких следов.

IX. Советские автоматические станции «Луна» и американские экспедиции по программе «Аполлон» доставили на Луну приборы, предназначенные для забора проб лунного грунта и доставки его на Землю, а также для проведения магнитометрических, сейсмологических, астрофизических и других исследований как в местах посадки аппаратов, так и вдоль трассы передвижения луноходов. Фотографирование с космических аппаратов позволило получить материалы для составления полной карты Луны, включая и обратную, невидимую с Земли сторону.

Сейсмические исследования выявили *три типа лунотрясений*. Первый тип связан с падением на Луну метеоритов, второй — вызван падением остатков космических аппаратов или специально произведенными взрывами. Третий — это естественные лунотрясения, происходящие,

как и на Земле, в сейсмически активных районах, находящихся вблизи разломов коры. Лунотрясения значительно слабее землетрясений, но благодаря высокой чувствительности установленных на Луне сейсмометров их удалось зарегистрировать в большом количестве, т. е. несколько сот. Детальные исследования распространения сейсмических волн позволили установить следующее: кора Луны толще, чем кора Земли (от 50 до 100 км); имеется ядро, которое находится в жидком виде (диаметр не более 400 км); имеется мантия — промежуточный слой между корой и ядром.

Х. В морских районах Луны поверхность покрыта породами типа земных океанических базальтов, а в материковых районах — более светлыми и более плотными породами. Основную часть этих пород составляет оксид кремния (что характерно и для Земли), за ним следуют оксиды железа, алюминия, магния, кальция и др.

Минералогический состав лунных пород беднее, чем земных. Отсутствуют минералы, образующиеся при наличии воды и кислорода. Эти факты говорят о том, что на Луне никогда не было ни заметной кислородной атмосферы, ни гидросферы.

Органических соединений, микроорганизмов и других признаков жизни на Луне не обнаружено. Однако в лунных породах не обнаружено и таких соединений, которые были бы вредны для человека или животных и растений. В земных условиях семена и сеянцы растений, высаженных в почву, обогащенную порошкообразным лунным веществом, не испытывали никакого угнетающего воздействия и развивались нормально, усваивая те микроэлементы, которые содержались в этом веществе. Американские астронавты, имевшие в кабине корабля прямые контакты с лунным веществом во время последних экспедиций, даже не проходили никакого карантина, который в целях безопасности проводился после первых полетов на Луну.

Исследования показали, что возраст отдельных образцов лунных пород достигает 4—4,2 млрд. лет, что гораздо больше возраста древнейших пород, обнаруженных на Земле.

Вопросы для самопроверки

1. Какие оболочки земного шара наблюдаются из космоса?
2. При каких условиях на планете может существовать гидросфера?
3. Как меняются физические свойства и состав атмосферы с высотой?

4. Почему говорят, что атмосфера защищает все живое на Земле?
5. В чем сущность парникового эффекта?
6. Почему на Луне отсутствует атмосфера?
7. Каким веществом покрыта поверхность Луны? Каковы его свойства?
8. На карте Луны видны лунные моря. Есть ли в них вода?
9. Как удалось узнать состав поверхности Луны?
10. Как образуются лунные кратеры?

Упражнения

1. Вычислите атмосферное давление на высоте 8 км и 100 км, если на уровне моря оно равно $1,01 \cdot 10^5$ Па.
2. При сгорании угля, нефти и других видов органического топлива выделяется углекислый газ (оксид углерода IV). Что может произойти, если в атмосфере существенно увеличится содержание углекислого газа? Почему это опасно?
3. Почему в пасмурную погоду заморозки бывают гораздо реже, чем при ясной погоде?

§ 6.4. ПЛАНЕТЫ ЗЕМНОЙ ГРУППЫ

I. *Меркурий* — самая маленькая из планет земной группы. Эта планета лишь немного превосходит по своим размерам Луну, однако во многом похожа на нее: например, рельефом, строением, теплопроводностью и другими свойствами поверхностного слоя.

Самыми характерными объектами на поверхности Меркурия являются многочисленные кратеры. Их ударное происхождение доказывается следами выбросов раздробленного вещества и образованием вторичных кратеров, а также другими особенностями. Большие кратеры на Меркурии названы именами знаменитых деятелей искусства: Баха, Бетховена, Гомера, Толстого, Шекспира и т. д. Как и на Луне, на Меркурии можно выделить неровные материковые участки и сравнительно гладкие — морские. Последних на Меркурии существенно меньше, чем на Луне. Крупнейшая впадина (море Зноя) имеет диаметр около 1300 км.

Характерной особенностью рельефа, отличающей Меркурий от Луны, является наличие так называемых *эскарпов* — *крутых откосов или уступов протяженностью от 20 до 500 км и высотой от нескольких сотен метров до 1—2 км*. По своему строению и расположению они отличаются от аналогичных образований, наблюдаемых на Луне и на Марсе.

Физические условия на Меркурии еще более суровые, чем на Луне. Атмосфера практически отсутствует. Из-за близости к Солнцу его поверхность разогревается днем до 450 °С, а ночью остывает до -180 °С. Сутки на Меркурии равны 176 земным суткам, так как вокруг своей оси он вращается очень медленно.

II. *Венера* по своим размерам и массе очень мало отличается от Земли. Установлено, что поверхность Венеры постоянно скрыта от наблюдателя слоем облаков. Во второй половине XX в. радиофизические исследования показали, что атмосфера Венеры в слоях, расположенных ниже облаков, имеет высокую температуру. Обнаружено исключительно медленное вращение планеты вокруг оси: год на Венере составляет 224 земных суток, а период оборота вокруг оси по отношению к Солнцу (солнечные сутки) — 240 земных суток.

С помощью радиолокации удалось также получить первые радиокарты рельефа Венеры и выявить много кратеров диаметром от 30 до 150 км. Глубина этих кратеров всего несколько сотен метров, что в 10 раз меньше глубины кратеров такого же размера на Луне, Меркурии и даже на Марсе.

Автоматические станции «Венера-15» и «Венера-16», ставшие искусственными спутниками Венеры, произвели радиолокационную съемку примерно одной четверти поверхности планеты в Северном ее полушарии. Оказалось, что большие возвышенности занимают менее 8% площади всей поверхности, но среди них встречаются очень крупные горные массивы. Так, горы Максвелла достигают высоты 12 км, что выше Эвереста почти в полтора раза. Кроме них, на обширном темном плоскогорье есть и другие горы высотой 7—8 км, а весь этот горный район, получивший название Земли Иштар, поднимается над поверхностью планеты в среднем на 4—5 км. Здесь в обрамлении горных хребтов располагается громадное плато Лакшми, по размеру примерно равное Тибету. Вероятно, весь этот район имеет тектоническое происхождение, а также несет на себе следы вулканической деятельности.

На склоне гор Максвелла обнаружен громадный вулканический кратер диаметром чуть менее 100 км, а внутри него еще один, меньший по размерам. Аналогичное происхождение имеет и другое, чуть меньшее по размерам плоскогорье, названное Землей Афродиты.

В других частях на поверхности планеты также обнаружены подобные земным складчатые горные хребты, впадины и протяженные долины. Отмечены лавовые потоки, сбросы и другие тектонические формы. Следы того, что активные геологические процессы происходили на Венере не в очень

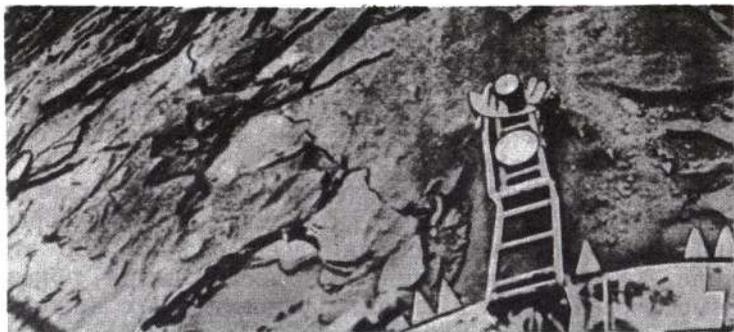


Рис. 6.8

отдаленном прошлом, видны и на панорамах ее поверхности, переданных автоматическими станциями (рис. 6.8).

III. Физические условия в атмосфере Венеры (температура, давление, плотность, химический состав) были изучены с помощью космических аппаратов. Выяснилось, что атмосфера этой планеты (как и Марса) состоит в основном из углекислого газа (около 95%) с примесью 3—5% азота и малых количеств аргона и водяных паров.

Своеобразной оказалась структура облаков Венеры. Верхняя граница основного облачного слоя находится на высоте примерно 65 км. По концентрации частиц облака Венеры похожи на разреженный земной туман с видимостью в несколько километров. Из космического пространства по снимкам, полученным автоматическими межпланетными станциями, обнаруживается циркуляция облачного покрова в направлении, обратном вращению планеты, с периодом около четырех суток. Облака на Венере, видимо, состоят из капель 80%-ного раствора серной кислоты и более крупных, чем капли, частиц серы и кристалликов солей серной кислоты. Для солнечного излучения облака Венеры достаточно прозрачны, что обеспечивает примерно такую же освещенность, как на Земле в пасмурный день.

На поверхности планеты зарегистрированы давление около 9,6 МПа и температура около 470 °С. Суточные колебания температуры на поверхности планеты практически отсутствуют, потому что атмосфера, плотность которой примерно в 100 раз больше земной, хорошо сохраняет тепло. Этому способствует так называемый парниковый эффект (см. § 6.3).

IV. Своеобразный тепловой режим атмосферы Венеры, богатой углекислым газом, представляет особый интерес в связи с тем, что одной из актуальных современных проблем

является защита окружающей среды, в том числе и атмосферы Земли, от перегрева. Повышение содержания углекислого газа в земной атмосфере, происходящее вследствие сжигания топлива на земном шаре, может привести к существенному повышению температуры атмосферы Земли. Как показывает пример Венеры, этот процесс является необратимым.

Автоматические станции зарегистрировали на Венере радиоимпульсы и акустические сигналы, свидетельствующие о грозовых разрядах. У ученых появилась возможность создать теорию атмосферных процессов, что важно для развития земной метеорологии и прогнозирования погоды.

V. *Марс* меньше нашей планеты по размерам и массе, а располагается от Солнца в 1,5 раза дальше Земли. Если на Венере температура и плотность атмосферы выше, чем на нашей планете, то на Марсе температура ниже, а плотность атмосферы меньше. Таким образом, природа предоставляет науке возможность изучать атмосферные процессы в значительно более широких пределах, чем это можно сделать при исследовании только атмосферы Земли.

Поверхность Марса (в отличие от Венеры) может наблюдаться в телескоп с Земли, но разрешающая способность оптических телескопов недостаточна для того, чтобы обнаружить даже наиболее крупные формы рельефа. На изображениях, полученных с борта космических аппаратов, прежде всего были обнаружены многочисленные кратеры ударного (метеоритного) происхождения диаметром до нескольких сотен километров. Все они в большей или меньшей степени подвержены атмосферной эрозии: на склонах видны осыпи и овраги, внутренняя часть кратеров заполнена мелкораздробленным веществом типа песка. На Марсе, как и на Венере, формы рельефа оказались более разнообразными, чем на Луне или Меркурии. Здесь встречаются участки поверхности, занятые горными цепями, пустынные равнины, вулканические конусы, системы узких, параллельно расположенных трещин, которые получили название *риллей*, огромные каньоны, оползни и даже сухие русла рек — *меандры*. Впечатление так называемых каналов создается, видимо, как цепочками кратеров, так и наиболее крупными разломами марсианской коры. Участки, покрытые дюнами, лишней раз подтвердили справедливость давнего предположения о пылевых бурях на Марсе.

VI. На Марсе можно выделить крупные (диаметром более 2000 км) впадины (моря), которые уже давно получили названия Эллада, Аргир, Амазония, Хрис, и возвышенные плато (материки) — Фарсида, Элизиум и другие, которые возвышаются над уровнем средней поверхности на 4—6 км. Если бы на Марсе образовались океаны, то вода заполнила

бы котлованы, а возвышенности действительно стали бы материками, близкими по размерам земным континентам.

В Южном полушарии планеты в основном сосредоточены участки, занятые кратерами ударного происхождения, а в Северном преобладают формы рельефа, связанные с активными геологическими процессами — громадные вулканы с кратерами на вершинах. Вулканические конусы достигают в основании 500—600 км, поднимаясь над окружающей равниной на 20—21 км. Эти объекты существенно превосходят по своим размерам все известные горы и вулканы на Земле. Хорошо сохранившиеся на склонах следы лавовых потоков говорят о том, что еще сравнительно недавно эти вулканы были действующими. Считается, что их деятельность прекратилась не более чем несколько сот миллионов лет тому назад.

Следы вулканической деятельности в виде остатков лавовых потоков заметны и на панорамах, переданных с поверхности Марса (рис. 6.9). Внешний вид множества камней напоминает продукты раздробления пемзовых лав, часто встречающихся у нас на Земле. Об интенсивной тектонической активности свидетельствуют многочисленные разломы, сбросы и ущелья с системой ветвящихся каньонов, один из которых протяженностью более 4000 км показан на рисунке 6.10.

VII. Атмосфера Марса по химическому составу больше напоминает атмосферу Венеры, нежели Земли. Основную массу (около 95%) составляет углекислый газ; существенно меньше азота (2—3%) и аргона (1—2%). Кислорода и воды содержится значительно меньше 1%. Атмосферное давление на среднем уровне поверхности планеты примерно в 100 раз



Рис. 6.9



Рис. 6.10 →

меньше, чем у поверхности Земли. В зависимости от рельефа Марса оно меняется в пределах от 2 до 1 кПа.

Из-за большей, чем у Земли, удаленности от Солнца средняя температура на его поверхности составляет всего -60°C . Видимо, крайне редко она поднимается выше 0°C . Во всяком случае в Северном полушарии на широтах $22,5^{\circ}$ и 48° , где совершили посадки американские аппараты «Викинг-1» и «Викинг-2», максимальная температура атмосферы в разгар марсианского лета не превышала -30°C , а температура поверхности поднималась лишь на $10-15^{\circ}\text{C}$ выше. В ночное время температура опускалась до -60°C . Таким образом, ни плотность атмосферы, ни температурные условия на Марсе не позволяют образоваться воде в жидком виде. Минимальная температура на полюсах Марса достигает -125°C , т. е. температура, при которой углекислый газ превращается в сухой лед.

Температура атмосферы Марса (в отличие от Венеры) значительно меняется в течение суток, в зависимости от времени года, а также от района к району. Днем температура поверхности выше, чем температура атмосферы, а ночью — наоборот. В стратосфере Марса, как и на полюсах, может конденсироваться углекислота, но в основном облака, наблюдаемые на Марсе, состоят из кристалликов водяного льда и находятся в тропосфере. Относительное содержание водяного пара также значительно меняется: наиболее сухо зимой в высоких широтах; наиболее влажно летом над полярными областями. Во время пылевых бурь содержание влаги в атмосфере уменьшается.

VIII. Уже давно высказывалось предположение о том, что основные водные запасы на Марсе сосредоточены в приповерхностном слое вечной мерзлоты, аналогичном существующему на Земле. Это предположение в настоящее время

подтверждается деталями поверхности, свидетельствующими о водной эрозии, в частности следами грязевых потоков, застывших на склонах молодых кратеров ударного происхождения. Расплавление приповерхностных слоев льда могло происходить при ударе метеорита.

Значительные запасы замерзшей воды содержат наблюдаемые даже с Земли в телескоп полярные шапки Марса. Аналогичную картину увидел бы космический наблюдатель, когда белый покров в зимнем полушарии Земли занимает обширные пространства материков, а в летнем остается только у полюсов планеты. На Марсе полярные шапки также в основном состоят из замерзшей воды, но в холодное время года этот лед за счет вымерзания из атмосферы углекислого газа покрывается слоем сухого льда толщиной в несколько сантиметров. Этот слой быстро исчезает при наступлении весны в соответствующем полушарии.

Весьма вероятно, что полярные шапки на Марсе содержат также соединения, которые образуются при внедрении молекул углекислого газа в пустоты кристаллической решетки водяного льда (клатраты). По внешнему виду они напоминают спрессованный снег и хорошо известны на Земле как побочные продукты при добыче природного газа. На панорамах Марса видно, что они образуются в ночное время внутри углублений и кратеров, а после восхода Солнца быстро сублимируют. Это подтверждается и тем, что температура атмосферы в эти моменты совпадает с температурой образования твердой углекислоты.

Весной полярная шапка начинает таять, и поступающий в атмосферу углекислый газ существенно повышает атмосферное давление. Это вызывает движение больших масс газа из одного полушария в другое. Если в обычных условиях скорость ветра у поверхности планеты не превышает 10 м/с, то эти сезонные изменения давления (не менее чем на 10%) вызывают ураганные ветры, скорость которых достигает 100 м/с и даже больше. Сильные ветры поднимают в атмосферу большое количество пыли, что приводит к понижению температуры поверхности планеты, так как значительная часть солнечных лучей перехватывается пылевыми облаками. Действует так называемый *антипарниковый эффект*.

Если бы вся твердая углекислота, содержащаяся в обеих полярных шапках, обратилась в газ, то атмосферное давление на Марсе стало бы достаточным для того, чтобы вода могла сохраняться в жидком состоянии и течь по поверхности, оставляя следы, которые мы наблюдаем в виде русел древних пересохших рек. Можно предположить, что на Марсе, как и на Земле, происходят вековые изменения кли-

мата, подобные чередованию ледниковых и межледниковых периодов в истории Земли.

Исследования химического состава марсианского грунта, проведенные в местах посадок космического аппарата «Викинг», показали высокое содержание кремния (до 20%), железа (12—14%). Красноватая окраска поверхности Марса вполне объясняется присутствием оксидов железа, в частности в виде такого минерала, как лимонит. Из других элементов отмечено высокое содержание серы (3%) и ряда металлов: кальция, магния и алюминия. Так что те камни и песок, которые видны на панорамах Марса, имеют привычный для земных и лунных пород химический состав.

IX. Человечество давно волновал вопрос о наличии жизни на планетах, в частности на Марсе, где физические условия более близки к условиям на Земле. Важную роль в разрешении этого вопроса должны были сыграть проведенные автоматическими биологическими лабораториями, установленными на космических аппаратах, исследования процессов фотосинтеза, обмена веществ, а также газообмена во взятых пробах грунта. Полученные результаты оказались неожиданными: химические реакции, которые на Земле продолжались до двух недель, здесь завершились за двое суток. Их результаты можно объяснить особыми химическими свойствами марсианского грунта.

Весьма точные приборы не обнаружили в исследованных образцах никаких органических соединений. Точность использованных приборов при этом была такова, что в образцах земных пород, взятых в Антарктиде, они обнаруживали более двадцати различных органических соединений. Таким образом, в тех районах Марса, которые были доступны для непосредственных экспериментов, не было обнаружено ни признаков жизни, ни даже ее следов в виде органических соединений.

Видимо, не следует на основе этих данных делать категорический вывод о полном отсутствии жизни на Марсе. Однако ясно, что даже если она есть, то все же не столь широко распространена, как на нашей планете. Ученые еще не оставляют надежды обнаружить следы жизнедеятельности в районах вулканов, где содержание водяных паров выше, чем в других местах планеты, и температурные условия могут оказаться более благоприятными.

X. Значительный интерес для исследований представляют два небольших спутника Марса — Фобос и Деймос. Их поверхность, усеянная кратерами ударного происхождения, отражает менее 5% падающего на них света. Столь слабое отражение света характерно для вещества, которое входит в состав так называемых углистых хондритов — метеоритов, имеющих самый простой химичес-

кий состав. Считается, что это вещество сохранилось в неизменном виде со времени образования этих тел и Солнечной системы в целом. По всей видимости, оно не подверглось тем изменениям, которые претерпевает вещество вследствие расплавления, дифференциации и других физико-химических процессов, характерных для планет земной группы. Следовательно, данные о химическом составе грунта спутников Марса помогут узнать многое о начальной стадии формирования планет, в том числе и нашей Земли.

Вопросы для самопроверки

1. Каковы условия на поверхности Меркурия? Может ли там существовать жизнь?
2. Какой вид имеет поверхность Венеры? Как были получены эти данные?
3. Что представляет собой атмосфера Венеры? Чем объясняется ее высокая температура?
4. Возможна ли жизнь на Венере?
5. Какой вид имеет поверхность Марса?
6. Какова температура на поверхности Марса?
7. Есть ли на Марсе вода; в каком она состоянии?
8. Что представляют собой полярные шапки Марса? Как они меняются при смене времен года?
9. Какой интерес для исследователей представляют спутники Марса?
10. Обнаружена ли жизнь на Марсе?
11. Что дает изучение планет для наук, изучающих Землю?

§ 6.5. ПЛАНЕТЫ-ГИГАНТЫ, ИХ СПУТНИКИ И КОЛЬЦА

I. Типичным и наиболее хорошо изученным представителем планет-гигантов является *Юпитер* — самая крупная планета Солнечной системы. Он состоит на 80—85% из водорода и примерно на 10% из гелия, а также металлов и других тяжелых элементов, которых в составе одного только Юпитера содержится в несколько раз больше, чем во всех планетах земной группы, вместе взятых. В атмосфере обнаружены аммиак (NH_3), метан (CH_4), водяные пары, этан (C_2H_6), фосфин (PH_3) и ряд других соединений.

II. Среди множества деталей, видимых в телескоп, бросается в глаза целая система темных красноватых полос, которые тянутся параллельно экватору. Эти облака клочковаты и прерывисты. Светлые участки между полосами называют зонами; в них также прослеживается клочковатая

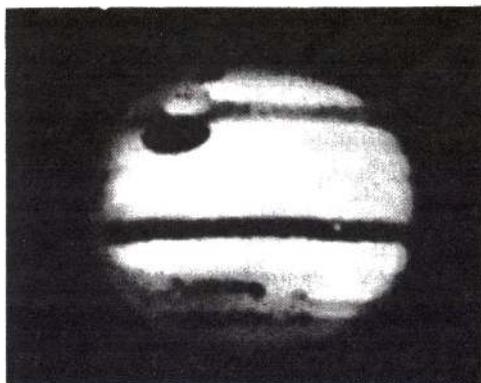


Рис. 6.11 →

структура, говорящая о их неоднородности. Эта характерная картина темных поясов и светлых зон хорошо видна даже в небольшой телескоп (рис. 6.11).

Вероятно, облака на Юпитере состоят из кристалликов аммиака. Этот вывод основан на том, что температура облаков ниже точки отвердевания аммиака. Однако чистый аммиак в твердом состоянии представляет собой прозрачные кристаллы, в то время как детали облаков в атмосфере Юпитера весьма разнообразны по яркости и цвету. Такое разнообразие окраски можно объяснить аэрозольными примесями, среди которых, видимо, встречается красный фосфор.

III. На уровне облачного слоя Юпитера температура составляет всего -140°C при давлении примерно таком же, как у поверхности Земли. Температурный режим атмосферы Юпитера (в отличие от Земли или Марса) определяется не столько потоком солнечного излучения, сколько тепловым потоком из недр планеты. За счет этого температура в нижних слоях атмосферы планеты должна быть выше. Поэтому считают, что ниже аммиачных облаков в атмосфере планеты находятся облака, состоящие из капель воды и кристалликов водяного льда, которые также содержат аэрозольные примеси.

Интенсивные движения, охватывающие облачный слой, а также соседние с ним слои атмосферы, имеют устойчивый характер, например Большое Красное Пятно, наблюдаемое на Юпитере уже свыше 300 лет. Его поперечник достигает 40 тыс. км, что значительно больше Земли. Такой колоссальный по своим размерам атмосферный вихрь (типа земных циклонов и антициклонов), согласно расчетам, сохраняет устойчивость в течение нескольких тысяч лет. В условиях земной атмосферы они устойчивы обычно на протяжении одной недели.

Изучая атмосферы планет, мы видим, что, несмотря на различие их химических составов и физических условий, в их свойствах есть много общего. В основе образования облаков на любой планете лежат процессы испарения, сублимации, конденсации и десублимации, которые совершаются в веществе, содержащемся в ее атмосфере. Этим веществом может быть вода, сера и серная кислота, метан и аммиак, но сущность физических процессов и происходящих при этом изменений свойств атмосферы одна и та же.

IV. Расчеты модели внутреннего строения планеты-гиганта показывают, что по мере приближения к центру планеты водород должен из-за огромного давления последовательно переходить из газообразной в газожидкую фазу. По мере движения вглубь атмосфера Юпитера уплотняется, а температура повышается. В результате на некоторой глубине не существует границы между газообразной и жидкой фазами водорода. Сосуществование обеих этих фаз обычно называют газожидким состоянием. Полагают, что по мере приближения к центру планеты газожидкий молекулярный водород начинает постепенно приобретать свойства металла. На расстоянии примерно $3/4$ радиуса от центра планеты водород во всем объеме приобретает металлические свойства. Это состояние, как показали расчеты, наступает при давлениях, в миллион раз больших атмосферного на поверхности Земли.

В центральной части Юпитера находится ядро, размеры которого примерно в 1,4 раза превышают размеры Земли, а масса — в 10—15 раз больше массы Земли. В ядре давление в десятки и сотни миллионов раз больше атмосферного, а температура должна быть выше, чем на поверхности Солнца, примерно в 3—4 раза. Ядро состоит из металлов, силикатов и металлического водорода. Каким бы ни было состояние вещества в ядре, Юпитер в основном является газожидкой планетой.

V. Аналогичное Юпитеру строение имеют и другие планеты-гиганты — *Сатурн*, *Уран* и *Нептун*. В их атмосферах также заметно чередование темных поясов и светлых зон, хотя контрастность деталей, особенно на Уране и Нептуне, заметно меньше. На Сатурне обнаружен объект, подобный Большому Красному Пятну Юпитера.

При близком пролете космических аппаратов мимо планет-гигантов на них были зафиксированы мощные атмосферные течения.

VI. На долю планет-гигантов приходится подавляющее большинство спутников. Самым крупным из них является спутник Юпитера — Ганимед, который по диаметру больше планеты Меркурий. Немногим меньше Ганимеда — Титан,

один из спутников Сатурна. Остальные спутники меньше, некоторые по размерам похожи на Луну, а некоторые чуть более 10 км в диаметре.

По снимкам, полученным с межпланетных космических аппаратов, открыто много новых спутников у планет-гигантов. При каждом новом полете число обнаруженных спутников возрастает.

Все эти спутники (в отличие от самих планет-гигантов) состоят из тех веществ, которые входят в состав планет земной группы. Это характерные для вещества горных пород соединения (силикаты, оксиды и сульфиды металлов и т. д.), а также водяной (или водно-аммиачный) лед.

Поверхности почти всех спутников планет-гигантов испещрены многочисленными кратерами метеоритного происхождения. На некоторых эти кратеры имеют гигантские (до 400 км) размеры, сравнимые с размерами лишь самого спутника.

Вместе с тем на других спутниках обнаружены следы их геологической истории: тектонические разломы и трещины. Наиболее характерны в этом отношении Ганимед и спутник Урана — Миранда. На поверхности самого маленького из открытых еще Галилеем спутников Юпитера — Европы обнаружена целая сеть разломов его ледяного покрова, достигающего, вероятно, толщины 100 км.

Но самым удивительным было открытие действующих вулканов на ближайшем к Юпитеру спутнике Ио. Их оказалось 7 или 8 одновременно. На рисунке 6.12 видны потоки вещества, выбрасываемого на сотни километров в космическое пространство. Следы газов и паров были обнаружены еще по наблюдениям Ио с Земли, но лишь теперь, при наблюдении с космических аппаратов, стало ясно, что эти газы являются результатом вулканической деятельности. Других достоверных наблюдений извержений вулканов на телах Солнечной системы (кроме, разумеется, нашей пла-



Рис. 6.12

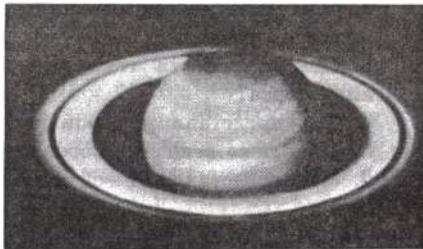


Рис. 6.13

нет) пока нет, хотя следы вулканизма обнаружены даже на спутнике Нептуна — Тритоне.

VII. И наконец, планета *Сатурн*, знаменитая своим кольцом. До 1977 г. это кольцо (рис. 6.13), наблюдаемое в телескоп с Земли, считалось уникальным явлением в Солнечной системе. Однако благодаря космическим аппаратам у всех планет-гигантов были обнаружены подобные кольца. Они состоят из тел различного размера (от мелкой пыли до глыб диаметром в десятки метров), движущихся в плоскости экватора планеты по круговым и эллиптическим орбитам, лежащим внутри орбит ее спутников.

По каждой орбите движется множество тел, так что правильнее говорить о системе отдельных концентрических колец, которых у Сатурна можно насчитать несколько сотен. На структуру колец очень сильное влияние оказывают спутники, которые притягивают мелкие частицы кольца, что делает их движение по некоторым орбитам неустойчивым, в результате чего частицы собираются в узкие кольца.

Внешний диаметр колец Юпитера примерно 250 тыс. км, толщина их не более 1 км. Поскольку они почти всегда повернуты к нам ребром, увидеть их с Земли чрезвычайно трудно, и их удалось сфотографировать только с близко прошедшего космического аппарата «Вояджер». Частицы колец Юпитера и Сатурна, по-видимому, покрыты льдом или снегом. Частицы колец Урана, напротив, очень темные, они отражают мало света. Некоторые из колец Урана и Нептуна незамкнуты; их правильнее назвать дугами. Видимо, кольца планет-гигантов являются веществом, из которого формировались спутники этих планет. Вблизи планет огромная сила тяжести не позволила образоваться крупным спутникам, и вещество так и осталось в виде небольших тел.

Вопросы для самопроверки

1. Каково строение Юпитера? Из каких веществ он в основном состоит?
2. Чем объясняется различие в строении планет земной группы и планет-гигантов?
3. Чем отличается атмосфера планет-гигантов от атмосферы Земли или Марса?
4. Что представляет собой ядро Юпитера?
5. Из каких веществ состоят спутники планет-гигантов?
6. Что представляют собой кольца планет-гигантов?

§ 6.6. МАЛЫЕ ТЕЛА СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ: АСТЕРОИДЫ, МЕТЕОРИТЫ, КОМЕТЫ

I. *Астероид* — небесное тело, о существовании которого в Солнечной системе стало известно значительно позже, чем о существовании планет или комет. Первый и самый крупный астероид (диаметром около 1000 км), получивший название Церера, был открыт 1 января 1800 г. К концу XIX в. было известно 470 астероидов, а сейчас — более 3000. Они в основном (около 98%) обращаются вокруг Солнца по эллиптическим орбитам, расположенным между орбитами Марса и Юпитера, двигаясь в том же направлении, что и большие планеты.

подавляющее большинство астероидов даже в телескоп видны как светящиеся точки — звезды. Этим и объясняется их название: *астероид* в переводе на русский язык означает «звездopodobный» (слово «астероид» образовано от греческих слов *aster* — звезда, *eidos* — вид). Лишь 30 из них имеют размеры более 200 км, с уменьшением размеров растет их число. Астероиды называют также *малыми планетами*.

Известно около 50 астероидов, приближающихся к орбите Земли и даже проникающих внутрь ее. Среди них Эрос, Икар, Амур, Аполлон и др. Все эти объекты очень малы: от нескольких километров до сотен метров, поэтому они доступны для наблюдений только в период сближения с Землей.

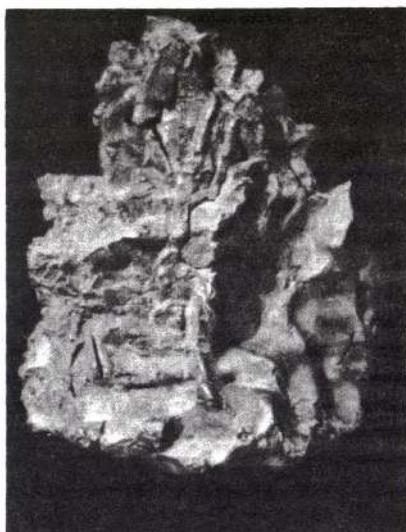
Масса среднего астероида настолько мала, что сила тяжести не может придать ему форму шара или вызвать в его недрах повышение температуры, достаточное для расплавления вещества. Даже крупные астероиды имеют значительные отклонения от правильной формы. Астероиды вращаются вокруг своих осей с периодами от 4—6 до 20—30 ч, и по изменению их яркости можно судить об их форме.

II. При падении на астероиды более мелких тел возникают кратеры и образуется слой мелкораздробленного вещества — реголит с примесью остатков упавших тел. Свойства реголита достаточно хорошо изучены благодаря исследованиям лунного вещества (см. § 6.3).

Сильные удары при таких падениях способны разрушить астероид, раздробить его на отдельные обломки. Учет эволюции их орбит приводит к выводу, что около 40% астероидов относятся к семействам с одинаковыми орбитами. В большинстве случаев все обломки примерно одинаковы, но в некоторых семействах один из астероидов значительно (более чем в 1000 раз) превосходит все остальные. Таковы семейства крупнейших астероидов — Цереры, Паллады и Весты. По возмущениям, вызываемым в движении Марса, а



а)



б)

Рис. 6.14

также другими способами было установлено, что общая масса астероидов порядка 10^{21} кг, т. е. примерно в 1500 раз меньше массы Земли.

Исследования поверхности астероидов оптическими методами позволили установить наличие силикатов, минералов, аналогичных земным, и других соединений, похожих на те, которые встречаются в составе метеоритов.

III. *Метеорит* — камень, падающий на Землю. (Слово «метеорит» образовано от греческого слова *meteōros* — небесный.) Такие камни были известны еще в глубокой древности, когда их считали обломками «небесной тверди». Но после того как стало ясно, что никакой небесной тверди нет, неземное происхождение метеоритов долгое время казалось сомнительным. Представления о том, что они до встречи с Землей движутся в космическом пространстве как самостоятельные тела, завоевали признание лишь в конце XVIII в. Открытие астероидов способствовало утверждению этих представлений.

Крупное тело, вторгающееся в земную атмосферу из космического пространства, называют *болидом*. Это светящийся и разбрасывающий в полете искры шар, который представляет собой сгусток плазмы (рис. 6.14,а). Плазма окружает тело, лобовая поверхность которого нагревается набегающим потоком воздуха до температур в десятки тысяч градусов.

То же происходит и с космическим аппаратом, возвращающимся на Землю с орбиты. Нагретый поверхностный слой плавится, разбрызгивается и испаряется, но в глубь метеорита тепло не успевает проникать, поскольку полет продолжается всего несколько секунд. Следы этих процессов остаются в виде коры плавления на поверхности метеоритов, упавших на Землю (рис. 6.14.б).

Изучив по фотографиям траекторию полета болида в атмосфере, можно вычислить, по какой орбите двигалось породившее его тело в космическом пространстве до встречи с Землей. Вычисленные именно так орбиты оказываются подобны орбитам астероидов, которые сближаются с нашей планетой.

Потери вещества при полете в атмосфере в значительной мере зависят от скорости тела и его механической прочности. Наибольшие шансы сохраниться, несмотря на разрушающее воздействие атмосферы, имеют тела метрового и дециметрового размера, обладающие достаточной механической прочностью. Их скорость не превышает 22 км/с относительно Земли. Более крупные тела сохраняют высокую скорость до встречи с поверхностью Земли и, взорвавшись при ударе о Землю, образуют кратеры. Следы таких событий являются Аризонский метеоритный кратер диаметром 1,2 км, группа небольших кратеров на острове Саарема в Эстонии и ряд других. Крупные метеоритные кратеры диаметром в десятки километров, образовавшиеся в древних слоях Земли, обнаружены в Канаде, Африке, Сибири и во многих других частях земного шара.

IV. По внешнему виду, составу и структуре метеориты делятся на три основных класса: каменные, железные и железокремнистые. В потоке тел, падающих на Землю, преобладают каменные метеориты — 92%, железные составляют 6%, а железокремнистые — 2%. Однако в числе 3000 метеоритов, хранящихся в музеях, железные метеориты встречаются чаще, поскольку их легче найти вследствие необычности вида и способности дольше сохраняться, чем каменные, которые в процессе интенсивного выветривания становятся неотличимыми от обычных земных камней.

Метеориты в большинстве своем не прошли через те превращения вещества, которые испытали земные и лунные породы, и поэтому имеют весьма примитивный химический состав. Этот состав отражает события, которые происходили в протопланетном (допланетном) облаке на начальном этапе формирования планет. Если в земных породах содержится более 1000 различных минералов, то в метеоритах их всего 140. Правда, многие из этих минералов не встречаются на Земле.

Более 90% каменных метеоритов содержат округлые зерна — *хондры*, поэтому они называются *хондритами*. Хон-

дры, которые имеют различные размеры, прочность и цвет, характерны только для метеоритов и не встречаются больше нигде. Вещество хондритов состоит в основном из силикатов, но содержит и никелистое железо, которое составляет основу железных метеоритов. Соотношение содержания большинства химических элементов в хондритах (за исключением летучих, таких, как водород, гелий, кислород и др.) близко к тому, которое характерно для Солнца. Этим хондриты резко отличаются от земных горных пород.

Для железных метеоритов, состоящих главным образом из никелистого железа, характерно содержание соединений, несвойственных земным минералам. Железокаменные метеориты состоят наполовину из силикатов, наполовину из металла.

V. На основе анализа содержания радиоактивных веществ и продуктов их распада можно установить возраст метеоритного вещества. По воздействию космических лучей на вещество метеорита можно установить, сколько времени он существует как самостоятельное небесное тело. Обычно этот возраст составляет 10^6 — 10^8 лет. Самый молодой из числа известных метеоритов имеет возраст всего 25 тыс. лет, а самый старый — 2,3 млрд. лет.

Все имеющиеся к настоящему времени данные позволяют считать, что тела, падающие на Землю в виде метеоритов, являются результатом многократного дробления астероидов размером в десятки и сотни километров. Родительскими телами большинства метеоритов являются астероиды, которые временами проходят неподалеку от Земли.

VI. *Кометы* отличаются необычным видом, который объясняет их название. (Слово «комета» образовано от греческого *komētēs aster* — длинноволосая звезда.) О кометах знали еще в древности, однако их природа долго была неясна. Так, Аристотель считал, что комета — это испарения земной атмосферы, воспламеняющиеся при соприкосновении с небесным огнем. Их считали зловещим знамением, предвещающим войны, эпидемии, стихийные бедствия. С отголосками таких предрассудков пришлось столкнуться даже в 1910 г. при сближении с Землей кометы Галлея.

Именно Э. Галлей установил, что кометы, наблюдавшиеся в 1531, 1607 и 1682 гг., имеют очень похожие орбиты. Он предположил, что это одна и та же комета; предсказал ее появление в 1758 г. Предсказание блестяще оправдалось, а за кометой закрепилось имя Галлея. Так было положено начало традиции, сохраняющейся до наших дней. Кометы стали называть именами их первооткрывателей.

Даже в наши дни значительную часть комет открывают не профессионалы-астрономы, а любители-астрономы, внима-

тельно следящие за небом. Ежегодно наблюдается несколько десятков комет, из которых большинство видны только в телескоп.

За всю историю цивилизации наблюдалось около 2000 появлений комет, но лишь примерно для половины из них есть надежные наблюдения, по которым оказалось возможным вычислить орбиты свыше 600 комет. Расчеты показывают, что эти орбиты могут значительно изменяться под действием притяжения со стороны планет.

Сами же кометы никаких возмущений в движении планет не производят. Это дает основание считать, что их масса не должна превышать 10^{12} т, что в 5—10 тыс. раз меньше массы Земли.

VII. Согласно гипотезе голландского астронома Я. Оорта кометы приходят в окрестности Солнца с периферии Солнечной системы. Там, на расстоянии 150 000 а. е., существует огромное облако комет. Их ядра сформировались совместно с планетами-гигантами из одного и того же газопылевого облака. Общее число комет оценивается величиной порядка 10^{15} .

Вдали от Солнца кометы видны только в телескоп в виде слабых туманных пятнышек. По мере приближения к Солнцу у кометы образуется хвост, который иногда вырастает до колоссальных размеров, достигая в отдельных случаях 200 млн. км. Наиболее яркие кометы становятся видны невооруженным глазом (рис. 6.15).

Главной частью кометы является не хвост, а очень небольшое по размерам ядро кометы, которое еще никогда не удавалось увидеть даже в телескоп.



Рис. 6.15

Лишь в марте 1986 г. наши космические аппараты «Вега-1» и «Вега-2» и аппарат «Джотто», созданный Европейским космическим агентством, приблизившись к ядру кометы Галлея, получили его снимки. Длина этого объекта неправильной формы составляет около 14 км, а толщина до 8 км. Ядро представляет собой скопления тугоплавких каменных частиц и замороженных летучих соединений: воды, метана, углекислого газа и др. Снаружи ядро кометы покрыто тонким (около 0,1 мм) слоем темных твердых частиц.

VIII. По мере нагревания Солнцем газы, образующиеся в результате сублимации, увлекая за собой пыль, образуют весьма протяженную атмосферу кометы (кóму), которая вместе с ядром составляет голову кометы, достигающую в диаметре 1 млн. км. Льды и другие замерзшие летучие вещества образуют поток водяного пара и газов со всей освещенной поверхности. В тех местах, где поверхностный слой разрушается, истечение газа и пыли происходит отдельными струями. Каждую секунду ядро теряет таким образом около 40 т газа и пыли.

Вещества, покинувшие ядро кометы под действием давления солнечного излучения и солнечного ветра, движутся в сторону, противоположную Солнцу, и образуют хвост кометы.

При неоднократном сближении кометы с Солнцем постепенно истощаются запасы вещества, сосредоточенного в ее ядре. Частицы, освобожденные из ядра, становятся самостоятельными небесными телами и движутся вокруг Солнца. Образуется довольно широкий поток частиц, орбиты которых могут пересекаться с орбитой Земли. В этом случае наша планета ежегодно в одни и те же даты должна встречаться с этими частицами.

IX. *Метеорное тело* — это малое космическое тело, врывающееся в атмосферу Земли с огромной скоростью (до 70 км/с). Вследствие сопротивления атмосферы эти тела интенсивно нагреваются и за доли секунды сгорают. Наблюдается метеор в виде «падающей звезды». Многие кометы являются родоначальниками метеорных потоков. Движение метеоров, относящихся к одному потоку, происходит по параллельным траекториям, но нам кажется, что они вылетают из одной точки на небе, называемой *радиантом* метеорного потока (см. рис. 4.1).

Вопросы для самопроверки

1. Что собой представляют астероиды? Где расположены их орбиты?
2. Какие вещества входят в состав астероидов?
3. Как возникают метеориты? Из каких веществ они состоят?
4. Что такое болид? Почему он сильно светится?

5. Все ли метеориты достигают поверхности Земли?
6. Зачем нужно знать строение и химический состав метеоритов?
7. Что представляют собой кометы? Где они образуются?
8. Из каких частей состоит комета? Почему вдали от Солнца комета не видна невооруженным глазом?
9. Из чего состоит ядро кометы?
10. Что происходит с кометой, когда она приближается к Солнцу?
11. Что представляет собой метеор?

Упражнения

1. Объясните, как образуется болид. Какие превращения энергии здесь происходят?
2. В атмосферу Земли влетает со скоростью 20 км/с метеорит массой 10 кг. Какова его кинетическая энергия? Какова температура плазмы у его поверхности, если метеорит увлекает примерно 0,5 кг воздуха, удельная теплоемкость которого равна 10^3 Дж/(кг·°C)? На нагрев воздуха расходуется около 60% кинетической энергии метеорита.
3. Каков период обращения кометы Галлея вокруг Солнца?
4. В каком году можно будет на Земле вновь наблюдать комету Галлея?
5. Почему при поглощении кометными ядрами солнечного излучения происходит не плавление, а сублимация льдов? На что это похоже в земных условиях?

САМОСТОЯТЕЛЬНЫЕ ПРАКТИЧЕСКИЕ РАБОТЫ

1. Наблюдения Луны. Условия видимости Луны и ее фазы можно узнать по Школьному астрономическому календарю, а приближенно даже по обычному отрывному календарю, где указываются моменты новолуния, полнолуния, первой и последней четвертей.

Первое знакомство с расположением на лунной поверхности морей и материков удобнее всего провести во время полнолуния, рассматривая Луну невооруженным глазом, но лучше с помощью шестикратного бинокля. Контуры основных морей и их названия обозначены на фотографической карте Луны и глобусе Луны. В бинокль в полнолуние можно рассмотреть и отдельные наиболее крупные кратеры, которые выглядят как темные (Платон, Риччиоли, Гримальди) или светлые пятнышки (Коперник, Кеплер, Аристарх, Тихо). Достаточно хорошо будут заметны также светлые лучи, идущие, в частности, от последнего из названных кратеров.

Более детальное ознакомление с различными формами лунного рельефа лучше провести не в полнолуние, а в фазе, близкой к четверти. В этом случае благодаря теням наиболее четко выявляется рельеф близ терминатора — границы дня и ночи на Луне. Для таких наблюдений желательно воспользоваться телескопом, применяя увеличение не менее чем в 50 раз.

При возрасте Луны три дня, считая от новолуния, терминатор пересекает Море Кризисов, где наиболее интересны для наблюдения валы, расположенные на его поверхности, и хребты, окаймляющие это море, а также Море Изобилия. На поверхности этого моря обращают на себя внимание расположенные цепочкой крупные кратеры Лангрэн, Венделин, Петавий и Фурнерий. Интересные объекты видны и при других фазах Луны.

2. Наблюдения Юпитера и его спутников. Для этих наблюдений также необходимо использовать телескоп. Условия видимости Юпитера указываются в Школьном астрономическом календаре. Наиболее интересны для наблюдений моменты затмений спутников. На Юпитере обращают на себя внимание чередующиеся темные и светлые полосы в облачном слое, которые параллельны экватору планеты.

3. Наблюдения колец Сатурна. Контрастность объектов, наблюдаемых на Сатурне, значительно меньше, чем на Юпитере. Кольца Сатурна хорошо различимы при увеличении в 50—70 раз. Они параллельны экватору планеты и видны как эллипс, вытянутость которого зависит от наклона колец по отношению к наблюдателю.

4. Наблюдения Солнца. Эти наблюдения (в телескоп) следует проводить только при условии использования темного светофильтра, надетого на объектив, а для обеспечения большей безопасности — получая изображение Солнца на экране.

Совместив изображение Солнца на экране с заранее заготовленной на листе бумаги окружностью, следует тонко отточенным карандашом нанести положение солнечных пятен, а затем постараться зарисовать форму наиболее крупных из них. Повторив аналогичные наблюдения и зарисовку спустя 2—3 дня, можно заметить изменение положения и формы пятен, изменение их числа. Сравнив положение пятен при первой и последующих зарисовках, можно установить направление и скорость вращения Солнца.

Г Л А В А 7. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК

§ 7.1. ПЕРВОНАЧАЛЬНЫЕ СВЕДЕНИЯ ОБ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ТОКЕ

I. Электрические явления, изученные в первой главе, позволяют объяснить, что представляет собой *электрический ток*, который широко используется в технике и быту. Простой опыт позволяет разобраться в вопросе, что такое электрический ток.

Два электрометра с большими шарами располагают на некотором расстоянии друг от друга (рис. 7.1). Один из них электризуют заряженной палочкой, что можно увидеть по отклонению стрелки. Затем за изолирующую ручку берут проводник, в середину которого впаяна неоновая лампочка. Соединяют наэлектризованный шар с ненаэлектризованным (см. рис. 7.1). Лампочка на мгновение вспыхивает. По отклонениям стрелок на электрометрах приходят к выводу: левый шар теряет часть своего заряда, а правый такой же заряд приобретает.

Подумаем над тем, что происходит в данном опыте. Так как заряд одного шара уменьшился, а заряд другого увели-

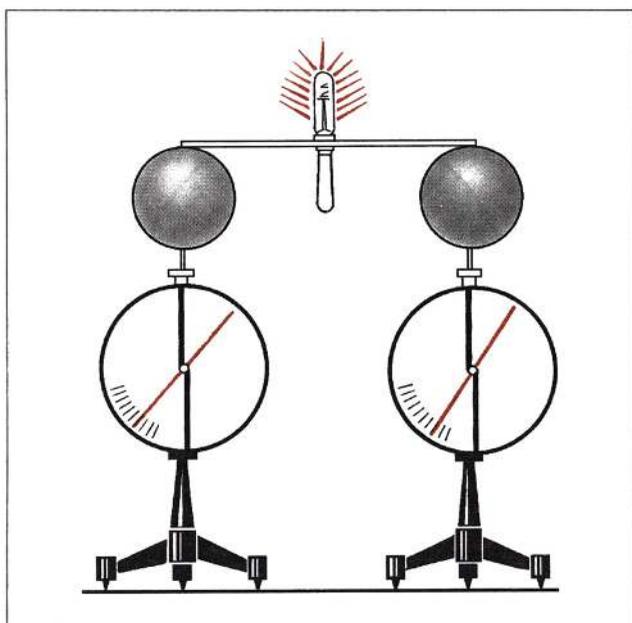


Рис. 7.1

чился, то это означает, что по проводнику, которым соединяли шары, прошли электрические заряды, что сопровождалось свечением лампочки. В этом случае говорят, что по проводнику протекает электрический ток.

II. Итак, ток, протекавший по соединительному проводнику и неоновой лампочке, был кратковременным: лампочка вспыхнула и погасла. А как получить ток, который существовал бы длительное время? Очевидно, что для этого одному из концов проводника необходимо сообщать избыточные заряды, а от другого — заряды отводить, т. е. электризовать их по-разному. Для этого используются специальные устройства, получившие название *источников тока*. Источником тока может быть и электрофорная машина, у которой при вращении дисков происходит непрерывное разделение зарядов (рис. 7.2). В качестве источника тока можно использовать батарею гальванических элементов, аккумулятор и т. д.

Закрепив неоновую лампочку в штативе и соединив с шарами электрофорной машины, начинают вращать диски (рис. 7.3). Лампочка светится все время, пока диски вращаются.

III. *Что же заставляет заряды двигаться вдоль проводника?* Ответ может быть только один — *электрическое поле* (см. § 1.6). Действительно, при работе источника тока между его полюсами создается электрическое поле. Когда к этим полюсам присоединяют проводник, т. е. последний попадает в электрическое поле, созданное источни-

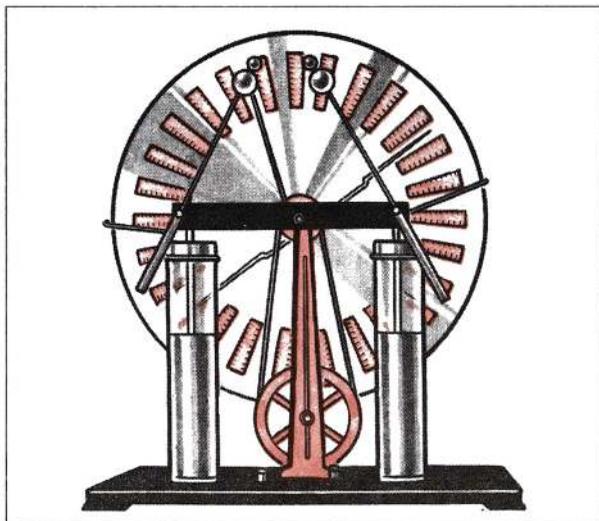


Рис. 7.2

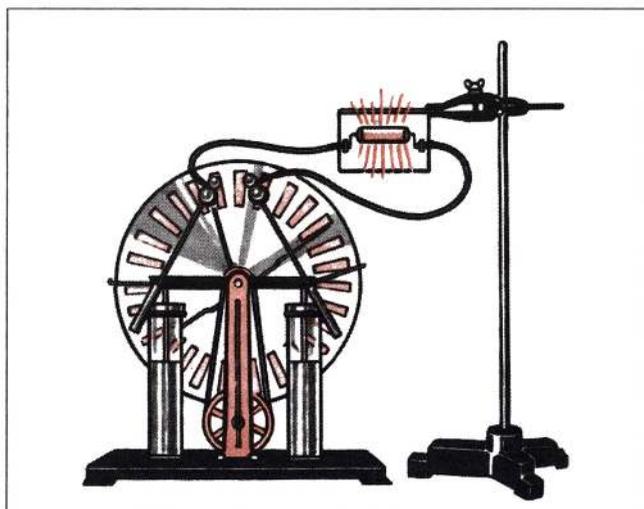


Рис. 7.3

ком тока, то это поле в проводнике начинает действовать на свободные электрические заряды и заставляет их двигаться по проводнику с одного полюса на другой.

Итак, *электрическим током называется упорядоченное движение электрических зарядов под действием электрического поля.*

К полюсу источника тока, который заряжен положительно («+») и называется *анодом*, притягиваются электроны. Отрицательно заряженный полюс («-») имеет избыток электронов и называется *катодом*.

IV. *Источник тока, соединительные проводники и потребитель* (например, лампочка) образуют *электрическую цепь*, состоящую из двух участков. Первый — *внешний*. Он состоит из соединительных проводников и лампочки (или другого потребителя электрической энергии). Второй — *внутренний*. Он находится в самом источнике тока.

На внутреннем участке (в источнике тока) происходит разделение электрических зарядов: положительные собираются на аноде, отрицательные (например, электроны) — на катоде. Но для того чтобы разделить положительные и отрицательные заряды, надо совершить работу. Вращение дисков электрофорной машины и обеспечивает работу по разделению электрических зарядов. В этом случае работа по разделению зарядов совершается за счет механической энергии. Между кондукторами электрофорной машины создается электрическое поле. В химическом источнике тока, например в аккумуляторе, эта работа совершается за счет энергии

химической реакции. Между полюсами аккумулятора накапливаются разделенные электрические заряды и таким образом создается электрическое поле. Следовательно, *в источнике тока происходит превращение какой-либо энергии в энергию электрического поля*. Например, в электрофорной машине механическая энергия преобразуется в энергию электрического поля, которую для простоты называют просто *электрической энергией*. В батарейке для карманного фонаря в электрическую энергию преобразуется внутренняя энергия веществ, участвующих в химической реакции. В солнечных батареях, расположенных на космических кораблях, энергия солнечного света преобразуется в электрическую энергию.

На внешнем же участке цепи происходит превращение электрической энергии в другие виды энергии. Например, в лампочке накаливания электрическая энергия преобразуется в энергию излучения (видимого света и инфракрасного излучения); в электродвигателе — в механическую энергию; в утюге и электрической плитке — во внутреннюю энергию нагревательного элемента, который путем теплообмена передает некоторое количество теплоты окружающим телам.

Вопросы для самопроверки

1. Что называют электрическим током?
2. Почему электрические заряды движутся по цепи?
3. Что происходит во внутренних участках цепи?
4. В какие виды энергии может превратиться энергия электрического тока на внешнем участке цепи?
5. Нарисуйте электрические силовые линии между полюсами источника тока, когда к источнику не подключена внешняя нагрузка.

§ 7.2. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК В МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПРОВОДНИКАХ

I. В предыдущем параграфе мы показали, что электрический ток — *это упорядоченное движение свободных электрических зарядов под действием электрического поля источника*. Но мы пока не выяснили два вопроса: какие это заряды? Как они движутся? Сейчас, пожалуй, настало время получить ответ и на эти вопросы. Но предварительно необходимо вспомнить внутреннее строение металлических проводников.

Как вам уже известно, в любом металле часть валентных электронов покидает свои места в атоме, в результате чего атом превращается в положительный ион. Положитель-

ные ионы в металлах располагаются в строгом порядке, образуя остов металла — кристаллическую решетку (рис. 7.4). Между ионами хаотически движутся свободные электроны, которые образуют электронный газ.

II. Какие же электрические заряды движутся под действием электрического поля в металлических проводниках? Мы можем предположить, что под действием электрического поля движутся свободные электроны. Но это наше предположение нуждается в доказательстве.

В 1899 г. К. Рикке на трамвайной подстанции в Штутгарте включил в главный провод, питающий трамвайные линии, последовательно друг другу торцами три тесно прижатых цилиндра; два крайних были медными, а средний — алюминиевым. Через эти цилиндры более года проходил электрический ток. Произведя тщательный анализ того места, где цилиндры контактировали, К. Рикке не обнаружил в меди атомов алюминия, а в алюминии — атомов меди, т. е. диффузия не произошла. Таким образом, он экспериментально доказал, что при прохождении по проводнику электрического тока ионы не перемещаются. Следовательно, перемещаются одни лишь свободные электроны, а они у всех веществ одинаковые. Итак, *электрический ток в ме-*

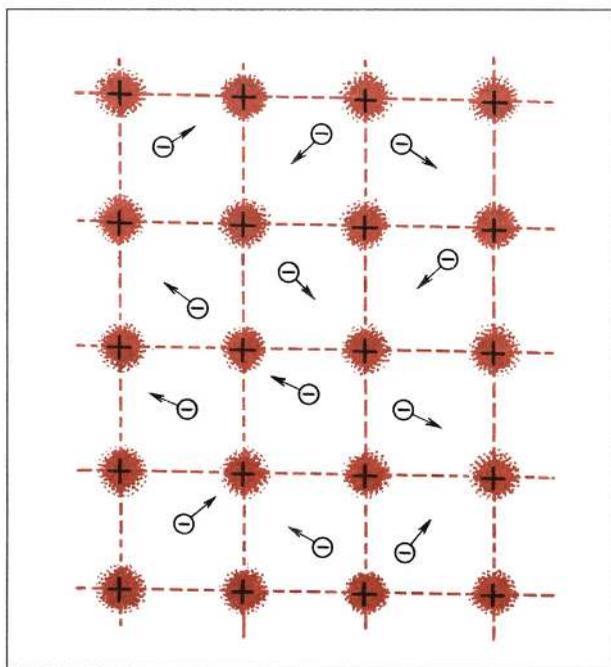


Рис. 7.4



Рис. 7.5

таллических проводниках создается упорядоченным движением свободных электронов.

III. Остается выяснить: как движутся свободные электроны? Если в проводнике нет электрического поля, то электроны движутся хаотично, аналогично тому, как движутся молекулы газов или жидкостей. В каждый момент времени скорости различных электронов отличаются по модулям и по направлениям. Если же в проводнике создано электрическое поле, то электроны, сохраняя свое хаотичное движение, начинают смещаться в сторону положительного полюса источника. Вместе с беспорядочным движением электронов возникает и упорядоченный их перенос — дрейф. На рисунке 7.5 схематически, весьма приближенно, показана траектория движения одного электрона под действием электрического поля из точки 1 в точку 2.

Все это дает право сделать следующий очень важный вывод: *электрический ток в металлических проводниках — это упорядоченное движение электронов под действием электрического поля, создаваемого источником тока.*

Вопросы для самопроверки

1. Каково строение металлического проводника?
2. Как можно доказать, что электрический ток в металлическом проводнике создается не движением ионов, а движением электронов? Опишите соответствующий опыт.
3. Как движутся электроны в проводнике в отсутствие электрического поля и при наличии поля?

§ 7.3. ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ НАПРЯЖЕНИЕ

I. Под действием электрического поля, которое создается источником тока, свободные электроны движутся по металлическому проводнику. При этом совершается работа: нагревается нить накала лампочки или спираль электроплитки, приводится в движение электрический двигатель и т. д.

Сказанное свидетельствует о том, что главную роль в явлении протекания электрического тока играет электрическое поле. В качестве энергетической характеристики электрического поля вводится физическая величина, называемая *электрическим напряжением* или просто *напряжением*.

II. Величина, равная отношению работы, совершаемой электрическим полем, к модулю перемещаемого заряда, называется *напряжением на данном участке цепи*.

Напряжение принято обозначать буквой U , работу буквой A , а заряд буквой q . Используя эти обозначения, напряжение можно выразить так:

$$U = A/q.$$

III. Вольт равен электрическому напряжению на участке цепи, где при протекании заряда, равного 1 Кл, совершается работа, равная 1 Дж: $1 \text{ В} = 1 \text{ Дж}/1 \text{ Кл}$.

IV. Для измерения напряжения существуют специальные приборы — *вольтметры*. Знакомый вам электромметр может быть использован как электростатический вольтметр, если его шкалу проградуировать. Для измерения напряжения клеммы вольтметра подключают к началу и концу

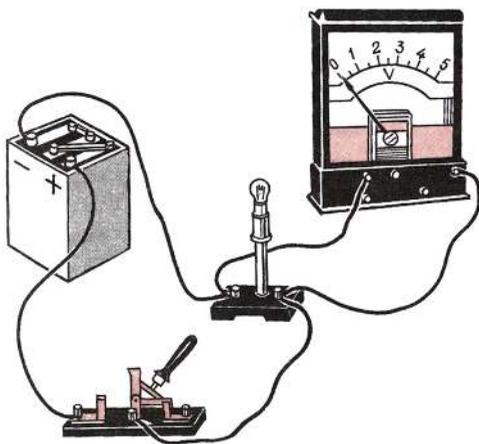


Рис. 7.6

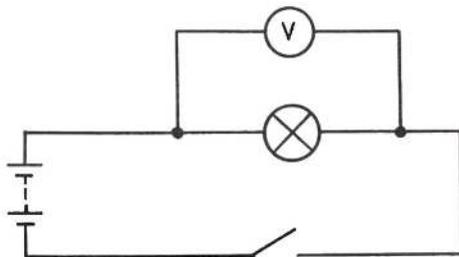


Рис. 7.7

того участка, напряжение на котором надо определить (рис. 7.6), т. е. параллельно. На схемах вольтметр обозначается так, как это показано на рисунке 7.7.

В 1799 г. А. Вольта построил первый в истории источник тока. Он состоял из медного и цинкового кружочков, разделенных кружочком сукна, смоченного серной кислотой. При соприкосновении цинка и меди с раствором кислоты в результате химических реакций пластинки электризовались следующим образом: цинковая — отрицательно, а медная — положительно. Напряжение между пластинами было очень маленьким (около 1 В).

Чтобы получить более высокое напряжение, Вольта в том же году построил батарею из 20 цинковых, 20 медных и 20 суконных кружочков, положенных друг на друга. Эта батарея получила название *вольтов столб*. При таком соединении элементов в батарею общее напряжение батареи равно сумме напряжений от каждого элемента в отдельности.

Батарею элементов на схемах принято изображать, как это показано на рисунке 7.7. При этом обычно длинной черточкой обозначают положительный полюс, короткой — отрицательный.

Вопросы для самопроверки

1. Что характеризует электрическое напряжение?
2. Как выразить напряжение через работу поля и заряд?
3. Чему примерно было равно напряжение на полюсах вольтова столба?
4. В каких единицах выражается напряжение?

Упражнения

1. Посмотрите дома (или в кабинете физики) на батарейку от карманного фонаря и определите (примерно): напряжение на ее полюсах; напряжение на одном элементе.
2. Соберите электрическую цепь, изображенную на рисунке 7.8. Измерьте напряжение между точками 1 и 2; 1 и 3; 1 и 4; 2 и 3; 3 и 4. Результаты запишите так: $U_{1,2} = \dots$ $U_{1,3} = \dots$ и т. д.
3. При перемещении на участке цепи заряда, равного 3 Кл, электрическое поле совершило работу 120 Дж. Найдите напряжение на этом участке.
4. Какую работу совершит электрическое поле, переместив заряд 5 Кл, если напряжение на этом участке цепи равно 120 В?

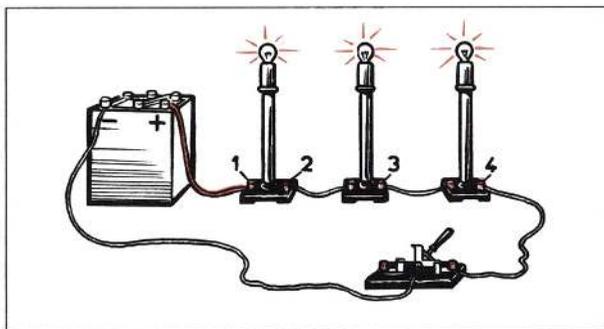


Рис. 7.8

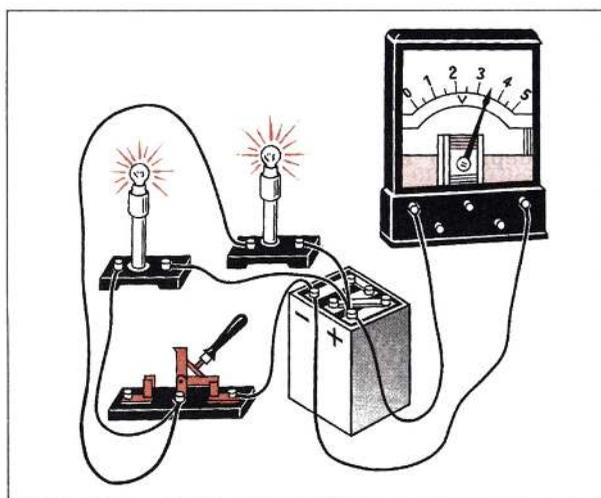


Рис. 7.9

§ 7.4. СИЛА ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА

И. К одному и тому же источнику тока подключили две разные электрические лампочки так, как показано на рисунке 7.9. Лампочки стали светить по-разному: одна ярко, а другая тускло. По обеим лампочкам проходил электрический ток; напряжение на их зажимах было одно и то же. Но почему же лампочки светили по-разному? Очевидно, по ним протекали разные токи.

Для оценки и сравнения электрических токов ввели специальную величину — силу тока I , которая равна отношению электрического заряда q , протекающего через попереч-

ное сечение проводника за время t , к этому промежутку времени:

$$I = q/t.$$

II. В Международной системе единиц (СИ) сила тока выражается в *амперах* (А). Ампер является одной из основных единиц и определяется по силе взаимодействия двух параллельных проводников с током (см. § 9.6).

Сила тока в проводнике равна одному амперу, если через поперечное сечение проводника за время, равное одной секунде, протекает электрический заряд, равный одному кулону: $1 \text{ A} = 1 \text{ Кл/1с}$.

Для измерения слабых токов используется $1 \text{ мА} = 10^{-3} \text{ A}$ и $1 \text{ мкА} = 10^{-6} \text{ A}$, сильных токов — $1 \text{ кА} = 10^3 \text{ A}$.

III. Силу тока измеряют специальными приборами — *амперметрами*. Амперметр включается последовательно с тем прибором, в котором надо измерить силу тока (рис. 7.10). На схемах амперметр изображается так, как показано на рисунке 7.11.

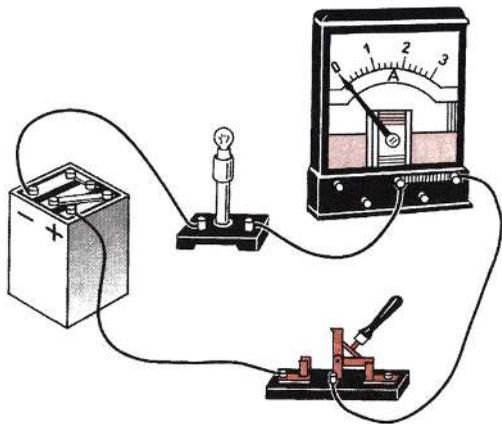


Рис. 7.10

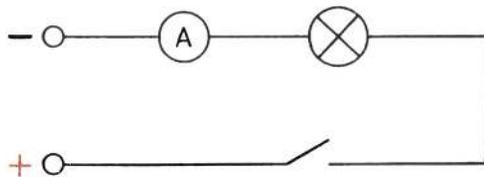


Рис. 7.11

Вопросы для самопроверки

1. Какую физическую величину называют силой тока? Что она характеризует?
2. Как выразить силу тока через электрический заряд и время?
3. В каких единицах выражается сила тока? Дайте определение.
4. Каким прибором измеряют силу тока? Как этот прибор включается в цепь?
5. Чему примерно равна сила тока, потребляемого для освещения вашей квартиры (класса)?

Упражнения

1. Соберите цепь, изображенную на рисунке 7.9. Включите в нее амперметр и измерьте силу тока. Выключите одну из лампочек и еще раз измерьте силу тока. Что вы обнаружили?
2. Какова сила тока в цепи, если за время 15 с через поперечное сечение проводника протекает электрический заряд 125 Кл?
3. Какой электрический заряд протекает через электрический утюг за время 15 мин, если сила тока равна 3 А?
4. Докажите, что сила тока во всех участках неразветвленной цепи одна и та же. (Воспользуйтесь законом сохранения электрического заряда (см. § 1.2).)

§ 7.5. ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ

1. На рисунке 7.12 изображена электрическая цепь, с которой проводят следующий опыт. При замыкании цепи лампочка начинает ярко светить, а амперметр показывает некоторое значение силы тока. Разомкнув ключ, подключают последовательно с лампочкой никелиновую проволоку AB длиной 1—2 м. Снова замыкают цепь. Видят, что лампочка светит более тускло, а сила тока в цепи уменьшается. Если же вместо никелиновой проволоки включить в цепь такую же по размерам проволоку из нихрома, то лампочка станет светить совсем тускло, а амперметр покажет еще меньшую силу тока.

О чем же говорит этот опыт? Как видно включение последовательно с лампочкой дополнительных проводников приводит к уменьшению силы тока в цепи. Чтобы убедиться в том, что не только нихромовые и никелиновые проводники обладают таким свойством, последовательно с лампочкой включают катушку с большим числом витков тонкой медной проволоки. Замыкают цепь и видят: лампочка светит тускло, а сила тока становится меньше.

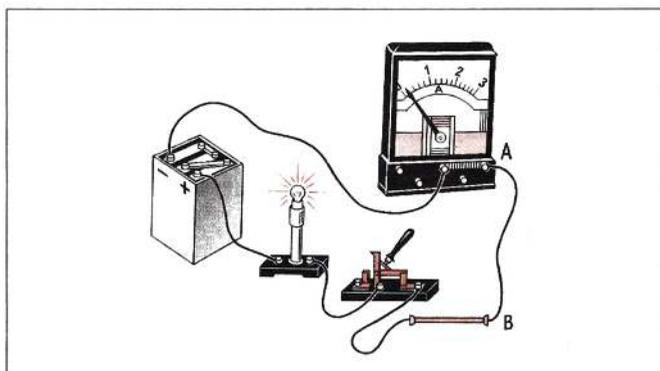


Рис. 7.12

Свойство проводников ограничивать силу тока в цепи, т.е. противодействовать электрическому току, называют электрическим сопротивлением. Электрическое сопротивление проводника принято обозначать буквой R .

II. Описанные опыты говорят не только о том, что проводники обладают сопротивлением, но и о том, что сопротивление разных проводников разное. Выясним, от чего и как зависит сопротивление проводников.

Рассмотрим электрическую цепь, показанную на рисунке 7.13.

Источник тока в такой цепи (например, аккумулятор) поддерживает на внешнем участке цепи постоянное напряжение. Широкими черными линиями условно изображены соединительные медные провода. Линией с делениями на шкале 1—2—3—4—5 изображен тонкий провод из нихрома, натянутый на изолирующей панели. Амперметр измеряет силу тока в цепи, а вольтметр — напряжение на включен-

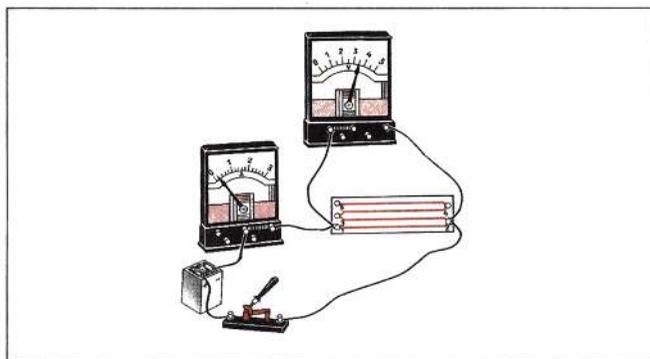


Рис. 7.13

ной части нихромового проводника. Подключают медный провод, а с ним и вольтметр к точкам 1 и 2. Замыкают цепь и отмечают показания вольтметра и амперметра. Затем цепь размыкают и переключают медный провод (а с ним и вольтметр) от точки 2 к точке 3. Снова замыкают цепь. Видят, что напряжение не меняется, а сила тока в 2 раза уменьшается. Опять размыкают цепь и подключают медный провод и вольтметр к точке 4. И снова видят: напряжение осталось прежним, а сила тока стала в 3 раза меньше. И наконец, подключают медный провод к точке 5 и обнаруживают, что напряжение опять осталось постоянным, а сила тока уменьшилась уже в 4 раза. Таким образом, приходят к выводу: *увеличение длины проводника в несколько раз при одинаковом напряжении приводит к уменьшению силы тока во столько же раз.* Отсюда следует, что *сопротивление проводника прямо пропорционально его длине.*

III. Теперь берут никелиновый проводник длиной 1 м и включают в цепь так же, как и в предыдущем опыте. Амперметр показывает некоторую силу тока. Затем подключают проводник такой же длины из того же материала, но с площадью поперечного сечения в 2 раза больше. Видят: сила тока стала в 2 раза больше. Подключив точно такой же третий проводник, но с площадью поперечного сечения больше уже в 3 раза, убеждаются, что и сила тока стала в 3 раза больше.

Вывод: *чем больше площадь поперечного сечения проводника (при одинаковой длине и одинаковом материале), тем слабее он ограничивает силу тока, т. е. его сопротивление становится меньше.* Итак, из опыта следует, что *сопротивление проводника обратно пропорционально площади его поперечного сечения.*

IV. Наконец, берут три проводника одинаковой длины. Площади поперечного сечения тоже одинаковые, но эти проводники изготовлены из разных материалов, например из железа, алюминия и нихрома. Включают их в цепь и видят, что они по-разному ограничивают силу тока, т. е. у них сопротивления разные. Следовательно, *сопротивление зависит и от материала, из которого сделан проводник.*

Объединив результаты проведенного экспериментального исследования, можно записать:

$$R = \rho \frac{l}{S}.$$

Итак, *сопротивление проводника прямо пропорционально длине проводника, обратно пропорционально площади его*

поперечного сечения и зависит от материала, из которого он изготовлен.

Буквой ρ мы обозначили величину, характеризующую материал проводника. Эта величина называется *удельным сопротивлением*. Оно равно сопротивлению проводника, изготовленного из данного материала, длиной 1 м и площадью поперечного сечения 1 мм².

V. Если в данной цепи (см. рис. 7.13) нагревать один из проводников, например железный, то можно обнаружить, что с повышением температуры проводника сила тока на участке цепи убывает, а следовательно, возрастает его сопротивление.

Причина такого явления заключается в следующем. При повышении температуры проводника усиливаются колебания ионов в узлах кристаллической решетки. В результате свободные электроны будут чаще сталкиваться с ионами, что значительно мешает дрейфу электронов и тем самым ограничивает силу тока.

VI. В Международной системе единиц (СИ) сопротивление выражается в *омах* (Ом).

В той же системе единиц удельное сопротивление выражается в ом-метрах (Ом·м). На практике часто используется внесистемная единица Ом·мм²/м. Она равна сопротивлению проводника длиной 1 м и сечением 1 мм².

Вопросы для самопроверки

1. Какую физическую величину называют электрическим сопротивлением? Какую функцию выполняет сопротивление в электрической цепи?
2. От чего и как зависит сопротивление металлических проводников?
3. Как зависит сопротивление металлических проводников от температуры? В чем причина этого явления?
4. Почему в опыте, изображенном на рисунке 7.13, проводники брались толстыми и медными?

Упражнения

1. Определите сопротивление никелинового проводника длиной 3 м и площадью поперечного сечения 2 мм² ($\rho = 0,45$ Ом·мм²/м).
2. Какой длины нужно взять провод из нихрома площадью поперечного сечения 0,2 мм², чтобы изготовить спираль для электрической плитки сопротивлением 80 Ом ($\rho = 1,1$ Ом·мм²/м)?
3. Единица СИ удельного сопротивления Ом·м. На практике чаще применяется внесистемная единица

Ом·мм²/м. Найдите соотношение между этими единицами.

4. Найдите диаметр константанового провода длиной 1 м, сопротивление которого 2,5 Ом ($\rho = 0,5$ Ом·мм²/м).

§ 7.6. ЗАКОН ОМА

I. Для характеристики явлений, происходящих в электрических цепях, были введены следующие понятия: напряжение, сила тока и сопротивление. Вы, очевидно, заметили, что все эти физические величины как-то связаны между собой.

Впервые явления в электрических цепях глубоко и тщательно изучил Г. Ом. Ему-то и удалось в 1826 г. экспериментально установить зависимость между силой тока, напряжением и сопротивлением в электрических цепях. Эта зависимость оказалась очень важной и получила название **закон Ома**. Чтобы понять его содержание, рассмотрим ряд опытов.

II. Собирают электрическую цепь с источником тока. Напряжение можно менять, подключая один из проводов к разным клеммам аккумулятора, оставляя сопротивление постоянным (рис. 7.14). Амперметр, как известно, в этой цепи измеряет силу тока, протекающего по проводнику с заданным сопротивлением, а вольтметр — напряжение на концах проводника. Ключ замыкают и отмечают показания амперметра и вольтметра.

Увеличивают напряжение на проводнике АВ в 2, 3 и 4 раза. Видят, что сила тока увеличивается во столько же раз. Таким образом, приходят к выводу: *при постоянном сопротивлении сила тока, протекающего через проводник, прямо пропорциональна напряжению на его концах*. График этой зависимости изображен на рисунке 7.15.

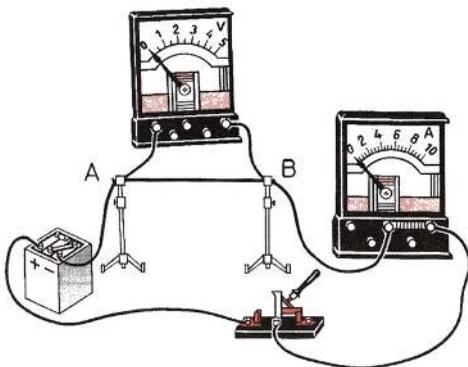


Рис. 7.14

III. В той же электрической цепи (см. рис. 7.14) источником тока на проводнике AB поддерживают постоянное напряжение. Включают проводник с известным сопротивлением и по показаниям амперметра и вольтметра отмечают силу тока и напряжение на этом проводнике. Затем берут другой проводник; его сопротивление в 2 раза больше, т. е. он из того же материала и той же площади поперечного сечения, но в 2 раза больше длина проводника. Опыт повторяют и видят, что при постоянном (как в первом опыте) напряжении на концах этого проводника сила тока оказывается в 2 раза меньше. И наконец, берут проводник, сопротивление которого в 3 раза меньше первоначального. Устанавливают опять то же напряжение и видят: сила тока стала в 3 раза больше. Во сколько бы раз ни увеличивали (или уменьшали) сопротивление, во столько же раз уменьшается (увеличивается) сила тока.

Опыты свидетельствуют о том, что при постоянном напряжении сила тока обратно пропорциональна сопротивлению. График этой зависимости изображен на рисунке 7.16.

IV. Выбрав соответствующую единицу сопротивления, полученные в опыте закономерности можно записать в следующем виде:

$$I = U/R.$$

Эта формула выражает закон Ома: сила тока на участке цепи прямо пропорциональна напряжению на этом участке (при заданном сопротивлении) и обратно

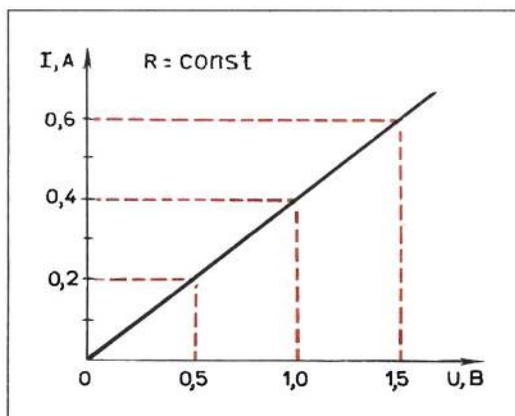


Рис. 7.15

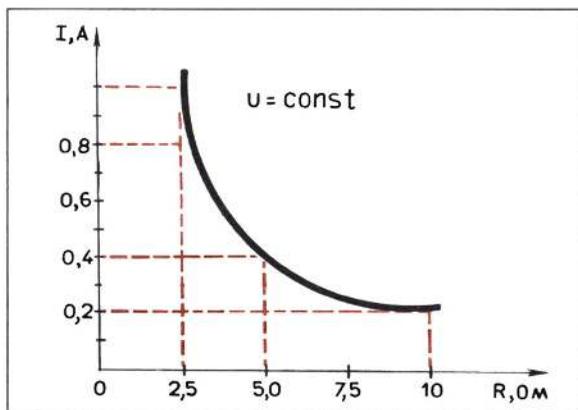


Рис. 7.16

пропорциональна сопротивлению участка (при заданном напряжении).

V. Из закона Ома можно получить формулу

$$R = U/I.$$

Так как сопротивление данного проводника не зависит ни от напряжения, ни от силы тока, то эту формулу надо читать так: *сопротивление данного проводника равно отношению напряжения на его концах к силе протекающего по нему тока*. Именно на основе этого соотношения и находят сопротивление проводника опытным путем.

VI. В СИ за единицу электрического сопротивления принят 1 Ом. Это сопротивление такого проводника, в котором при напряжении 1 В на концах по нему протекает ток силой 1 А:

$$1 \text{ Ом} = 1 \text{ В}/1 \text{ А}.$$

Чтобы иметь представление о сопротивлении 1 Ом, укажем, что сопротивление электрической стоваттной лампы, рассчитанной на напряжение 220 В, равно примерно 500 Ом, а сопротивление электрического утюга (на 220 В) — примерно 80 Ом.

Вопросы для самопроверки

1. Как читается закон Ома? Как он был установлен?
2. Как выглядят графики зависимости силы тока от напряжения и силы тока от сопротивления?
3. Как читается формула $R = U/I$?

Упражнения

1. В лампочке, рассчитанной на напряжение 220 В, сила тока равна 0,5 А. Определите сопротивление нити лампы в рабочем состоянии.
2. Электрическая плитка рассчитана на напряжение 220 В. Сопротивление ее спирали равно 75 Ом. Найдите силу тока.
3. Через никелиновый проводник длиной 5 м и сечением $0,12 \text{ мм}^2$ протекает ток силой 1,5 А при напряжении 24 В. Найдите удельное сопротивление никелина.
4. Для изготовления спирали электрического нагревателя, рассчитанного на напряжение 120 В и потребляющего ток силой 5 А, используется манганиновый проводник сечением $0,3 \text{ мм}^2$. Определите длину этого проводника ($\rho = 0,45 \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2/\text{м}$).

§ 7.7. ТОК В ЭЛЕКТРОЛИТАХ

I. Ионные кристаллы являются изоляторами. В самом деле, хотя эти кристаллы и состоят из положительно и отрицательно заряженных ионов, однако их электрические заряды не являются свободными, ибо они связаны в кристаллической решетке. Это подтверждают многие опыты. Стекло, фарфор, фаянс, мрамор — все эти материалы имеют ионную структуру, и все они являются хорошими изоляторами (в холодном состоянии).

Хорошим изолятором является и дистиллированная вода, которая имеет молекулярную структуру, поэтому в ней нет свободных электрических зарядов, а следовательно, в ней не может возникнуть электрический ток. Если собрать цепь, изображенную на рисунке 7.17, и налить в сосуд дистиллированную воду, то лампочка гореть не будет, а амперметр покажет отсутствие электрического тока в цепи.

Но если растворить в воде какую-либо соль, кристаллы которой имеют ионную структуру, например поваренную соль (хлорид натрия NaCl) или медный купорос (сульфат меди CuSO_4), то в цепи появится ток; лампочка загорится. Попытаемся разобраться, в чем тут дело.

II. Как уже говорилось, молекула воды полярна (см. рис. 2.8). Поэтому молекулы воды своим электрическим полем способствуют распаду ионной решетки на свободные ионы.

Распад ионной решетки под действием молекул растворителя (в данном случае — воды) называется электролитической диссоциацией. Вещества, которые под действием

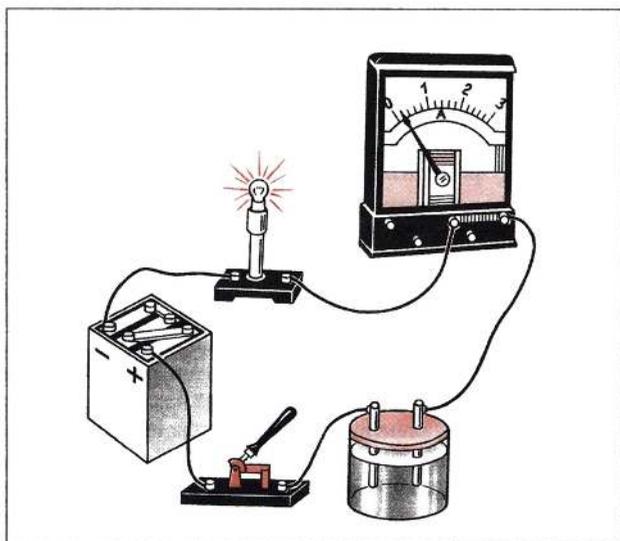


Рис. 7.17

растворителя диссоциируют (распадаются) на ионы, называются электролитами.

Типичными электролитами являются соли, кислоты и щелочи, многие органические соединения.

III. Что же произойдет, если в растворе электролита создать электрическое поле? Очевидно, что положительные ионы станут двигаться к отрицательно заряженному электроду — катоду, а отрицательные ионы — к положительно заряженному электроду, т. е. к аноду. В цепи возникнет электрический ток.

Таким образом, *ток в растворах электролитов — это упорядоченное движение ионов.* Что это действительно так, показывает опыт.

При протекании тока через раствор медного купороса мы обнаружим, что на катоде через некоторое время образуется тонкий слой меди. Следовательно, в растворе под действием электрического поля к катоду перемещаются положительно заряженные ионы меди, которые при контакте с катодом присоединяют к себе недостающие электроны и нейтрализуются. Образовавшиеся нейтральные атомы оседают на электроде.

Процесс выделения вещества на электродах при протекании электрического тока через растворы или расплавы электролитов называется электролизом.

IV. Электролиз имеет широкое применение в промышленности. С помощью электролиза можно осаждать на ме-

таллических деталях тонкие слои других металлов. Так производится никелирование, хромирование, золочение различных изделий.

Пропуская электрический ток через расплавы некоторых солей, можно выделять металлы в чистом виде. Так получают алюминий, рафинированную (сверхчистую) медь и ряд других металлов.

Вопросы для самопроверки

1. В чем заключается явление электролитической диссоциации?
2. Что такое электролит? Приведите примеры.
3. Почему соли с ионной связью являются электролитами?
4. Каков механизм тока в электролитах?
5. Чем отличается электропроводность растворов или расплавов электролитов от электропроводности металлов?
6. Что такое электролиз? Где он применяется?
7. Какие опыты доказывают ионную теорию проводимости растворов и расплавов электролитов?
8. Дистиллированная вода не является проводником. Почему же водопроводная вода, а также речная и морская является хорошим проводником?

§ 7.8. ТОК В ГАЗАХ

I. Газы являются хорошими изоляторами. Дело в том, что при обычных условиях — низких температурах и отсутствии внешнего облучения — они состоят из нейтральных атомов или молекул. В них нет свободных электрических зарядов, упорядоченное перемещение которых и порождает электрический ток. Однако при некоторых условиях можно получить электрический ток и в газах.

II. Из космоса в атмосферу проникает поток заряженных частиц — протонов (ядер атомов водорода), электронов и некоторых других частиц. Космические частицы влетают в атмосферу с огромной скоростью, примерно 10^7 — 10^8 м/с, следовательно, они обладают очень большой кинетической энергией. И в результате, соударяясь с атомами или молекулами газа, эти быстрые космические частицы выбивают из них электроны, т. е. ионизуют их; в газе образуется небольшое число свободных электрических зарядов-электронов и положительных ионов. Такой газ называют *ионизованным*.

III. Пусть ионизованный газ находится в электрическом поле, у которого высокое напряжение. В таком поле электроны газа разгоняются до больших скоростей и приобретают достаточную кинетическую энергию, чтобы при соударении с нейтральным атомом или молекулой выбить из них

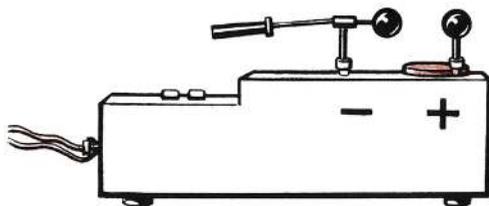


Рис. 7.18

вторичный электрон. Тот, в свою очередь, ионизует соседний атом и т. д. Этот процесс приобретает лавинообразный характер и называется *ударной ионизацией*.

За счет ударной ионизации число свободных электронов и ионов резко возрастает. Как уже говорилось в § 2.6, *такой ионизованный газ называется плазмой*. В плазме возникает электрический ток.

Такова природа тока в неоновых трубках, в лампах дневного света и т. п.

IV. Газовым разрядом является *электрическая искра*. Если поместить разрядные шарики электрофорной машины на расстоянии 3—4 см друг от друга (см. рис. 7.2) и быстро вращать диски, то между шариками проскакивает искра, похожая на маленькую молнию. Такую же искру можно получить между разрядными шариками высоковольтного выпрямителя (рис. 7.18).

Вопросы для самопроверки

1. Почему газы в обычных условиях являются хорошими изоляторами?
2. За счет чего в газах возникают свободные электрические заряды?
3. Как происходит ударная ионизация?
4. Что такое плазма?
5. Какие вы знаете примеры газового разряда?
6. Как возникает электрическая искра?
7. Почему для возникновения электрической искры необходимо высокое напряжение?

§ 7.9. МОЛНИЯ

I. Каждый из нас неоднократно наблюдал грозу, видел молнии и слышал гром. И конечно, хотел узнать, что это такое. Изучением этого явления природы занимались мно-

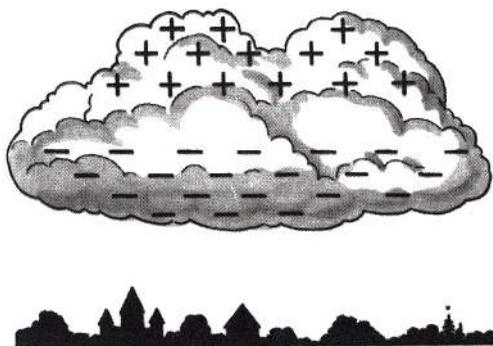


Рис. 7.19

гие ученые, в частности Б. Франклин, М. В. Ломоносов, Г. В. Рихман. В 1753 г., исследуя атмосферное электричество, Г. В. Рихман погиб от удара молнии.

Многолетние исследования позволили установить, что при движении воздуха за счет конвекции различные воздушные потоки и облака в результате соприкосновения электризуются. При этом одна часть облака (например, верхняя) электризуется положительно, а другая — отрицательно (рис. 7.19).

Напряжение между двумя облаками, а также между облаками и Землей достигает десятков миллионов вольт. В результате между облаками или между облаком и Землей возникает гигантская искра — молния (рис. 7.20). Длина молнии достигает нескольких километров, а диаметр ее канала иногда составляет метр и больше. Сила тока в канале молнии огромна: от 1—2 до 200 кА. Однако длительность разряда мала: она составляет тысячные доли секунды. Поэтому общий заряд, протекающий при одной вспышке молнии, не превосходит десятка или сотни кулонов.

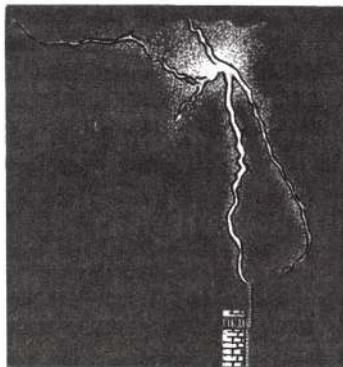


Рис. 7.20

II. Удары молний исключительно опасны. Молния может разрушить здание, опору электропередач, заводскую трубу, вызвать пожар и т. д. Особенно опасна молния для человека. Ее удар смертелен для всего живого, но в людей и животных молния уда-

ряет сравнительно редко и только в тех случаях, когда сам человек из-за незнания создает для этого благоприятные условия.

Молния чаще ударяет в высокие предметы, а из двух предметов одинаковой высоты — в тот, который является лучшим проводником. Находясь в поле, нельзя скрываться от дождя под одиноко стоящим деревом или в копне сена, а в лесу надо уходить от очень высоких деревьев. Находясь в горах, лучше всего прятаться от дождя в пещеру или под глубокий уступ.

III. Для защиты одиноко стоящих сооружений (зданий, опор линий электропередач и т. д.) вблизи них устанавливают мачту с заостренным металлическим стержнем, который хорошо соединен (спаян, сварен) толстым проводом с закопанным глубоко в землю металлическим предметом (рис. 7.21). Это устройство получило название *молниеотвода* (часто называют громоотводом).

Упрощенно принцип работы молниеотвода можно объяснить так. Грозовая туча своим электрическим полем наводит в молниеотводе электрический заряд, у которого знак противоположен знаку заряда тучи. Этот заряд, стекая с острия молниеотвода, нейтрализует заряд тучи. Защищаемое молниеотводом пространство на поверхности Земли определяется высотой молниеотвода (рис. 7.22).

Вопросы для самопроверки

1. Как образуется молния между грозовым облаком и поверхностью Земли?

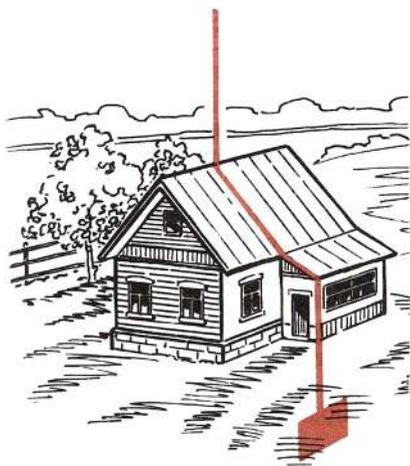


Рис. 7.21

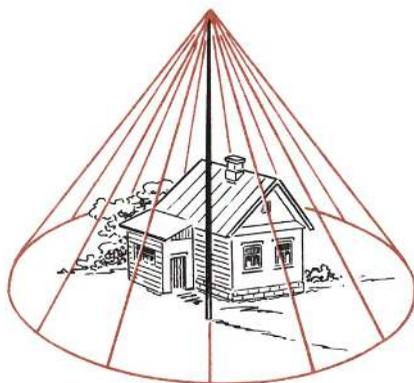


Рис. 7.22

2. Дождь застал вас в поле. Невдалеке от вас стоит высокое дерево с могучей кроной. Следует ли бежать к нему, чтобы спрятаться от дождя?
3. Провода, соединяющие молниеотвод с заземленной пластиной, оказались порванными. Сможет ли молниеотвод защитить от молнии?

ДОМАШНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ЗАДАНИЯ

7.1. На батарейках или гальванических элементах для карманного фонарика и транзисторного радиоприемника прочитайте все надписи. Объясните, что означает каждая из них.

7.2. Изготовьте самодельный гальванический элемент. Для этого используйте раствор уксуса (2 столовые ложки на стакан воды), один электрод — медный или угольный (можно взять стержень от старой батарейки), второй — цинковый или железный. В наличии напряжения можно убедиться, коснувшись языком электродов: вы ощутите солоноватый привкус. Если у вас есть вольтметр с пределом измерения до 5 В, измерьте напряжение на полюсах вашего гальванического элемента. Какой электрод является анодом; катодом?

7.3. Разрежьте сырую картофелину пополам и в одну из этих половинок на расстоянии 1—2 см воткните иголки. Иголки присоедините к полюсам гальванического элемента. Пронаблюдайте за изменением цвета картофеля у иголок и сделайте вывод по отношению к каждому электроду (катоду и аноду). Можно ли с помощью этого метода выявить наличие нитратов в картофеле? Какой тип проводимости имеет здесь место?

7.4. Рассмотрите запасные плавкие предохранители к телевизору и другим бытовым электроприборам. Запишите предельные значения токов плавких вставок. Начертите схему электрической цепи включения электропотребителя с плавким предохранителем.

7.5. Рассмотрите гальванические элементы к карманному фонарику или транзисторному приемнику. Запишите напряжение каждого элемента. Установите, как эти элементы соединены в вашем радиоприборе, и нарисуйте схему. Подключите вольтметр сначала к одному элементу, а затем к батарее элементов; напряжения сравните.

7.6. По параметрам, написанным на цоколе лампочки карманного фонарика, определите номинальное сопротивление лампы.

ГЛАВА 8. ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ЦЕПЬ

§ 8.1. РЕЗИСТОРЫ. РЕОСТАТЫ. ДЕЛИТЕЛИ НАПРЯЖЕНИЯ

В современной технике широко используются приборы, действие которых основано на законе Ома. Ознакомимся с некоторыми наиболее распространенными приборами.

I. *Резисторы* — элементы, широко используемые в электро- и радиотехнике, автоматике и электронике. (Слово «резистор» образовано от латинского слова *resisto* — сопротивляюсь.) В простейшем случае резистор (рис. 8.1,а) состоит из каркаса 1, который выполняется из негорючего непроводящего материала. На каркас намотана проволока 2 из металла с большим удельным сопротивлением. Часто вместо металлической проволоки, используемой в качестве проводника, применяют другие материалы с большим удельным сопротивлением. На каркас наносят пленку из этого материала и покрывают защитным слоем 3 из непроводящего материала. Для включения резистора в цепь используют выводы 4. На электро- и радиотехнических схемах резистор изображается так, как это показано на рисунке 8.1,б; резистор с переменным сопротивлением изображен на рисунке 8.1,в. Около условного изображения резистора обычно

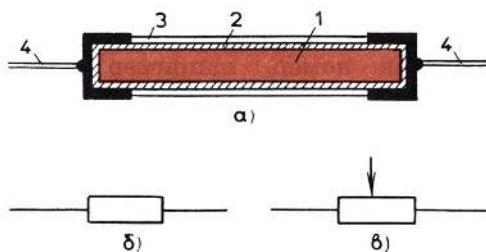


Рис. 8.1

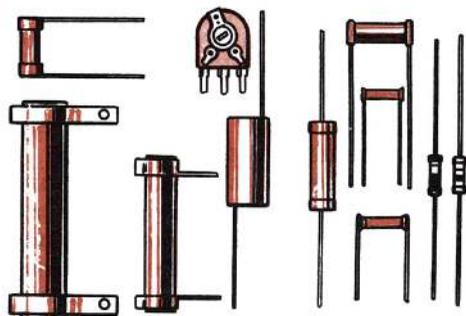


Рис. 8.2

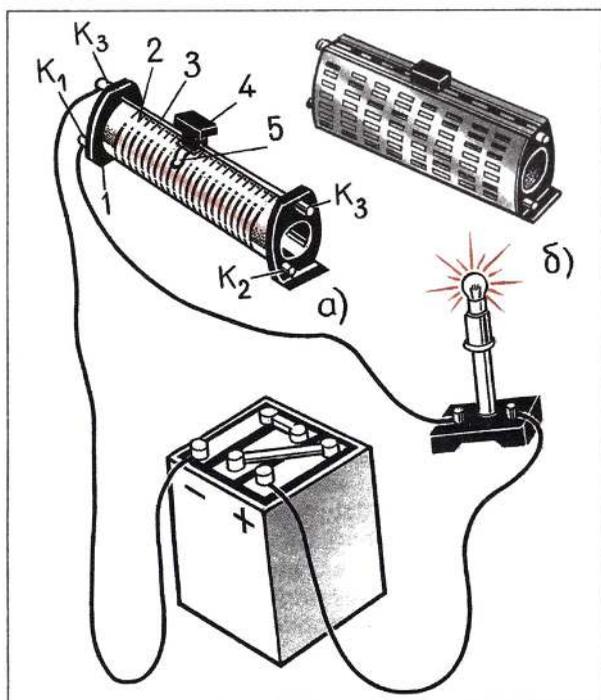


Рис. 8.3

ставится номер, например R_1 , R_2 , или значение сопротивления этого резистора, например 25 Ом, 50 кОм (1 кОм = 10^3 Ом), 7 МОм (1 МОм = 10^6 Ом). Внешний вид некоторых резисторов показан на рисунке 8.2.

II. *Реостаты — приборы, сопротивление которых можно регулировать.* Они применяются тогда, когда необходимо регулировать силу тока в цепи. На рисунке 8.3,а показан внешний вид реостата со снятым кожухом. Как видно из рисунка, на жаропрочное основание 1 наматывается проволока 2, изготовленная из материала с большим удельным сопротивлением. Концы проволоки закреплены под клеммы K_1 и K_2 . По направляющей 3, соединенной с клеммой K_3 , движется ползун 4, соединенный с контактом 5, который скользит по обмотке реостата. Реостат через клеммы K_1 и K_3 включается в цепь, где он должен регулировать силу тока. Включенная часть обмотки реостата начинается на клемме K_1 и оканчивается на контакте 5, который через направляющую 3 соединен с клеммой K_3 . Для предохранения от поражения током обмотка реостата, направляющая и нижняя часть ползуна закрываются кожухом (рис. 8.3,б).

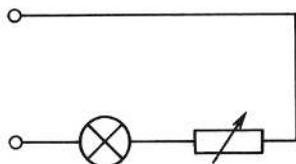


Рис. 8.4

Наружная часть клемм K_1 , K_2 и K_3 , а также верхняя часть ползуна сделаны из изолирующего материала.

На рисунке 8.4 показано условное обозначение реостата в электротехнических схемах.

Вопросы для самопроверки

1. Как устроен реостат? Для каких целей он служит?
2. Как выглядит схема реостата и каково назначение его деталей?

Упражнения

1. Делитель напряжения (рис. 8.5) собран из двух резисторов: $R_1 = 12$ Ом и $R_2 = 8$ Ом. К клеммам K_1 и K_2 при-

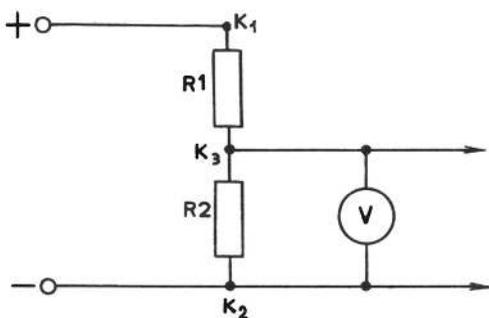


Рис. 8.5

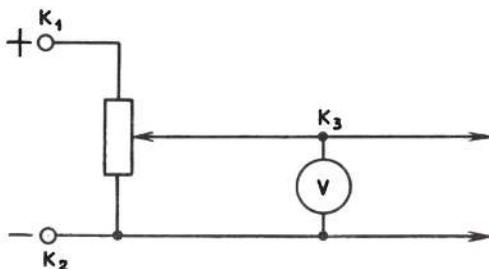


Рис. 8.6

ложено напряжение 50 В. Какое напряжение снимается с клемм K_2 и K_3 ?

2. Делитель напряжения изготовлен из нихромовой проволоки длиной 20 м и площадью поперечного сечения 3 мм^2 . Всего на основание реостата навито 200 витков. К клеммам K_1 и K_2 приложено напряжение 600 В. Сколько витков составит та часть обмотки, с которой снимается напряжение 400 В (рис. 8.6)?

§ 8.2. ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЕ СОЕДИНЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ

I. Даже самая простая электрическая цепь состоит из нескольких приборов и устройств. На рисунке 8.7 приведена схема электрической цепи, состоящей из источника тока, амперметра, реостата, лампы и ключа. Электрические заряды последовательно проходят от источника тока к ключу, лампе, реостату и амперметру, т. е. через все проводники, составляющие цепь. Такое соединение приборов называется *последовательным*.

Последовательное соединение находит широкое применение в технике. Например, электрический звонок включается последовательно с кнопкой, поэтому звонок звенит только тогда, когда кнопка нажата, т. е. цепь замкнута. Электрический выключатель включается последовательно с тем прибором, который он должен включать и выключать: лампочкой, электромотором и т. д. Лампочки в елочной гирлянде включаются также последовательно.

Изучим свойства цепи с последовательным соединением приборов и устройств.

II. *Сила тока в цепи с последовательным соединением проводников всюду одна и та же*, что показано на схеме рисунка 8.8 с помощью трех последовательно включенных потребителей (ламп) и амперметров. Если бы это было не так, то электрические заряды где-то должны были бы исчезать, а в другом месте возникать, что противоречит

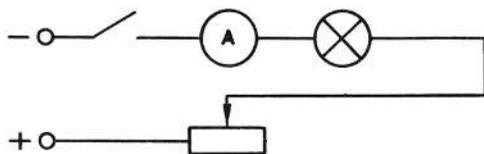


Рис. 8.7

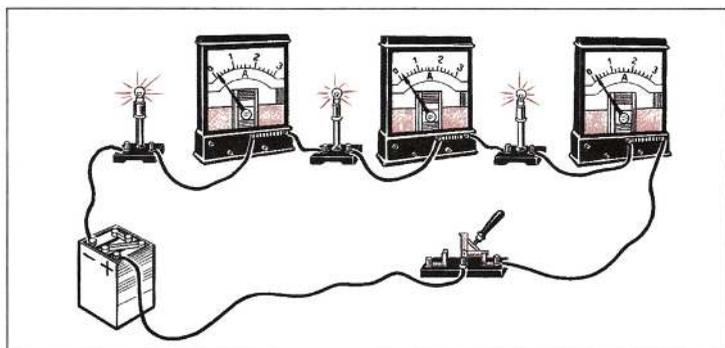


Рис. 8.8

закону сохранения электрического заряда (см. § 1.2). Данное явление похоже на то, что происходит в водопроводной сети. Сколько воды протечет в одном месте, столько же должно протечь и в другом.

III. Общее напряжение при последовательном соединении проводников равно сумме напряжений на всех участках цепи. Рассмотрим электрическую цепь, изображенную на рисунке 8.9. Показания вольтметров на каждом из включенных резисторов разные. Однако, сложив напряжения U_1 , U_2 , U_3 и U_4 , можно увидеть, что их сумма равна напряжению на зажимах всей цепи:

$$U = U_1 + U_2 + U_3 + U_4.$$

Если бы у нас было включено n приборов, то результат оказался бы таким же, т. е.

$$U = U_1 + U_2 + \dots + U_n.$$

Вопросы для самопроверки

1. Какие примеры электрических цепей с последовательным соединением элементов вы можете привести?

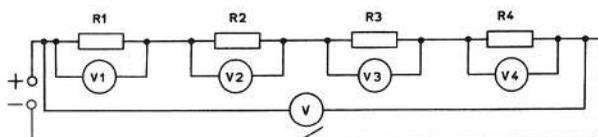


Рис. 8.9

2. Какова сила тока во всех участках последовательной цепи? Как это проверить?
3. Каково соотношение между общим напряжением цепи при последовательном соединении резисторов и напряжением на ее участках? Как это проверить?

Упражнения

1. Пользуясь законом сохранения электрического заряда, докажите, что во всех участках цепи с последовательным соединением резисторов сила тока одна и та же.
2. Пользуясь определением напряжения и учитывая, что работа по перемещению заряда по всей цепи равна сумме работ на ее отдельных участках, докажите, что общее напряжение в цепи с последовательным соединением резисторов равно сумме напряжений на ее участках.
3. На основании известных вам свойств цепи с последовательным соединением резисторов докажите, что сопротивление всей цепи равно сумме сопротивлений отдельных резисторов.
4. Елочная гирлянда состоит из 20 ламп, каждая из которых имеет сопротивление 52 Ом и рассчитана на напряжение 13 В. Определите сопротивление гирлянды и силу протекающего тока, если гирлянда включена в сеть с напряжением 220 В.
5. Елочная гирлянда собирается из лампочек, рассчитанных на номинальное напряжение 12 В. Гирлянда включается в сеть с напряжением 220 В. Сколько лампочек нужно для такой гирлянды?
6. Почему, если в елочной гирлянде перегорит хотя бы одна лампочка, все остальные тоже гаснут?
7. Нарисуйте схему цепи, состоящей из источника тока, лампы, реостата, ключа и амперметра.
8. Можно ли лампочку от карманного фонаря, рассчитанную на напряжение 4 В и силу тока 0,3 А, включить в осветительную сеть последовательно с лампой, рассчитанной на напряжение 220 В и имеющей сопротивление 1100 Ом?
9. Как доказать, что напряжения на отдельных участках последовательной цепи пропорциональны их сопротивлениям?

§ 8.3. ПАРАЛЛЕЛЬНОЕ СОЕДИНЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ

I. Последовательное соединение нельзя использовать в тех случаях, когда в электрическую цепь необходимо включить (или выключить) несколько приборов независимо друг от друга, например для освещения комнат в квартире, так как часто нет необходимости, чтобы одновременно светили все лампы. При последовательном их соединении, отключая одну лампу, мы отключаем и все остальные.

Во всех случаях, когда нужно независимое включение и выключение электрических приборов в цепь, используют *параллельное соединение электрических устройств*. На рисунке 8.10 показана цепь параллельного соединения лампы, радиоприемника и нагревателя, а на рисунке 8.11 — электрическая схема этой цепи. Очевидно, что при параллельном соединении ток в цепи разветвляется.

II. На рисунке 8.12 показаны две лампочки, включенные совместно со своими амперметрами параллельно друг другу в цепь; третий амперметр измеряет силу тока в неразветвленном участке цепи. Как видно, *сила тока в нераз-*

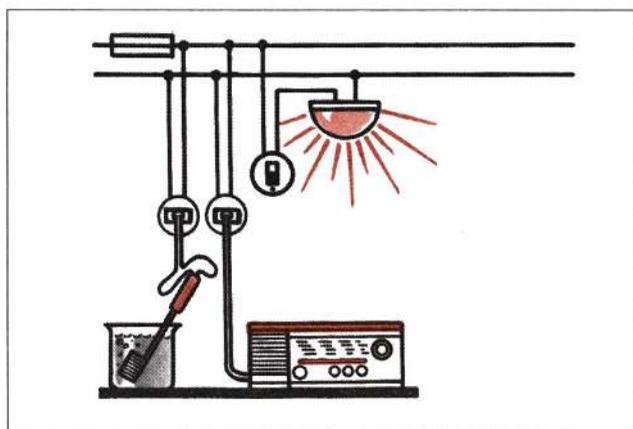


Рис. 8.10

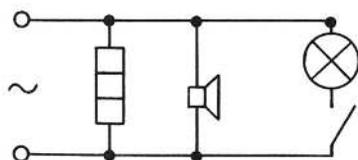


Рис. 8.11

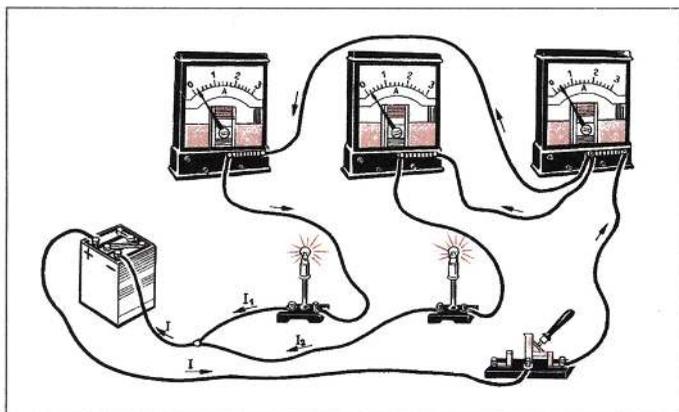


Рис. 8.12

ветвленном участке цепи равна сумме сил токов в отдельных его ветвях:

$$I = I_1 + I_2.$$

Если бы у нас было не два прибора, а n приборов, то сила тока в неразветвленном участке цепи была бы равна сумме сил токов, протекающих через все n ветвей:

$$I = I_1 + I_2 + \dots + I_n.$$

III. Так как при параллельном соединении все приборы подключены к одному и тому же источнику тока (к одной и той же линии), то *напряжение на всех включенных приборах одно и то же:*

$$U = U_1 = U_2 = \dots = U_n.$$

Вопросы для самопроверки

1. Какие примеры электрических цепей с параллельным соединением элементов вы знаете? Нарисуйте схему такой цепи.
2. Каково напряжение на всех участках параллельной цепи? Как это обосновать?
3. Каково соотношение между силой тока в неразветвленном участке параллельной цепи и силами тока в ее ветвях? Как это доказать?

Упражнения

1. Пользуясь законом сохранения электрического заряда, докажите, что сила тока в неразветвленном участке цепи с параллельным соединением проводников равна сумме сил токов в ее ветвях.
2. Величина G , обратная сопротивлению, называется проводимостью, т. е. $G = 1/R$. Пользуясь этим понятием, сформулируйте и запишите закон Ома.
3. Пользуясь известными вам свойствами цепи с параллельным соединением элементов, докажите, что проводимость участка с параллельным соединением резисторов равна сумме проводимостей всех ветвей.
4. В сеть с напряжением 220 В включена люстра, состоящая из 6 лампочек сопротивлением 1100 Ом каждая. Как включены эти лампочки — параллельно или последовательно? Какова сила тока в сети при включении этих лампочек параллельно?
5. Нарисуйте схему включения люстры в сеть, учитывая, что в схеме должен быть выключатель.
6. Нарисуйте схему цепи, в которой наряду с люстрой в комнате имеются еще две штепсельные розетки.
7. Определите силу тока, потребляемого из сети с напряжением 220 В, если параллельно включено 5 ламп сопротивлением 440 Ом. Каково сопротивление этого разветвления? Как оно соотносится с сопротивлением одной лампы?
8. Чему равно сопротивление параллельного разветвления, состоящего из 10 ламп, если сопротивление каждой из них равно 440 Ом?

§ 8.4. ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ЭНЕРГИЯ. РАБОТА ТОКА

I. Из первоначального знакомства с электрической цепью вы узнали, что в электрической цепи есть два участка: внутренний — в источнике тока и внешний — тот, на котором включены разные приборы — потребители энергии. На внутреннем участке электрической цепи происходит преобразование неэлектрической энергии (например, механической) в энергию электрического поля. А на внешнем участке цепи энергия электрического поля за счет работы электрического тока превращается в другие виды энергии. Например, в электродвигателях энергия электрического поля превращается в механическую; в электрической лампе — во внутреннюю и энергию излучения; в электрическом утюге — во внутреннюю, причем эта энергия путем теплообмена отда-

ется окружающим телам; при электролизе (см. § 7.7) и при зарядке аккумулятора — в энергию химических реакций.

Работа электрического тока показывает, сколько электрической энергии, т. е. энергии электрического поля, превратилось в другие виды энергии, или, что одно и то же, сколько было получено и израсходовано электрической энергии.

II. Чтобы подсчитать работу электрического тока, вспомним определение понятия напряжения (см. § 7.3): $U = A/q$.

Следовательно, работа электрического тока равна:

$$A = qU.$$

Электрический заряд можно выразить через силу тока и его время протекания. Подставив в формулу для вычисления работы $q = It$, получим

$$A = IUt.$$

Итак, *работа электрического тока равна произведению силы тока на напряжение и на время протекания тока по цепи.*

III. Работа электрического тока выражается в *джоулях* (Дж). В качестве внесистемной единицы принята работа тока силой 1 А в течение 1 ч на участке цепи с напряжением 1 В. Эту единицу работы назвали *ватт-час* (1 Вт·ч):
 $1 \text{ Вт} \cdot \text{ч} = 3600 \text{ Дж} = 3,6 \text{ кДж}.$

Ватт-час — сравнительно небольшая единица работы. Поэтому на практике используют более крупные, кратные ей единицы:

$$1 \text{ гВт} \cdot \text{ч} = 10^2 \text{ Вт} \cdot \text{ч} = 3,6 \cdot 10^5 \text{ Дж},$$

$$1 \text{ кВт} \cdot \text{ч} = 10^3 \text{ Вт} \cdot \text{ч} = 3,6 \cdot 10^6 \text{ Дж},$$

$$1 \text{ МВт} \cdot \text{ч} = 10^6 \text{ Вт} \cdot \text{ч} = 3,6 \cdot 10^9 \text{ Дж}.$$

Для учета совершенной электрическим током работы, а следовательно, для учета израсходованной (преобразованной) электрической энергии созданы специальные приборы-счетчики электрической энергии, устанавливаемые в квартирах.

Вопросы для самопроверки

1. Какие преобразования энергии внутри источника (на внутреннем участке цепи) вам известны?
2. Какие преобразования энергии на внешнем участке цепи вам известны?
3. Почему во фразе, где речь шла о счетчике электроэнергии, после слова «израсходованной» поставлено в скобках «преобразованной»?

4. Как записывается формула для вычисления работы электрического тока?
5. Какие вы знаете единицы работы электрического тока и каковы соотношения между ними? (В VII классе вы изучили: $1 \text{ Дж} = 1 \text{ Вт} \cdot 1 \text{ с}$.)

Упражнения

1. Амперметр показывает силу тока в цепи 15 А , вольтметр — напряжение на этом участке 24 В . Какую работу совершит ток за 20 мин ?
2. Сопротивление электрической плитки равно 80 Ом , напряжение в сети 220 В . Сколько электрической энергии потребляет плитка за 6 ч ?
3. Пользуясь законом Ома, выразите работу тока через силу тока, сопротивление и время; через напряжение, сопротивление и время.

§ 8.5. МОЩНОСТЬ ТОКА

I. Из курса физики VII класса вы знаете, что *мощность равна отношению совершенной работы ко времени, в течение которого эта работа была совершена*. Мощность в механике принято обозначать буквой N , в электротехнике — буквой P . Следовательно, мощность равна:

$$P = A/t.$$

Пользуясь этой формулой, найдем мощность электрического тока. Так как работа тока определяется формулой $A = IUt$, то мощность электрического тока равна:

$$P = IU.$$

II. За единицу мощности ватт (Вт) принята мощность тока силой 1 А на участке с напряжением 1 В . Следовательно, $1 \text{ Вт} = 1 \text{ А} \cdot 1 \text{ В}$.

Ватт сравнительно небольшая мощность, на практике используют более крупные единицы, кратные ватту: 1 гВт (гектоватт) = 10^2 Вт , 1 кВт (киловатт) = 10^3 Вт , 1 МВт (мегаватт) = 10^6 Вт , 1 ГВт (гигаватт) = 10^9 Вт .

Вопросы для самопроверки

1. Как вывести формулу мощности тока?
2. Какие вы знаете единицы мощности тока?

Упражнения

1. Две лампы мощностью по 100 Вт каждая, рассчитанные на напряжение 120 В, включены последовательно в сеть с напряжением 240 В. Определите силу тока в цепи и напряжение на каждой из ламп.
2. Из хромалевого проволоки сечением $0,5 \text{ мм}^2$ нужно изготовить спираль для нагревателя мощностью 700 Вт, работающего при напряжении 220 В. Определите длину проволоки. Удельное сопротивление хромаля $1,4 \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2/\text{м}$.
3. Выразите мощность тока через силу тока и сопротивление; через напряжение и сопротивление.
4. В сеть с напряжением 250 В включают две лампы мощностью 500 Вт и 25 Вт, рассчитанные на это напряжение. Какая будет гореть ярче, если их подключить последовательно; параллельно?

§ 8.6. ТЕПЛОВОЕ ДЕЙСТВИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА И ЕГО ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ

I. Из жизненного опыта вам известно, что электрический ток нагревает нить электрической лампочки, спираль электроплитки, электрического утюга, обогревателя, фена для сушки волос и других приборов. Однако мы не выяснили, почему нить электрической лампочки раскалена добела, когда подводящие провода заметно не нагреваются. Рассмотрим причину этого явления.

Последовательно включают три проводника одинаковой длины и одинаковой площади поперечного сечения: из нихрома, никелина и меди, а также амперметр и реостат. замыкают цепь и, постепенно увеличивая силу тока, видят, что нихромовый проводник нагревается почти до белого каления, никелиновый краснеет, а медный остаетя темным.

Этот опыт дает основание предположить, что нагревание проводника зависит от его сопротивления. Такое предположение можно подтвердить расчетами. Действительно, если известно, что работа тока в проводнике равна $A = IUt$, а напряжение $U = IR$, то, подставив в формулу работы значение напряжения, получим

$$A = I^2Rt.$$

Сила тока, протекающего по последовательно соединенным проводникам, одинакова, поэтому работа тока, а следо-

вательно, и нагревание проводников пропорциональны их сопротивлениям.

Если же нагрузки соединены параллельно, то они находятся под одинаковым напряжением. В этом случае, подставив в формулу работы $A = IUt$ значение силы тока $I = U/R$, получим

$$A = U^2t/R.$$

II. Почему же при протекании тока по металлическому проводнику он нагревается? Дело в том, что свободные электроны, разгоняемые электрическим полем в проводнике, соударяются с ионами, расположенными в узлах кристаллической решетки и передают им часть своей энергии. В результате ионы начинают колебаться более интенсивно, следовательно, увеличивается внутренняя энергия проводника, что регистрируется как повышение его температуры.

По закону сохранения энергии количество теплоты, передаваемое окружающей среде, равно работе электрического тока (при постоянной силе тока):

$$Q = A = I^2Rt$$

$$Q = A = U^2t/R.$$

III. Рассмотрим устройство лампы накаливания. Нагреваемым элементом в ней является свернутая в спираль тонкая вольфрамовая нить 1 (рис. 8.13). Вольфрам для изготовления нити выбран потому, что он тугоплавок и имеет достаточно большое удельное сопротивление.

Спираль с помощью специальных держателей 2 укрепляется внутри стеклянного баллона, наполненного инертным газом, в присутствии которого вольфрам не окисляется. Баллон крепится к цоколю 3, к которому припаян один конец токоведущего провода в точке 4. Второй конец провода через изолирующую прокладку 5 припаян к нижнему контакту. Лампа ввертывается в патрон (рис. 8.14). Он представляет собой пластмассовый корпус А, в котором имеется металлическая гильза В с резьбой; к ней присоединен один из проводов сети. Патрон контактирует с цоколем 3. Второй провод от сети присоединен к контакту В, который касается нижнего контакта лампы.

Лампы накаливания удобны, просты и надежны, но экономически они невыгодны. Так, например, в лампе мощ-

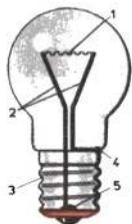


Рис. 8.13

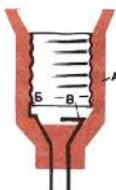


Рис. 8.14

ностью 100 Вт лишь небольшая часть электроэнергии (4 Вт) преобразуется в энергию видимого света, а остальная энергия преобразуется в невидимое инфракрасное излучение и в форме тепла передается окружающей среде.

IV. Для оценки эффективности того или иного устройства в технике введена специальная величина — коэффициент полезного действия (КПД). Коэффициентом полезного действия называют отношение энергии, по-

лезно преобразованной (работы или мощности), ко всей потребленной энергии, или затраченной (работе или мощности):

$$\eta = \frac{W_{\text{п}}}{W_{\text{з}}} = \frac{A_{\text{п}}}{A_{\text{з}}} = \frac{P_{\text{п}}}{P_{\text{з}}}$$

Часто КПД выражают в процентах (%).

Вычислим КПД электрической лампы накаливания по данным, приведенным выше:

$$\eta = \frac{4 \text{ Вт}}{100 \text{ Вт}} \cdot 100\% = 4\%$$

Для сравнения укажем, что КПД лампы дневного света примерно 15%, а у натриевых ламп наружного освещения около 25%.

V. Существует большое число электрических нагревательных приборов, например электрические плиты, утюги, самовары, кипятильники, обогреватели, электрические одеяла, фены для сушки волос, в которых используется тепловое действие тока.

Основным нагревательным элементом является спираль из материала с большим удельным сопротивлением. Она помещается в керамические изоляторы с хорошей теплопроводностью, которые изготовлены в виде своеобразных бус. В приборах, предназначенных для нагревания жидкостей, изолированная спираль помещается в трубки из нержавеющей стали. Ее выводы тоже тщательно изолируются от металлических частей приборов.

Как же при работе нагревательного прибора температура спирали остается постоянной? Оказывается, что при включении прибора в сеть, пока спираль еще холодная, ее сопротивление мало, а потребляемая из сети мощность велика. С другой стороны, холодная спираль не излучает в окружающую среду энергию путем теплообмена, поэтому температура спирали быстро растет и теплооб-

мен с окружающей средой усиливается. С ростом температуры сопротивление спирали увеличивается, потребляемая из сети мощность уменьшается и устанавливается баланс между потребляемой из сети электрической энергией и количеством теплоты, отдаваемым путем теплообмена окружающей среде.

VI. Очень эффективным преобразователем электрической энергии, дающим много тепла и света, является *электрическая дуга*. Ее широко используют для электрической сварки металлов, а также в качестве мощного источника света. Для наблюдения электрической дуги надо два угольных стержня с присоединенными к ним проводами закрепить в хорошо изолирующих держателях (рис. 8.15), а затем подключить стержни к источнику тока, дающему невысокое напряжение (от 20 до 36 В) и рассчитанному на большие силы тока (до 20 А). Последовательно стержням обязательно надо включить реостат. Ни в коем случае нельзя подключать угли в городскую сеть (220 или 127 В), так как это приведет к сгоранию проводов и к пожару.

Коснувшись углями друг друга, можно заметить, что в месте соприкосновения они сильно раскалились. Если в этот момент угли раздвинуть, между ними возникает яркое слепящее пламя, имеющее форму дуги. Это пламя вредно для зрения, поэтому при демонстрации электрической дуги перед местом соприкосновения углей следует поставить цветное стекло, а еще лучше — надеть защитные очки.

Пламя электрической дуги имеет высокую температуру, при которой плавятся самые тугоплавкие материалы, поэтому электрическая дуга используется в дуговых электрических печах для плавки металлов (рис. 8.16).

Пламя дуги является очень ярким источником света, что используется в прожекторах, стационарных кинопроекторах и т. д.



Рис. 8.15

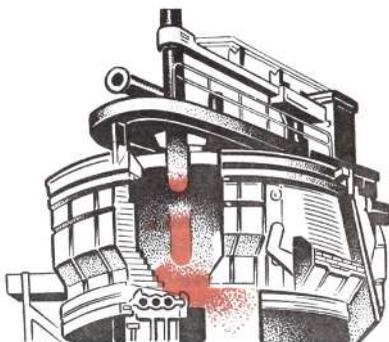


Рис. 8.16

Вопросы для самопроверки

1. Почему электрические провода, по которым к электрической лампе подводится напряжение, не нагреваются, а нить лампы накаляется и светит ярко?
2. Как устроена электрическая лампа накаливания? Почему для нити накала используется вольфрам?
3. Почему нельзя электрическую дугу включить в городскую осветительную сеть?
4. Почему нормально работающий электрический чайник перегорает, если его включить без воды?

Упражнения

1. Электрическая дуга, подключенная к источнику напряжением 10 В, потребляет ток силой 20 А. Определите сопротивление дуги и потребляемую ею мощность.
2. Каков (примерно) КПД электрической лампы накаливания?
3. При последовательном соединении сильнее всего нагревается проводник с наибольшим сопротивлением. Докажите это.
4. Какой проводник будет сильнее всего нагреваться при параллельном соединении? Ответ обоснуйте.
5. Электрическая плитка сопротивлением 80 Ом работает при напряжении 220 В. Через сколько времени на ней закипит чайник, содержащий воду объемом 3 л? Начальная температура воды 10 °С, КПД установки 60%, теплоемкостью чайника пренебречь.

§ 8.7. МЕРЫ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ РАБОТЕ С ЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ ПРИБОРАМИ

При работе с электрическими приборами необходимо строго и неуклонно соблюдать меры предосторожности. Если этого не делать, то ваша жизнь будет подвергаться смертельной опасности. Прежде всего надо знать опасные ситуации, о которых мы расскажем ниже.

I. Человеческое тело — проводник. Если случайно человек окажется под напряжением 24 В, то в большинстве случаев он не избежит травмы и даже смерти. Поэтому любому человеку, имеющему дело с электричеством, надо помнить следующие положения:

— *Очень опасно одновременное прикосновение двумя руками к двум оголенным проводам.*

— *Очень опасно прикосновение к оголенному проводу, стоя на земле, на сыром или цементном полу.*

— *Опасно пользоваться неисправными электрическими*

приборами. Электрические приборы должны периодически осматривать квалифицированные специалисты.

— *Нельзя собирать, разбирать и исправлять что-либо в электрическом приборе, не отключив его от источника.*

— *Нельзя производить какие-либо операции с электрической арматурой, не выключив ее из сети.*

II. Как оказать первую помощь пораженному электрическим током?

Запомните: при оказании первой помощи дорога каждая секунда. Чем больше времени человек находится под действием тока, тем меньше шансов спасти ему жизнь. Почти всегда сам человек не может освободиться от проводов или деталей, прикосновение к которым стало причиной его поражения. Это происходит потому, что электрический ток, протекая по телу человека, вызывает судорожное сокращение мышц. Сам пострадавший не может освободиться от проводов еще и потому, что электрический ток быстро поражает центральную нервную систему и человек теряет сознание.

Самое первое, что надо сделать для спасения человека, — это прервать его контакт с токонесущими проводами. Если несчастье произошло в помещении, где есть выключатель или штепсель, надо выключить ток выключателем или выдернуть штепсельную вилку. Если же несчастье произошло в цепи, где нет выключателя, надо вывернуть предохранители, стоящие около счетчика.

В тех случаях, когда выключатель расположен очень далеко, а человек находится под проводом, то в первую очередь необходимо как можно быстрее надеть резиновые сапоги и сбросить с него сухой палкой провод или этот провод перерезать ножом, перерубить топором, перекусить кусачками. Однако и здесь надо помнить, что все перечисленные инструменты должны быть снабжены изолирующими ручками. Спасатель обязательно должен положить себе под ноги изолирующий предмет: резиновый коврик, сухие доски, линолеум, надеть специальные резиновые рукавицы и резиновые сапоги.

III. Необходимо помнить, что пострадавший, находящийся в контакте с токонесущими проводами или деталями, сам является проводником электрического тока. Поэтому спасающему надо принять меры предосторожности. Оттягивать пострадавшего от проводов можно только за концы одежды одной рукой. Ни в коем случае нельзя касаться токопроводящих, соединенных с землей деталей и предметов!

Освободив пострадавшего от контакта с источником напряжения, необходимо немедленно положить его на спину, расстегнуть стесняющую дыхание одежду, вызвать врача, а если вызвать врача нельзя, то необходимо срочно доставить пострадавшего в лечебное учреждение.

Вопросы для самопроверки

1. Какие очаги электроопасности вам известны?
2. Почему, стоя на земле или на сыром полу, нельзя заниматься электромонтажными работами?
3. Почему, прежде чем начать какие-либо работы в электрической цепи, надо обесточить проводку?
4. Почему опасно работать с неисправными электрическими приборами?
5. Можно ли наливать воду в электрический чайник, включенный в сеть?
6. Можно ли снимать провод с пострадавшего при помощи сырой палки; металлического стержня?
7. Можно ли перерезать провод перочинным или столовым ножом?
8. Какую помощь надо оказать человеку, попавшему под электрическое напряжение?
9. Почему электромонтерам рекомендуется работать в резиновых перчатках и резиновых сапогах?
10. В плавком предохранителе основным элементом является тонкая легкоплавкая проволока, рассчитанная на определенную максимальную силу тока. Что произойдет, если сила тока в цепи вдруг превысит допустимое максимальное значение? Почему перегорает предохранитель, а не проводка?
11. Почему запрещается вместо заводских плавких предохранителей вставлять в гнездо медные проволочки (жучки)?

ДОМАШНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ЗАДАНИЯ

8.1. На баллоне лампы накаливания написано: 60 Вт, 220 В. По этим параметрам определите сопротивление спирали лампы в рабочем состоянии. Рассчитайте длину спирали лампы, если известно, что она изготовлена из вольфрамовой проволоки диаметром 0,08 мм.

8.2. Подсчитайте число лампочек в елочной гирлянде. Запишите паспортные данные (номинальное напряжение и силу тока) одной лампочки. Рассчитайте фактическое напряжение на лампочке при включении гирлянды в сеть напряжением 220 В и сравните его с номинальным.

8.3. Рассмотрите тип соединения лампочек в елочной гирлянде и подсчитайте их число. Изобразите схему соединения лампочек.

8.4. Определите тип соединения лампочек в люстре и изобразите схему их соединения.

8.5. Запишите номинальные мощности домашних электропотребителей (лампочки, утюга, холодильника, вентилятора и т. д.). Подсчитайте общую мощность всех электропотребителей.

8.6. Если у вас есть электрическая швейная машина,

попробуйте выяснить, как меняется скорость ее работы. Какой прибор для этого используется?

8.7. Используя паспортные данные батарейки, гальванических элементов, лампочки карманного фонарика, определите работу электрического тока, совершаемую в течение получаса (время работы фонарика).

8.8. Запишите по паспорту мощность домашнего электрического чайника (электрокипятильника). Определите количество теплоты, выделяемое за время 15 мин, а также стоимость потребляемой энергии за это время.

8.9. Загляните под капот автомобиля и посмотрите на расположение аккумулятора и стартера (электродвигатель для запуска мотора автомобиля) и их электрическое соединение. Объясните, почему соединение выполнено в виде толстой плетеной медной шины.

8.10. Снимите паспортные данные всех потребителей электроэнергии в вашей квартире и определите, на какую силу тока должны быть рассчитаны плавкие предохранители, если все электропотребители включены одновременно. Нарисуйте схему квартирной электропроводки (обозначения указаны в табл. 8.1).

8.11. Определите мощность электроприбора (электроплитки, утюга или кондиционера) с помощью счетчика электрической энергии и часов с секундной стрелкой. Для определения мощности необходимо знать постоянную счетчика, т. е. скольким оборотам диска счетчика соответствует 1 кВт·ч потребляемой энергии. (Она обычно записывается на шкале прибора.)

8.12. По паспортным данным определите мощность электроплитки (электрочайника, электрокипятильника). Налейте в сосуд определенный, измеренный мерной кружкой или стаканом объем воды. Измерьте (прикиньте) начальную температуру воды. Включите электроприбор, доведите воду до кипения и зафиксируйте время нагревания. Рассчитайте количество теплоты, полученное водой, и работу электрического тока. Определите КПД электрического нагревателя.

8.13. Ознакомьтесь с устройством штепсельной розетки. Есть ли там приспособление для защиты от напряжения? Почему такие приспособления не ставят на розетках в радиосети?

8.14. Рассмотрите электрическую цепь карманного фонарика и с помощью условных обозначений изобразите ее.

8.15. Рассмотрите патрон и цоколь лампы накаливания. Нарисуйте схему их электрического контакта.

8.16. Ознакомьтесь с устройством выключателя и штепсельной розетки (приборы не должны быть включены в сеть!).

ГЛАВА 9. МАГНИТНОЕ ПОЛЕ

§ 9.1. ПЕРВОНАЧАЛЬНЫЕ СВЕДЕНИЯ О МАГНЕТИЗМЕ

I. Каждый из вас с раннего детства слышал что-нибудь о магните. Многие даже держали магнит в руках, а у некоторых были игрушки, в которых обязательно использовались магниты.

Первые сведения о магнитах теряются в глубокой древности. В старинных летописях сохранилось упоминание о том, что в 1110 г. до н.э. в Китае были устройства (по-видимому, магнитные), показывавшие направление на юг. Первые магниты были *естественного происхождения*. Оказалось, что это были куски руды — магнитного железняка (магнетита).

II. О магнитах еще в 1269 г. была написана П. Перегрином книга, которая называлась «Письма о магнитах». В этой книге были собраны почти все известные в то время свойства магнитов. П. Перегрин установил, что если стальную спицу потереть магнитом естественного происхождения, т. е. природным, то спица тоже станет магнитом. Как мы говорим, намагнитится (рис. 9.1). Такие магниты получили название *искусственных магнитов*.

Свойства магнитов впервые детально и тщательно изучил В. Гильберт, врач английской королевы Елизаветы. В книге «О магните, магнитных телах и о большом магните — Земле», опубликованной в 1600 г., В. Гильберт описал следующие свойства магнитов:

магнит обладает в различных частях различной притягательной силой; на полюсах эта сила наиболее заметна;

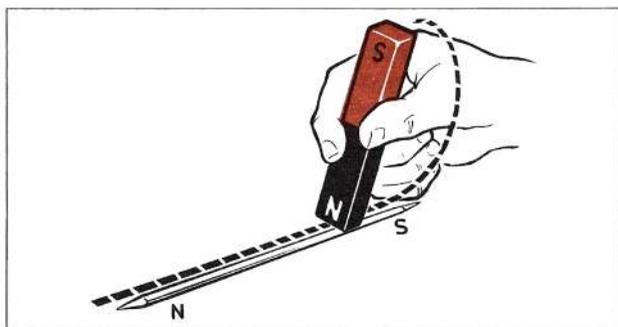


Рис. 9.1

магнит имеет два полюса: северный и южный, они различны по своим свойствам;

разноименные полюсы притягиваются, одноименные отталкиваются;

магнит, подвешенный на нитке, располагается определенным образом в пространстве, указывая север и юг;

невозможно получить магнит с одним полюсом;

земной шар — большой магнит;

при сильном нагревании магнитные свойства у природных и искусственных магнитов исчезают;

магниты оказывают свое действие через стекло, кожу и воду.

Вопросы для самопроверки

1. Как можно намагнитить стальную иглу? Прodelайте такой опыт.
2. Как с помощью двух постоянных магнитов проверить те свойства магнитов, которые были открыты Гильбертом?
3. У вас имеются две совершенно одинаковые стальные пластинки, из которых одна намагничена, вторая — нет. Можно ли, не используя другие предметы, кроме этих двух, определить, какая из пластинок намагничена? Как это сделать? Прodelайте такой опыт.
4. Где расположены полюсы полосового магнита; дугообразного?
5. Намагнитив лезвие от безопасной бритвы, обозначьте его полюсы. Разделите лезвие на две части. Удалось ли вам получить отдельно северный полюс и отдельно — южный?

§ 9.2. МАГНИТНОЕ ПОЛЕ

I. При описании взаимодействия между электрическими зарядами (см. § 1.6) мы ввели понятие электрического поля по схеме заряд — поле — заряд. В этом случае мы говорим, что *вокруг электрического заряда существует электрическое поле, которое действует на другие заряды.*

Точно так же описывается магнитное взаимодействие по схеме магнит — поле — магнит. В этом случае мы говорим, что *вокруг магнита существует магнитное поле, которое действует на другие магниты, в частности на магнитные стрелки или на намагничивающиеся частицы железа.*

II. Как и электрическое поле, *магнитное поле материально.* В этом мы убеждаемся по его воздействию на другие тела.

Магнитные поля играют исключительно важную роль в природе и в технике. Они проявляют себя во многих космических явлениях; используются в электромагнитах, электрических генераторах, трансформаторах и т. д. Имеются ве-

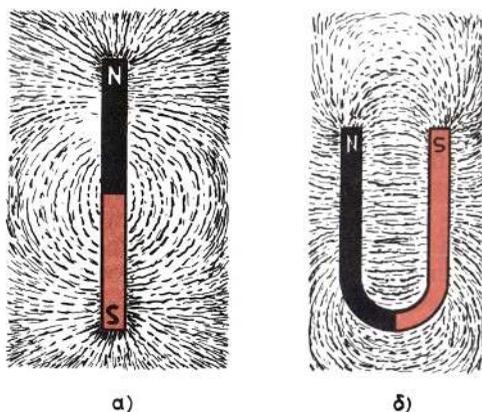


Рис. 9.2

ские основания считать, что магнитные поля играют важную роль в жизнедеятельности живых организмов, в том числе при ориентировании рыб во время их миграции в океане или птиц во время их перелетов на дальние расстояния. Однако эти биомагнитные явления еще очень плохо изучены.

III. Используя мелкие стальные опилки, можно получить картины магнитных полей. Для этого магнит надо накрыть куском стекла или куском плотной бумаги. Затем через ситечко сверху насыпать стальные опилки, слегка постукивая по стеклу карандашом или ручкой. И вы увидите необыкновенную картину магнитных полей. На рисунке 9.2, а, б показаны фотографии таких картин, полученных с помощью стальных опилок.

Линии, вдоль которых располагаются в магнитном поле стальные опилки, получили название магнитных силовых линий.

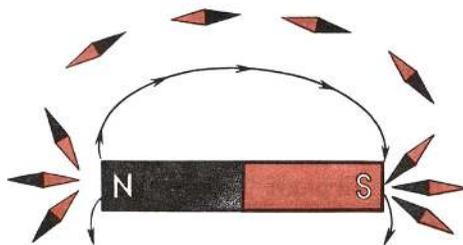


Рис. 9.3

IV. Если около полосового магнита расположить несколько магнитных стрелок, то они займут положение, показанное на рисунке 9.3. Нетрудно заметить, что магнитные стрелки расположились вдоль магнитной силовой линии так, что их южные полюсы обращены к северному полюсу линейного магнита, а северные — к южному.

За направление силовой линии магнитного поля принято направление, указываемое северным полюсом магнитной стрелки. Значит, вне магнита силовые линии магнитного поля начинаются на северном полюсе и заканчиваются на южном полюсе магнита.

V. Если между полюсами магнита положить толстое стальное кольцо, а затем магнит и кольцо накрыть стеклом, припорошив стекло стальными опилками, то можно увидеть, что в области, расположенной над внутренней частью кольца, опилки не испытывают действие магнитного поля. Следовательно, стальное кольцо служит магнитным экраном. Если же опыт повторить с медными, алюминиевыми, пластмассовыми кольцами, то мы увидим, что опилки испытывают действие магнитного поля. Значит, эти вещества не могут служить магнитными экранами.

VI. Ориентировка кусков природных магнитов и постоянных искусственных в направлении с севера на юг свидетельствует о том, что наша планета Земля обладает магнитными свойствами. На протяжении веков многие ученые, мореплаватели и путешественники изучали магнитное поле Земли.

Путешествуя, люди постепенно накопили большой материал о направлении стрелки компаса в различных точках земной поверхности и Мирового океана. В 1595 г. В. Гильберт изготовил из магнетита шар — терреллу (землицу) и заметил, что у терреллы, как и у Земли, два полюса, а магнитная стрелка устанавливается с севера на юг. (Слово «террелла» образовано от латинского слова *terra* — Земля.) Это позволило В. Гильберту предположить, что Земля является большим магнитом. Более поздние исследования эту гипотезу подтвердили.

На рисунке 9.4 схематически показаны магнитные силовые линии поля Земли. Как видно, *вблизи Северного географического полюса расположен Южный магнитный полюс*, в который силовые линии входят, а *вблизи Южного географического полюса — Северный магнитный полюс*, из которого силовые линии выходят. Координаты Южного магнитного полюса — 75°53' северной широты и 100°23' западной долготы; координаты Северного магнитного полюса — 66°06' южной широты и 139°36' восточной долготы. Магнитная ось составляет угол 11°30' с осью вращения Земли (земной осью).

Исследования намагниченности горных пород показали,

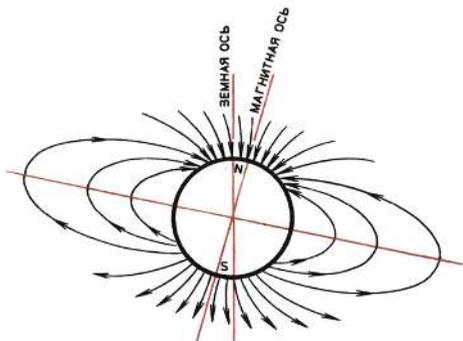


Рис. 9.4

что магнитные полюсы, а вместе с ними и все магнитное поле Земли со временем перемещаются, причем это перемещение довольно сложно. Теория такого явления, так же как и теория происхождения земного магнетизма, до сих пор не разработана.

Вопросы для самопроверки

1. Как описывается взаимодействие двух магнитов?
2. Почему можно утверждать, что магнитное поле материально?
3. Как можно получить картины магнитных полей?
4. Как располагаются маленькие магниты или железные опилки в магнитном поле?
5. Что принято за направление магнитных силовых линий?
6. Как можно экранировать действие магнитного поля?
7. Для чего служит компас? Как он действует?
8. Как расположены магнитные полюса Земли относительно географических?

§ 9.3. ОПЫТ ЭРСТЕДА. МАГНИТНОЕ ПОЛЕ ТОКА

I. Долгое время магнитные и электрические явления считались разными сущностями, не связанными друг с другом. Впервые связь между этими явлениями установил Х. Эрстед.

Опыт, поставленный им в 1820 г., может показаться вам очень простым и даже очевидным. Но ведь вы живете в такое время, когда очень многое известно. По-другому обстояло дело в 1820 г. Связь между электрическими и магнитными явлениями не только не была известна, но ее было даже трудно предположить.

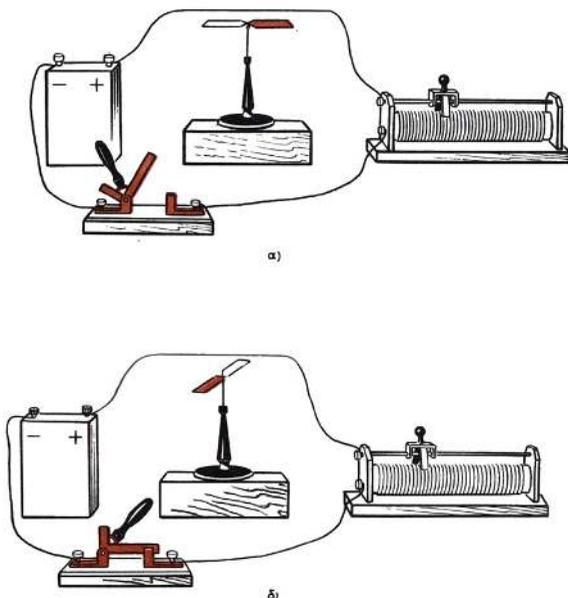


Рис. 9.5

Однако Х. Эрстед обнаружил, что магнитная стрелка, расположенная над (или под) проводником с электрическим током (рис. 9.5,а), при замыкании цепи поворачивается и располагается перпендикулярно проводнику (рис. 9.5,б). Этот опыт свидетельствует о том, что электрический ток каким-то образом действует на магнитную стрелку. Следовательно, между электрическими и магнитными явлениями существует определенная связь.

II. В опыте Х. Эрстеда было впервые обнаружено магнитное поле тока. В самом деле, так как проводник с электрическим током действует на магнитную стрелку, то естественно было предположить, что вокруг этого проводника существует магнитное поле. Чтобы исследовать это магнитное поле, можно поставить такой опыт.

Проводник с током надо пропустить через отверстие в картоне. Затем следует припорошить картон стальными опилками и цепь замкнуть. Опилки расположатся вокруг проводника концентрическими окружностями (рис. 9.6). Если на тот же картон поместить несколько магнитных стрелок, то они расположатся вдоль магнитных силовых линий так, как это показано на рисунке 9.7. Как и в случае постоянных магнитов, *за направление магнитных силовых*

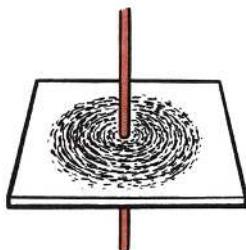


Рис. 9.6

линий выбирается направление, указываемое северным полюсом магнитной стрелки.

Чтобы всякий раз для определения направления силовых линий магнитного поля тока не ставить магнитную стрелку, было предложено правило буравчика (буравчика), которое читается следующим образом: для определения направления магнитных силовых линий прямого проводника с током буравчик надо ввертывать по направлению тока, тогда направление вращения ручки бу-

равчика покажет направление магнитных силовых линий (рис. 9.8, а, б).

III. Изучая расположение силовых линий магнитного поля прямого проводника с током, можно заметить следующее: магнитное поле действует на магнитные стрелки сильнее вблизи проводника с током и слабее вдали от него; силовые линии магнитного поля прямого проводника с током — замкнутые линии.

Этим магнитное поле принципиально отличается от электростатического, у которого силовые линии начинаются на положительных электрических зарядах и заканчиваются на отрицательных. Силовые линии магнитного поля замыкаются сами на себя, у них нет начала и конца.

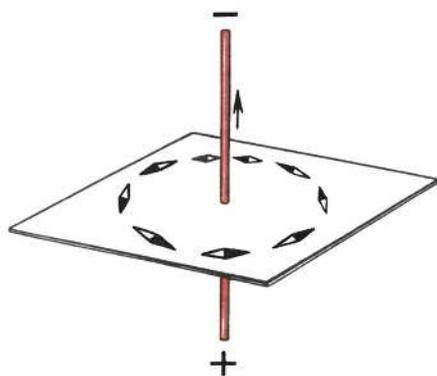


Рис. 9.7

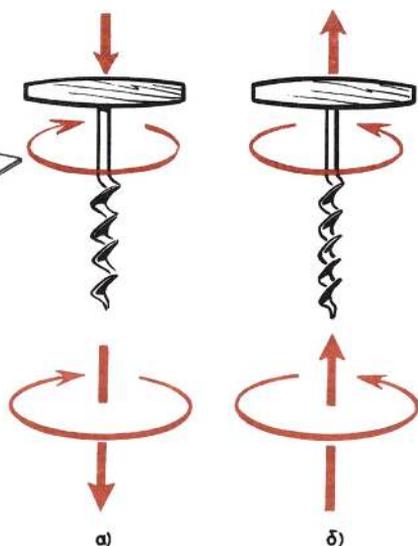
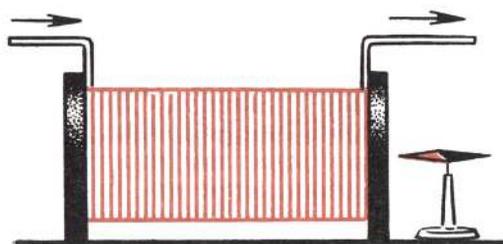
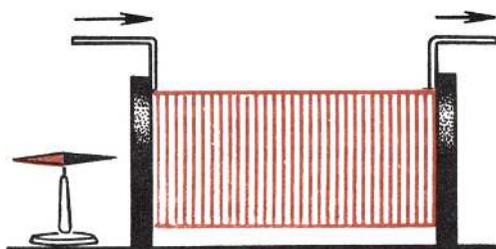


Рис. 9.8 →

IV. Если изолированный проводник свернуть в катушку и пропустить по нему ток (рис. 9.9, а), а затем поднести к катушке справа магнитную стрелку, то можно увидеть, что стрелка поворачивается к катушке южным полюсом. Следовательно, *вокруг катушки существует магнитное поле*. Поднеся такую же магнитную стрелку к другому концу катушки, можно увидеть, что стрелка повернется к катушке,



а)



б)

Рис. 9.9

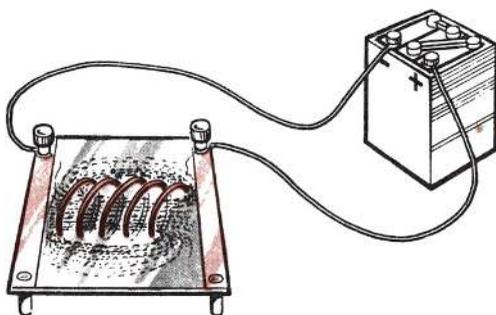


Рис. 9.10

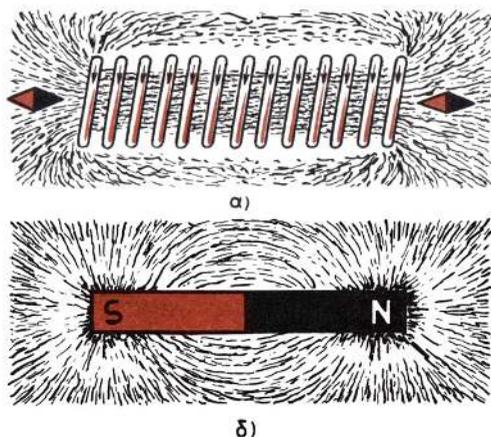


Рис. 9.11

но другим полюсом — северным (рис. 9.9,б). Если же перенести первую стрелку (справа) ко второй (слева), то обнаружится, что и она повернется к катушке тем же полюсом, что и вторая. Этот опыт свидетельствует о том, что *вокруг катушки, по обмотке которой течет электрический ток, существует магнитное поле, причем концы катушки напоминают полюсы линейного магнита*. Такая катушка с током называется *соленоидом*.

Чтобы лучше изучить магнитное поле катушки, используют прибор, показанный на рисунке 9.10. На пластинку из оргстекла насыпают железные опилки и по обмотке пропускают ток. При этом железные опилки ориентируются в строго определенном порядке. На рисунке 9.11,а видно, что магнитное поле катушки очень похоже на магнитное поле прямого магнита (рис. 9.11,б). Нетрудно заметить, что с той стороны катушки, которую ток обтекает по ходу часовой стрелки, находится ее южный полюс (S), а со стороны, которую ток обтекает против часовой стрелки, — северный полюс (N). Если катушку, по обмотке которой течет ток, подвесить на длинном гибком проводнике, то она повернется южным полюсом на север, а северным — на юг.

Вопросы для самопроверки

1. В чем заключено научно-историческое значение опыта Эрстеда? Опишите его.
2. По какому правилу можно определить направление силовых линий магнитного поля проводника с током?

3. Что можно рассказать о магнитном поле катушки, по которой проходит ток?

4. Чем отличается магнитное поле тока от электрического поля?

§ 9.4. ЭЛЕКТРОМАГНИТ

I. Открытие Х. Эрстеда ознаменовало собой начало целого ряда исследований в области электромагнетизма. Уже в том же 1820 г. А. Ампер и Д. Араго исследовали магнитное поле соленоида. В 1825 г. У. Стерджен заметил, что магнитное поле соленоида значительно усиливается, если внутрь его внести стальной сердечник, как показано на рисунке 9.12. Это уже получается простейший электромагнит. Современники не оценили по заслугам изобретение У. Стерджена, хотя и написали на его могильной плите: «Здесь покоится изобретатель электромагнита...»

В 1828 г. Д. Генри применил в электромагните многослойную обмотку из изолированной проволоки и тем самым создал электромагнит значительной силы.

Итак, изобретение электромагнита было по своей сути коллективным изобретением и прошло ряд этапов, каждый из которых не смог бы осуществиться без предыдущих.

II. Всякий электромагнит состоит из следующих частей: *обмотка 1*, по которой протекает ток, *стальной магнитопровод*, представляющий собой *сердечник 2*, и *якорь 3*, который притягивается к сердечнику. На рисунке 9.13 схематически показано магнитное поле электромагнита с П-образным сердечником.

Выясним, от чего зависит сила, с которой магнитное поле действует на якорь. Рассмотрим установку, показанную на рисунке 9.14. Между якорем и сердечником проложен кусок картона или плексигласа, чтобы якорь не прилипал к

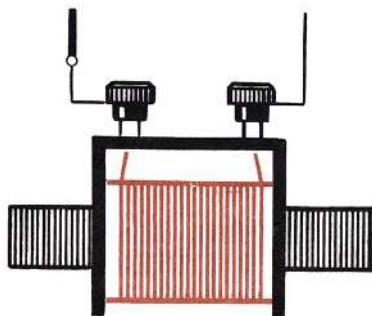


Рис. 9.12

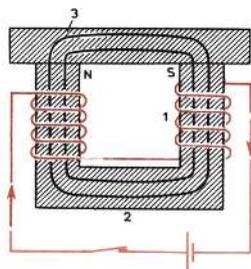


Рис. 9.13

сердечнику. Замыкают цепь и с помощью реостата устанавливают в цепи небольшой ток. При этом якорь притягивается к сердечнику с некоторой силой. (Эту силу можно измерить, если попробовать оторвать якорь от сердечника.) Увеличивая в 2 раза силу тока, протекающего через обмотку электромагнита, видят, что сила притяжения якоря к электромагниту увеличивается. Приподнимая динамометр так, чтобы оторвать якорь от сердечника, по показанию динамометра замечают: сила притяжения якоря увеличивается по сравнению с первым опытом в 2 раза. Аналогичный результат можно получить, если увеличивать силу тока, протекающего через обмотку электромагнита, в 3—4 раза.

Эти опыты дают возможность сделать вывод: *сила притяжения якоря к электромагниту прямо пропорциональна силе тока, протекающего по обмотке.*

III. Увеличивают число витков в обмотке и, установив первоначальную силу тока в катушке, замечают, что сила притяжения якоря к электромагниту значительно больше, чем при меньшем числе витков. Так как в опыте изменилось только число витков, то приходят к выводу: *сила*

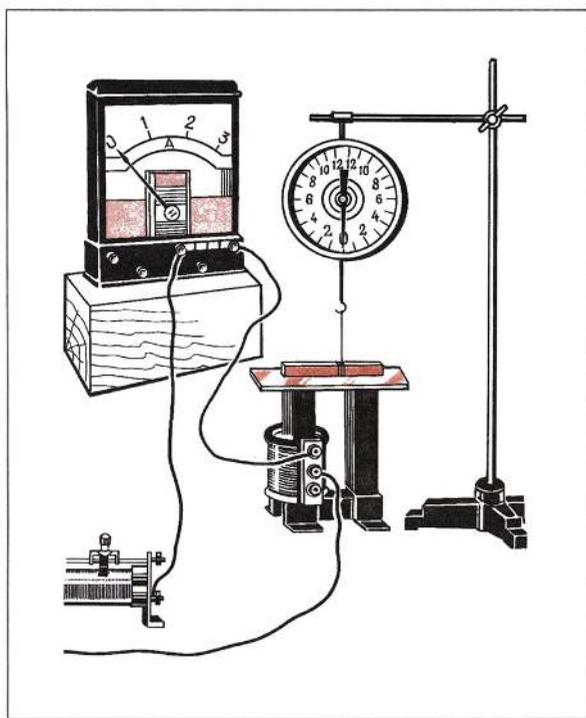


Рис. 9.14

притяжения якоря к электромагниту пропорциональна числу витков катушки.

Вынув из катушки сердечник и повторив опыт, обнаруживают, что сила притяжения якоря к катушке очень мала. Следовательно, сила притяжения якоря электромагнитом зависит от магнитных свойств магнитопровода.

IV. Электромагниты применяются очень широко. Они есть в любой автомашине, телефоне, телевизоре, самолете, космическом корабле, теплоходе и т. д.

Электромагнитный подъемный кран применяется для переноски стальных деталей и лома. Такой кран удобен тем, что не нуждается в креплении переносимых им стальных деталей. Машинист

крана, подведя электромагнит к нужным деталям, включает ток в обмотку и подбирает эти детали (рис. 9.15). После выключения тока детали сами отваливаются от сердечника.

Электромагниты применяются на плоскошлифовальных станках для крепления обрабатываемых деталей. Поставив деталь на магнитный стол и включив ток, рабочий надежно закрепляет ее в нужном положении. После обработки детали ток выключается, а готовая деталь свободно снимается.



Рис. 9.15

Вопросы для самопроверки

1. Когда был изобретен электромагнит? Кого из ученых, причастных к этому изобретению, вы знаете?
2. Из каких деталей состоит электромагнит?
3. От чего зависит сила, с которой электромагнит притягивает стальной якорь?
4. Как действует магнитный стол плоскошлифовального станка?

§ 9.5. ДЕЙСТВИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ПРОВОДНИК С ТОКОМ И ДВИЖУЩИЕСЯ ЗАРЯДЫ

I. На рисунке 9.16 показана установка, с помощью которой можно исследовать, как ведет себя проводник с током в магнитном поле.

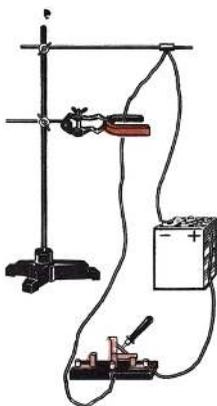


Рис. 9.16

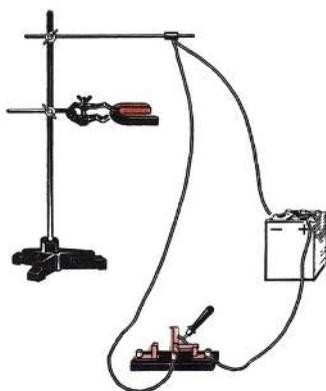


Рис. 9.17

Ключ в установке замыкают, и по проводнику начинает течь электрический ток. Опыты показывают, что в этом случае проводник либо втягивается в область между полюсами магнита (см. рис. 9.16), либо выталкивается из этой области (рис. 9.17). Такие же результаты получают, когда меняют направление тока на противоположное.

Все опыты свидетельствуют о том, что *магнитное поле действует на проводники с током*, т. е. оно действует на упорядоченно движущиеся электрические заряды. На неподвижные электрические заряды магнитное поле не действует. Оно не действует на электрический ток, текущий вдоль направления силовых линий магнитного поля.

II. На каркас наматывают несколько витков проволоки, получая таким образом устройство, которое называется *рамкой*. Эта рамка помогает поставить ряд опытов.

Если по рамке ток не течет, но она находится в магнитном поле постоянного магнита (рис. 9.18,а), то это поле на рамку не действует и она располагается произвольным образом. При наличии тока в рамке последняя повернется и установится, как показано на рисунке 9.18,б. Это произойдет потому, что одна часть рамки, по которой течет ток вниз, выталкивается из магнитного поля; вторая часть рамки, по которой ток идет вверх, втягивается в это поле. Возникает *вращающий момент*, поворачивающий рамку. Если изменить направление тока, то рамка повернется другой стороной.

Это свойство рамки с током используется в электроизмерительных приборах и электрических двигателях.

III. Так как электрический ток — это упорядоченное движение свободных электрических зарядов, то возникает

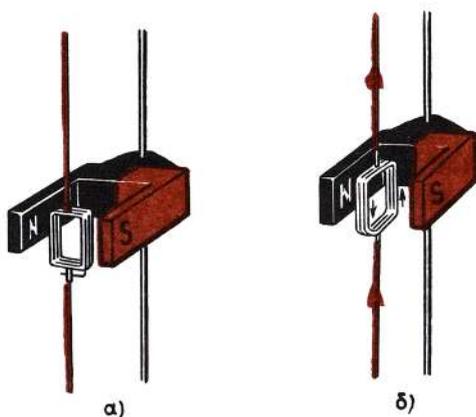


Рис. 9.18

естественный вопрос: будет ли магнитное поле действовать на заряды, движущиеся не в проводнике, а в вакууме? Ответить на этот вопрос можно только с помощью опыта.

Выше (см. § 1.7) мы говорили о том, что в катодных трубках, а также в кинескопах телевизоров из катода K (рис. 9.19,а) вылетает пучок свободных электронов, движущихся к аноду A и вызывающих свечение экрана \mathcal{E} (или стекла против катода). При отсутствии магнитного поля пучок электронов движется прямолинейно и перпендикулярно к поверхности катода.

Если к трубке поднести магнит, полюсы которого расположены так, как показано на рисунке 9.19,б, то пучок электронов отклонится вниз. При изменении расположения полюсов магнита пучок отклонится вверх.

IV. Мы пришли к очень важным выводам относительно связи между электрическими зарядами и электрическими и магнитными полями:

— *вокруг неподвижных электрических зарядов существует электрическое поле;*

— *электрическое поле действует с некоторой силой на электрические заряды — как неподвижные, так и движущиеся;*

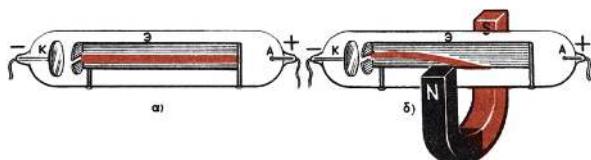


Рис. 9.19

— вокруг движущихся электрических зарядов, кроме электрического поля, существует еще и магнитное;

— магнитное поле действует только на движущиеся электрические заряды, а следовательно, и на проводники с током;

— магнитное поле не действует на неподвижные электрические заряды.

Как показывают многочисленные исследования, электрические и магнитные поля являются частными случаями *единого электромагнитного поля*. С его свойствами вы ознакомитесь в IX классе, при изучении радиоволн и света.

Вопросы для самопроверки

1. Действует ли магнитное поле на неподвижные электрические заряды? Как это доказать?
2. Какой опыт показывает, что на проводник с током в магнитном поле действует сила?
3. Как меняется сила, с которой магнитное поле действует на проводник с током, если изменить направление тока; направление силовых линий магнитного поля?
4. В каком случае магнитное поле не действует на проводник с током?
5. Действует ли магнитное поле на движущиеся электрические заряды? Как это доказать на опытах?
6. Как действует магнитное поле на рамку с током?

§ 9.6. ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ТОКОВ

I. Так как вокруг проводника с током существует магнитное поле, то, вероятно, оно должно действовать и на помещенный в это поле другой проводник с током. К этому выводу пришел А. Ампер в 1820 г. и проверил этот вывод с помощью серии опытов, один из которых мы и рассмотрим.

Вертикально закрепляют две полоски фольги (рис. 9.20,а). Нижними концами их присоединяют к полюсам источника тока. При отсутствии электрического тока провода не взаимодействуют.

Если замкнуть верхние концы полосок фольги проводником (рис. 9.20,б), то по ним потечет электрический ток, и полоски оттолкнутся друг от друга. На рисунке видно, что полоски включены в цепь последовательно, поэтому токи в них имеют противоположное направление. Вывод: если в проводниках токи текут в противоположных направлениях, то такие проводники отталкиваются друг от друга.

В случае параллельного включения полосок фольги в

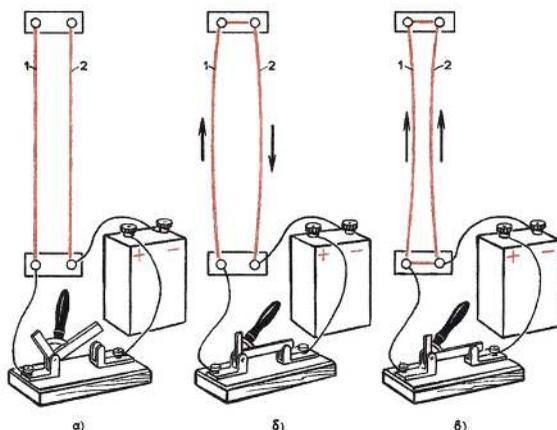


Рис. 9.20

цепь (рис. 9.20, в) электрические токи в них будут направлены одинаково. Полоски фольги притянутся друг к другу.

II. В Международной системе единиц (СИ) магнитное взаимодействие токов используется для определения единицы силы тока — ампера. Оказывается, что *ампер — это сила тока, который протекает по двум параллельным проводникам, расстояние между которыми в 5 миллионов раз меньше их длины, и вызывает между ними в вакууме силу взаимодействия 1 Н.*

Это, конечно, не вполне строгое определение, но оно дает некоторое представление о силе тока, равной 1 А. Приведем (не для запоминания!) стандартное определение ампера:

Ампер — это сила неизменяющегося тока, проходящего по двум параллельным прямолинейным проводникам бесконечной длины и ничтожно малой площади кругового поперечного сечения, расположенным в вакууме на расстоянии 1 м один от другого, и вызывающего на каждом участке проводника длиной 1 м силу взаимодействия, равную $2 \cdot 10^{-7}$ Н.

Вопросы для самопроверки

1. Какой опыт показывает, что проводники с током взаимодействуют друг с другом?
2. Как объяснить взаимодействие токов?
3. Будут ли взаимодействовать проводники с током, перпендикулярные друг другу? Ответ обоснуйте. Проверьте этот вывод опытным путем.

4. Какое явление принято в Международной системе единиц для определения единицы силы тока?

§ 9.7. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ДВИГАТЕЛЬ

I. Без электрических двигателей невозможно даже представить жизнь современного человека. Вот далеко не полный перечень знакомых вам устройств, механизмов и машин, в которых используются электрические двигатели: автомашина, самолет, трактор, трамвай, троллейбус, лифт и многие другие устройства. Абсолютное большинство станков на производстве приводится в действие электрическими двигателями.

II. Существует большое число конструкций различных электродвигателей, но мы изучим устройство и принцип действия весьма распространенного *коллекторного электродвигателя*. Он состоит из трех основных узлов: статор, ротор и коллектор (рис. 9.21). Рассмотрим эти узлы.

Статор 1 представляет собой либо постоянный магнит с полюсными наконечниками *S* и *N*, либо электромагнит. Он составляет одно целое с корпусом электродвигателя. (Слово «статор» образовано от латинского слова *stator* — стоящий неподвижно.) Статор коллекторного двигателя часто называют *индуктором*. Это та часть электродвигателя (или гене-

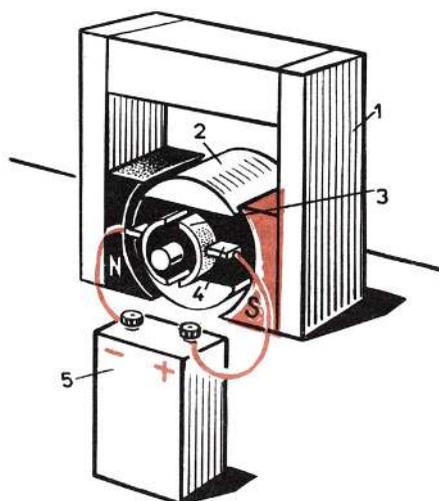


Рис. 9.21

ратора), которая служит для возбуждения магнитного поля.

Ротор 2, часто называемый *якорем* коллекторного двигателя, представляет собой сердечник определенной формы, набранный из листов специальной стали. (Слово «ротор» образовано от латинского слова *rotare* — вращаться.) На сердечник наматывается обмотка из изолированного провода.

Выводы обмотки 3 припаяны к медным *коллекторным пластинам*, которые закреплены на хорошо изолированном барабане. Последний закреплен на оси ротора. Специальными пружинами плотно прижимаются к коллекторным пластинам две угольные *щетки 4*. К щеткам от источника тока *5* подводятся напряжение, питающее электродвигатель.

III. Принцип работы электродвигателя рассмотрим на примере простейшего двигателя, т. е. такого двигателя, у которого якорь содержит только одну обмотку.

К щеткам подается необходимое для работы электродвигателя напряжение. Благодаря взаимодействию тока, текущего по обмотке, с магнитным полем статора ротор поворачивается так, что рамка оказывается в вертикальном положении и ток в ней отсутствует. Ведь щетки касаются не пластин коллектора, а изоляции между ними. Однако благодаря инерции ротор проскакивает это положение, и щетки касаются коллекторных пластин. Ток опять течет по обмотке, а на якорь действует вращающий момент в том же направлении. Якорь вращается до тех пор, пока в его обмотку поступает электрический ток.

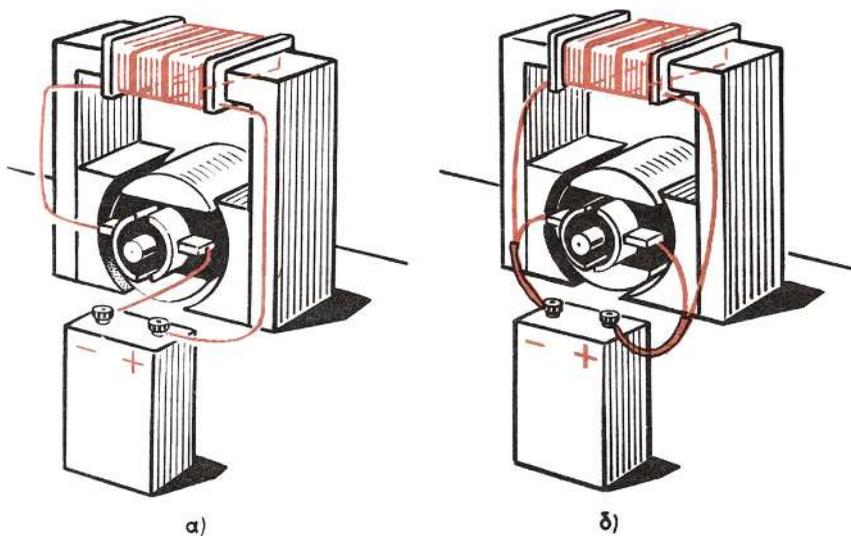


Рис. 9.22

IV. Если статором служит электромагнит, то его обмотку можно соединить с обмоткой якоря либо последовательно (рис. 9.22,а), либо параллельно (рис. 9.22,б). Двигатели с последовательным включением обмоток якоря и индуктора развивают очень большое усилие в момент пуска, т. е. в момент включения тока. Это качество является весьма ценным для транспорта, где машина должна трогаться с места и развивать нужную скорость. Поэтому двигатели с последовательным возбуждением обмоток применяются в трамваях, троллейбусах, на электровозах и т. д.

Двигатели с параллельным включением обмоток обладают стабильной частотой вращения, которую можно легко регулировать, меняя силу тока в обмотке возбуждения, для чего последовательно с обмоткой возбуждения включают реостат. Такие двигатели используются для привода станков.

V. Электрические двигатели имеют ряд преимуществ перед тепловыми. Они экономичны, не загрязняют окружающей среды, работают почти бесшумно. Их КПД более 80%. Они удобны в эксплуатации и надежны в работе.

Вопросы для самопроверки

1. Какие вам известны примеры применения электродвигателей?
2. Что означают термины «статор» и «ротор»?
3. Как иначе называется статор коллекторного электродвигателя? Какова его функция?
4. Как иначе называется ротор коллекторного двигателя? Как он устроен?
5. Как устроен коллектор электродвигателя, если его обмотка содержит одну рамку?
6. Как осуществляется непрерывное вращение якоря электродвигателя? Какую роль при этом играет коллектор?
7. Как подается ток от источника к обмотке якоря?
8. Каковы достоинства электрических двигателей?
9. Как можно соединить обмотки якоря и индуктора? Начертите схему.
10. Каковы особенности двигателей с последовательным и параллельным возбуждением?
11. Для чего в обмотку возбуждения двигателя с параллельным возбуждением включается реостат?
12. Как можно изменить направление вращения якоря? Проверьте свои соображения опытным путем.

§ 9.8. ЭЛЕКТРОИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ

I. Для измерения электрических величин используются различные электроизмерительные приборы. Так, например, сила тока измеряется амперметром, напряжение — вольтметром, сопротивление — омметром, мощность — ваттметром, электрическую энергию измеряют счетчиком.

Существует большое число систем электроизмерительных приборов. Мы рассмотрим устройство и принцип действия приборов *магнитоэлектрической системы, электромагнитной и электродинамической.*

II. Измерительный механизм прибора магнитоэлектрической системы состоит из двух частей (рис. 9.23).

Неподвижная часть состоит из постоянного магнита 1, его полюсных наконечников 2 и неподвижного сердечника 3. В зазоре между полюсными наконечниками и сердечником существует сильное магнитное поле.

Подвижная часть измерительного механизма состоит из легкой рамки 4, обмотка которой навивается на алюминиевый каркас, и двух полуосей 5, неподвижно связанных с каркасом рамки. Концы обмотки припаяны к двум спиральным пружинам 6, через которые в рамку подводится измеряемый ток. К рамке прикреплены стрелка 7 и противовесы 8.

В зазоре между полюсными наконечниками и сердечником устанавливается рамка. Ее полуоси вставляются в стеклянные или агатовые подшипники.

При прохождении тока по обмотке рамки последняя стремится повернуться, но ее свободному повороту противодействуют спиральные пружины. И тому углу, на который рамка все же развернется, оказывается, соответствует определенная сила тока, который протекает по обмотке рамки. Иными словами, угол поворота рамки пропорционален силе тока. Фиксируют угол поворота рамки по стрелке, которая к рамке жестко прикреплена. Так как угол поворота пропорционален силе тока, то *шкала измерительного прибора магнитоэлектрической системы равномерная* (см. рис. 9.23).

У амперметров и вольтметров измерительные механизмы в принципе одинаковы. Их отличие заключается лишь в электрическом сопротивлении рамок. У ампермет-

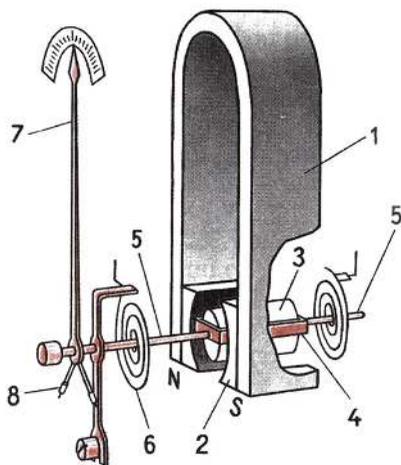


Рис. 9.23

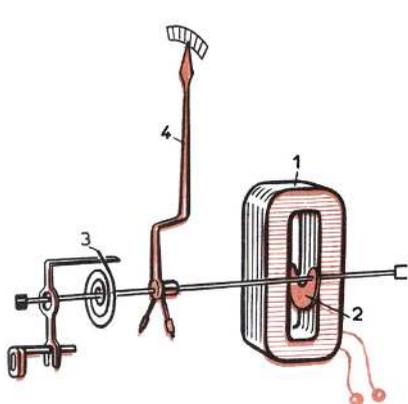


Рис. 9.24

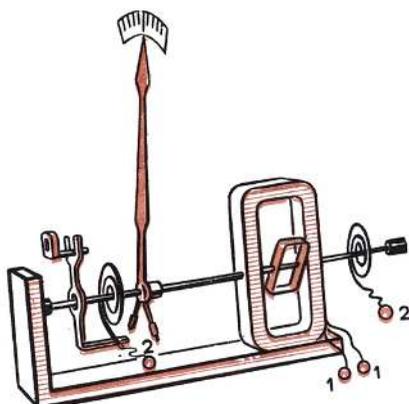


Рис. 9.25

тра сопротивление рамки значительно меньше, чем у вольтметра.

III. Несколько проще устроен прибор *электромагнитной системы*.

Неподвижная часть прибора представляет собой катушку 1 (рис. 9.24), по обмотке которой протекает ток. За счет этого в зазоре катушки возникает магнитное поле.

В зазор втягивается якорь 2, изготовленный из мягкой стали, который составляет *подвижную часть* прибора. На оси якоря имеется спиральная пружина 3, противодействующая втягиванию якоря в зазор катушки. В результате сидящая на оси стрелка 4 поворачивается на определенный угол, зависящий от силы тока.

Электромагнитные приборы менее чувствительны по сравнению с магнитоэлектрическими. Однако они не столь боятся перегрузки и надежнее в работе. Кроме того, они пригодны для измерений в цепях не только постоянного, но и переменного тока. Их шкалы неравномерны.

IV. У *электродинамических измерительных приборов* (рис. 9.25) *подвижная часть* практически не отличается от подвижной части прибора магнитоэлектрической системы, т. е. у них тоже имеется подвижная рамка. *Неподвижной же частью* служит не постоянный магнит, а катушка, по обмотке которой протекает ток.

Сила взаимодействия между рамкой и катушкой пропорциональна произведению силы тока в рамке и силы тока в катушке.

В амперметрах и вольтметрах электродинамической системы обе обмотки соединяются последовательно, поэ-

тому сила, поворачивающая подвижную рамку, пропорциональна квадрату силы тока. В результате у приборов данного типа *шкала неравномерная*.

V. Электродинамический прибор может служить и *ваттметром*, т. е. измерителем мощности. С этой целью токовая катушка включается последовательно нагрузке, и сила тока в ней равна силе тока в цепи. Подвижная рамка через дополнительное сопротивление присоединяется параллельно нагрузке. Следовательно, сила тока в подвижной рамке пропорциональна напряжению.

Так как сила взаимодействия пропорциональна произведению силы тока в рамке и силы тока в катушке, то при таком включении в цепь она оказывается пропорциональной произведению силы тока на напряжение, т. е. потребляемой мощности. Прибор в данном случае служит ваттметром.

VI. Для повышения чувствительности прибора в неподвижную обмотку можно ввести стальной сердечник. Прибор данного типа называется *ферродинамическим*.

Вопросы для самопроверки

1. Каковы основные части магнитоэлектрического прибора? Каков принцип действия этого прибора?
2. На зажимах магнитоэлектрического прибора указывается полярность знаками «+» и «-». Что произойдет, если при включении прибора поменять полярность?
3. Каковы основные части электромагнитного прибора? Каков физический принцип его действия?
4. Почему на зажимах электромагнитных приборов полярность не указывается?
5. Каковы основные части электродинамического прибора? Каков физический принцип его действия?
6. Как надо включить обмотки электродинамического амперметра или вольтметра?
7. Как надо включить обмотки электродинамического ваттметра?

§ 9.9. МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА ВЕЩЕСТВА

I. Магнитные поля создаются либо постоянными магнитами, либо токами. В 1820 г. А. Ампер выдвинул смелую гипотезу, согласно которой магнитные свойства вещества (в том числе и постоянных магнитов) возникают за счет *молекулярных токов*, циркулирующих в молекулах вещества. Дальнейшее развитие науки подтвердило эту идею Ампера. Однако теорию магнитных свойств вещества удалось построить лишь после того, как было изучено строение атома.

Современная теория магнитных свойств вещества достаточно сложна, и мы ее детально рассмотреть не сможем. Отметим только ее некоторые основные положения.

II. Атомы всех веществ состоят из ядра и электронных оболочек. В простейшей модели атома предполагают, что электроны как бы движутся вокруг ядра и вращаются вокруг своей оси. Движение электрона вокруг ядра называется *орбитальным*, а движение электрона вокруг своей оси — *спиновым*. (Слово «спиновый» образовано от английского слова *spin* — вращаться, вертеться.)

В результате таких движений электрона вокруг него возникает магнитное поле, что соответствует тем молекулярным токам, о существовании которых говорил А. Ампер, хотя в то время о строении атомов и молекул ничего не было известно.

Таким образом, все вещества должны обладать магнитными свойствами, что подтверждается экспериментально. Однако благодаря сложному строению и разнообразным способам упаковки атомов, молекул и ионов магнитные свойства разных веществ различны. Различны они также у одного и того же вещества в разных агрегатных состояниях.

III. У большинства веществ внутри атомов магнитные поля отдельных электронов, а также магнитные поля отдельных атомов и молекул полностью или почти полностью скомпенсированы. Поэтому магнитные свойства большинства веществ очень слабы, они обнаруживаются только с помощью специальных методов. На практике можно намагничиванием этих веществ пренебречь и называть их немагнитными.

Однако существует ряд веществ, например железо, кобальт, никель и некоторые редкоземельные элементы (лантаноиды), а также некоторые сплавы, которые обладают сильными магнитными свойствами. Поскольку сначала эти свойства были обнаружены у металлов группы железа, то эти вещества называли *ферромагнетиками*. (Слово «ферромагнетик» образовано от латинского слова *ferrum* — железо.)

Ферромагнетики очень сильно влияют на магнитное поле. Если в катушку с током внести ферромагнитный сердечник, то магнитное поле усиливается в сотни и даже тысячи раз. Этим широко пользуются в технике: сердечники электромагнитов, реле и многие другие устройства изготавливаются из ферромагнетиков, а чаще всего — из специальных сортов стали.

IV. Ферромагнетики подразделяются на два класса: магнитомягкие и магнитожесткие материалы.

Магнитомягкие материалы легко намагничиваются даже в слабых магнитных полях, но при уменьшении и исчезновении внешнего магнитного поля они сразу же

размагничиваются. При изменении направления внешнего магнитного поля они легко перемагничиваются в противоположном направлении. Из магнитомягких материалов изготавливают сердечники электромагнитов и всех электрических машин.

Магнитотвердые материалы хорошо намагничиваются только в сравнительно сильных магнитных полях, но после намагничивания они сохраняют свои магнитные свойства и тогда, когда внешнее магнитное поле выключено. Из магнитотвердых материалов изготавливают постоянные магниты, широко используемые на практике. Постоянные магниты используются в магнитоэлектрических измерительных приборах, в микрофонах, электродинамических громкоговорителях (динамиках), реле, телефонах и др.

V. Современная теория ферромагнетизма была создана примерно 50 лет тому назад. Большой вклад в создание этой теории внесли отечественные ученые Я. И. Френкель, Л. Д. Ландау, Е. М. Лившиц.

Оказалось, что у ферромагнетиков благодаря особому строению электронных оболочек их атомов в кристалле возникают области самопроизвольного намагничивания, которые носят название *домены*. (Слово «домен» образовано от французского слова *domaine* — владение.) Внутри домена электроны всех атомов располагаются так, что их спиновые магнитные поля имеют одинаковые направления. Таким образом, каждый домен намагничен самопроизвольно до насыщения.

Домены можно наблюдать в микроскоп. Для этой цели поверхность ферромагнетика шлифуется. Затем на нее наносится тонкий слой масла, в котором содержатся мелкие частицы ферромагнитного порошка. Частицы порошка оседают на границах доменов и обрисовывают их контуры (рис. 9.26).

VI. Для каждого ферромагнетика характерна определенная температура, выше которой у него пропадают способности к сильному намагничиванию и его магнитные свойства оказываются такими же, как у немагнитных веществ. Эта температура называется *точкой Кюри* в честь Пьера Кюри, который в 1895 г. открыл это явление.

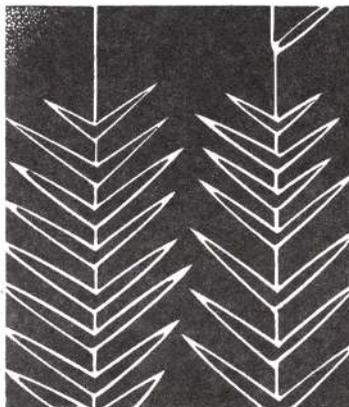


Рис. 9.26

Точка Кюри у железа равна 770°C , у никеля 358°C , у редкоземельного элемента гадолиния 16°C , у сплава пермаллой около 400°C , у сплава пермендюр около 900°C и т. д.

Ферромагнитные свойства не наблюдаются ни у жидкостей, ни у газов. Они характерны только для некоторых кристаллов при температурах ниже точки Кюри.

Вопросы для самопроверки

1. Как Ампер объяснял магнитные свойства вещества?
2. Что собой представляют молекулярные токи с точки зрения современной теории строения вещества?
3. Какие вещества называются ферромагнетиками? Назовите известные вам ферромагнетики.
4. Какие ферромагнитные материалы относятся к магнитомягким? Назовите их свойства и области применения.
5. Какие ферромагнитные материалы относятся к магнитотвердым? Назовите их свойства и области применения.
6. Что такое точка Кюри? Как ее можно определить?

§ 9.10. МАГНИТНЫЕ ПОЛЯ В СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЕ

I. Весьма важную роль во Вселенной, в том числе и в Солнечной системе, играют электромагнитные процессы. Чтобы их описать, рассмотрим вопрос о механизме возникновения магнитных полей вокруг небесных тел.

Нам уже известно, что магнитное поле существует вокруг электрических зарядов, движущихся упорядоченно, т. е. магнитное поле существует вокруг токов. Но в обычных условиях в проводниках токи могут поддерживаться только за счет действия источников тока — генераторов, аккумуляторов и др. Причина этого явления заключается в том, что движущиеся в проводнике электроны тормозятся при взаимодействии с ионной решеткой, и за счет этого энергия электрического тока превращается во внутреннюю энергию проводника и выделяется в форме тепла.

Совершенно иначе обстоит дело в космической плазме. Вследствие высокой степени разрежения здесь расстояния между движущимися частицами очень велики и соударения между ними происходят крайне редко. В результате циркуляция электрических зарядов в космической плазме (т. е. электрические токи), возникшая по какой-либо причине, может продолжаться очень долго. Итак, токи в плазме практически не затухают длительное время. Следовательно, столько же времени вокруг этих циркулирующих зарядов

будут существовать магнитные поля. Образно говорят, что «магнитные поля заморожены в плазму».

II. На этой основе можно качественно объяснить некоторые магнитные явления, происходящие на Солнце. Благодаря высокой температуре атомы водорода и гелия, из которых состоит в основном Солнце (как и все звезды), ионизованы, поэтому звезды — это огромные сгустки плазмы. В этой плазме за счет резкого перепада температур (от 10^7 °C в недрах до 6000 °C в фотосфере) и очень сильного поля тяготения возникают мощные конвекционные потоки.

За счет циркуляции плазмы на Солнце создаются сильные магнитные поля, играющие важную роль во всех процессах солнечной активности. В частности, действием магнитных полей объясняются особенности солнечных пятен, вспышек, протуберанцев и т. д.

Для магнитного поля Солнца характерна значительная неоднородность, которая отмечается всюду, как внутри пятен, так и вне их. Две самые характерные особенности солнечных пятен, несомненно, связаны между собой; это более низкая температура по сравнению с остальной фотосферой и сильное магнитное поле. Магнитное поле пятна сдерживает конвекцию в верхнем слое Солнца, и потому температура самого пятна ниже, чем вокруг него.

Вспышки также, несомненно, связаны с магнитными полями, структура которых после вспышки часто меняется; обычно поле ослабляется. Расчеты показывают, что исчезновения магнитного поля, наблюдаемого в районе пятен, достаточно, чтобы компенсировать выделяющуюся при вспышке энергию. Сила тока в области вспышки может достигать нескольких миллиардов ампер, а напряжение — порядка миллиарда вольт. Плазма в районе вспышки разогревается до температуры около 10 млн. градусов. По скорости протекания вспышка подобна взрыву. Возникающие при этом выбросы газа достигают скоростей порядка 1000 — 1500 км/с и уносят с собой примерно половину энергии вспышки. Одновременно с этим значительную энергию получают ускоряющиеся при вспышке электроны, протоны (ядра водорода) и альфа-частицы (ядра гелия). Преодолев за счет большой скорости притяжение Солнца, эти частицы рассеиваются в космическом пространстве, продолжая двигаться со значительными скоростями. Этот поток частиц и представляет собой *солнечный ветер*.

Важную роль играют магнитные поля также в протуберанцах. Именно за счет довольно сильных магнитных полей протуберанцы удерживаются в короне в течение длительного времени — от нескольких часов до нескольких суток. Магнитные поля препятствуют конвекционному теплообмену между короной и протуберанцами,

вследствие чего их температура ниже температуры короны.

III. Земля обладает значительным магнитным полем. Это поле можно представить как сумму двух полей. Одно из них — это основная (постоянная) составляющая, которая не меняется заметно со временем; второе — это переменная составляющая (менее 1%), зависящая от процессов в околоземной плазме, в основном от явлений на Солнце. Существуют еще местные магнитные поля, возникающие за счет наличия в земной коре залежей ферромагнитных руд, в основном магнитного железняка. Эти местные поля называются *магнитными аномалиями*. Одна из них — Курская магнитная аномалия — в настоящее время интенсивно разрабатывается.

IV. Магнитное поле Земли оказывает существенное влияние на физические условия в космическом пространстве вокруг планеты. Линии магнитного поля из одного ее полушария (Северного полюса) уходят в околопланетное пространство на тысячи и десятки тысяч километров, а затем возвращаются в другое полушарие Земли (к Южному полюсу). Космические исследования показали, что магнитное поле Земли существенно отличается по своей структуре от поля обычного магнита. Это отличие обусловлено воздействием потока заряженных частиц солнечного ветра, идущих от Солнца. Этот поток, двигаясь в магнитном поле Земли, создает дополнительные магнитные поля. При набегании потоков солнечного ветра на геомагнитное поле заряженные частицы

прежде всего тормозятся. Упорядоченное движение частиц переходит в основном в хаотичное — тепловое.

Образующийся слой плазмы обтекает магнитное поле Земли и определяет структуру ее магнитосферы, приобретающей несимметричную форму (рис. 9.27). Солнечный ветер прижимает магнитосферу к Земле с дневной стороны. С ночной стороны образуется длинный шлейф, который простирается за Землей по направлению солнечного ветра на расстояние более 5,5 млн. км. Расстояние от поверхности Земли до внешней границы магнитосферы на дневной стороне составляет около 10 радиусов планеты (примерно 60 000 км).

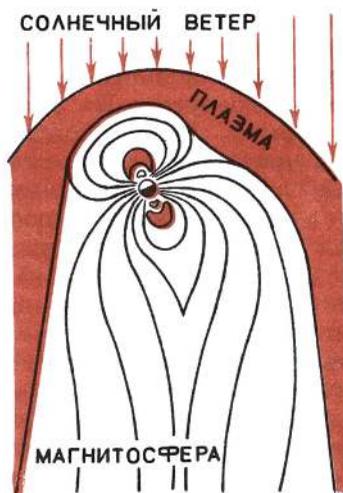


Рис. 9.27

В зависимости от действия солнечного ветра эта величина несколько меняется.

Шлейф магнитосферы образуют силовые линии, выходящие из северной и южной полярных шапок Земли. Двигаясь вдоль этих линий, частицы плазменного шлейфа магнитосферы ускоряются и, попадая в верхнюю атмосферу Земли, вызывают полярные сияния.

В области замкнутых силовых линий частицы плазмы могут длительное время удерживаться, благодаря чему возникают пояса радиации нашей планеты. Электроны и протоны, входящие в состав этих поясов, движутся в геомагнитном поле от одного полюса к другому, будучи не в состоянии покинуть эту «магнитную ловушку». Тем самым поддерживается дрейф частиц между полюсами и существование поясов радиации Земли. Внутренний пояс располагается на высотах от 2,4 до 6 тыс. км, а внешний — от 12 до 20 тыс. км.

V. У всех планет земной группы (кроме самой Земли), а также у спутников планет, в том числе и у Луны, практически нет магнитных полей. Это удалось установить с помощью космических аппаратов, пролетавших вблизи этих небесных тел, а также с помощью приборов, установленных на поверхности Луны, Венеры и Марса. Так, магнитное поле на поверхности Венеры в 10 тыс. раз слабее, чем на поверхности Земли; на поверхности Луны и Марса оно немного сильнее, чем на Венере, но много меньше, чем на Земле.

Из-за слабости магнитных полей у всех планет земной группы (за исключением самой Земли) и у спутников планет нет радиационных поясов; заряженные космические частицы легко попадают на их поверхность.

VI. В отличие от планет земной группы планеты-гиганты окружены значительной магнитосферой. Это можно объяснить за счет их быстрого вращения вокруг своей оси — вдвое быстрее, чем обращается Земля, а также предположив, что в их недрах имеется мощное жидкометаллическое ядро с хорошей электропроводностью (см. § 6.5).

Наличие внутри планет-гигантов жидкого вещества и конвективных движений в нем косвенно подтверждается наличием у них магнитных полей, обнаруженных благодаря пролету космических аппаратов «Вояджер» вблизи Юпитера, Сатурна, Урана и Нептуна. Наиболее сильным (на порядок выше геомагнитного) оно оказалось у Юпитера, у других планет-гигантов оно сравнимо с земным. Все эти планеты имеют магнитосферы, причем самая мощная из них (у Юпитера) превосходит по своим размерам не только магнитосферу Земли, но и размеры са-

мого Солнца. Внутри магнитосферы Юпитера, граница которой проходит на расстоянии до 100 радиусов планеты, находятся пять его спутников, в том числе и спутник Ио. Этот спутник, видимо, является основным источником заряженных частиц в магнитосфере планеты. Это существенно отличает магнитосферу Юпитера от земной, где источником протонов и электронов является солнечный ветер. В атмосфере Юпитера наблюдались полярные сияния и мощные молнии.

У Сатурна кольца располагаются внутри его магнитосферы. Вещество, входящее в состав этих колец, поглощает заряженные частицы, которые движутся от одного полушария планеты к другому вдоль линий магнитного поля. В результате внутри магнитосферы образуется зона, свободная от заряженных частиц. Таким образом, наличие колец и большого числа спутников у планет-гигантов в значительной мере влияет на явления, происходящие в околопланетном пространстве.

Вопросы для самопроверки

1. Почему в проводниках необходим источник для поддержания постоянного тока?
2. Почему в космической плазме циркуляция заряженных частиц может продолжаться очень долго без всякого источника?
3. Что мы понимаем под выражением «магнитное поле вморожено в плазму»?
4. За счет чего возбуждаются магнитные поля на Солнце?
5. Какая связь между солнечными пятнами и магнитными полями?
6. Что такое солнечный ветер? Как он образуется?
7. Солнечная активность периодически меняется с периодом 11 лет. Колебания переменной составляющей магнитного поля Земли — магнитные бури — происходят с такой же периодичностью. Случайно ли это? Ответ обоснуйте.
8. Что представляет собой радиационный пояс Земли?
9. Почему полярные сияния наблюдаются только вблизи магнитных полюсов Земли?

ДОМАШНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ЗАДАНИЯ

9.1. Объясните, почему гвозди, канцелярские скрепки, повисшие на магните и находящиеся рядом, отклоняются от вертикального направления. Проведите опыт и убедитесь в этом.

9.2. С помощью компаса определите, намагничено ли бритвенное лезвие. Проверьте возможность размагничивания этого лезвия путем нагревания в пламени свечи или газовой горелки. При нагревании лезвие держите пинцетом или плоскогубцами.

9.3. Понаблюдайте за поведением двух рядом висящих швейных иголок при поднесении к ним постоянного магнита.

9.4. Имеются два одинаковых бритвенных лезвия, одно из которых намагничено. С помощью компаса определите намагниченное лезвие. Опишите способ определения. Можно ли это сделать без компаса?

9.5. Поднесите компас вначале ко дну, а затем к верхней части железного ведра (кастрюли), стоящего на земле. У дна стрелка компаса поворачивается южным полюсом к ведру, а в верхней части — северным. Проверьте это явление и объясните его.

9.6. Попытайтесь намагнитить иголку с помощью трения о магнит, магнитную защелку для двери или магнит динамического громкоговорителя. Подвесьте иголку на нитку и по ее отклонению при поднесении к предметам домашнего обихода определите, какие из них — стальные предметы. При наличии компаса проведите с ним те же исследования.

9.7. Попробуйте намагнитить иголку так, чтобы ушко оказалось северным полюсом, а острие — южным. Воткните иголку в корковую пробку и опустите в стакан с водой так, чтобы иголка плавала вертикально северным полюсом вверх. Экспериментально проверьте, как ведет себя иголка, если к ней на уровне северного полюса поднести магнит (полосовой, подковообразный). Проверьте, будет ли перемещаться иголка, если между магнитом и стаканом поставить лист стали.

9.8. Изготовьте простейший гальванометр. Для этого каркас катушки склейте из плотной бумаги. Размеры каркаса определите внешними габаритами компаса. Ширина каркаса должна быть 12—15 мм. На каркас намотайте 50—70 витков провода ПЭЛ-0,2. В катушку вставьте компас и получите гальванометр. Используя этот самодельный гальванометр, определите знаки полюсов самодельного гальванического элемента, состоящего из медной и железной проволок, опущенных в раствор поваренной соли (или уксуса).

9.9. Если у вас черно-белый телевизор, то поднесите магнит к экрану, на котором проецируется «маска» (испытательная таблица). Что вы увидите? Объясните это явление.

9.10. На гвоздь или другой железный стержень намотайте 40—50 витков медной проволоки и концы ее подклю-

чите к гальваническому элементу. Исследуйте тела, к которым притягивается электромагнит.

9.11. Рассмотрите с участием родителей устройство электрического звонка или телефонной трубки. Сделайте эскизный рисунок этих приборов и объясните принцип их действия.

9.12. Снимите и запишите паспортные данные электродвигателя холодильника, швейной машины, электрофона, магнитофона, кофемолки, миксера, вентилятора и т. д. Пользуясь техническим описанием, изобразите схемы их включения.

9.13. Рассмотрите устройство игрушечного электродвигателя (из конструктора). Соберите его, присоедините к клеммам гальванического элемента (например, батарейки) и обратите внимание на направление вращения якоря. Попробуйте изменить направление вращения якоря на противоположное.

9.14. Выньте якорь из индуктора игрушечного электродвигателя и проверьте, есть ли между полюсами индуктора магнитное поле.

9.15. На полюсы магнита положите стекло, посыпьте его сверху стальными опилками и осторожно постучите пальцем или карандашом по стеклу. Зарисуйте картину магнитного поля.

ГЛАВА 10. ЯВЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ

§ 10.1. ОТКРЫТИЕ ФАРАДЕЯ

I. Узнав об открытии Х. Эрстеда, М. Фарадей записал: «Коль скоро электричество может создавать магнетизм, может ли магнетизм создавать электричество?» В переводе на современный язык этот вопрос можно сформулировать так: «Если электрический ток создает магнитное поле, то нельзя ли с помощью магнитного поля получить электрический ток?» Фарадей был убежден, что это можно сделать, но в то время он не знал, как этого добиться. Начиная с 1824 г. Фарадей пытался решить поставленную задачу, ставил опыт за опытом, но все было безуспешно. И только в 1831 г. его настойчивость и упорство были вознаграждены. Он поставил опыт, который доказал справедливость выдвинутой им гипотезы: *с помощью магнита в замкнутой цепи был получен электрический ток.*

II. За девять лет Фарадей проделал множество опытов. Описанный ниже — это упрощенный вариант одного из них, и поставлен он уже на современном оборудовании.

К чувствительному гальванометру подключают катушку с большим числом витков из медного изолированного провода (рис. 10.1,а). Перемещая вдоль катушки, как показано на рисунке, постоянный магнит, видят, что, пока магнит движется, стрелка гальванометра отклоняется. Это говорит о том, что в катушке есть электрический ток (рис. 10.1,б). Но, как только магнит останавливается, этот ток исчезает (рис. 10.1,в). При движении магнита в обратном направлении электрический ток в катушке возникает вновь, но стрелка гальванометра укажет, что направление тока теперь противоположно первому (рис. 10.1,г). Ток, который возникает в катушке, когда относительно нее движется постоянный

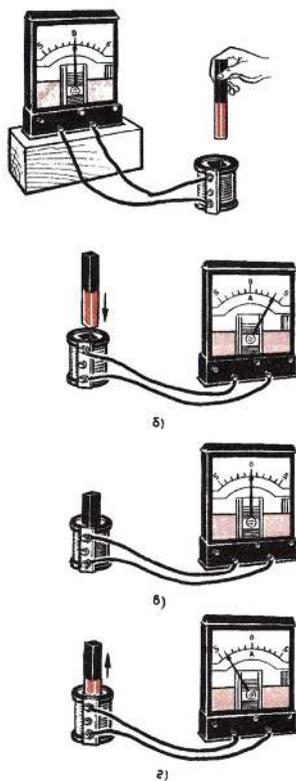


Рис. 10.1

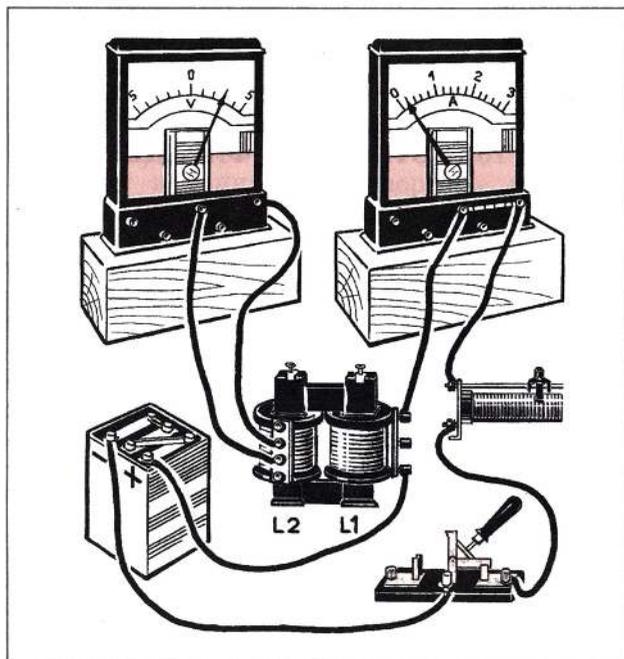


Рис. 10.2

магнит, назвали *индукционным*. (Слово «индукционный» образовано от латинского слова *inductio* — наведение.) Этот ток в катушке индуцируется, т. е. наводится движущимся магнитом.

Для того чтобы объяснить этот факт, вспомним, как направлены силовые линии магнитного поля прямого магнита (см. рис. 9.2). Тогда мы убедимся, что при движении магнита вверх и вниз меняется магнитное поле, пронизывающее катушку.

Можно двигать не магнит, а катушку относительно магнита; и здесь мы вновь обнаружим индукционный ток.

Опыты дают основание предположить, что причиной возникновения индукционного тока является изменение магнитного поля, которое пронизывает катушку. Но это пока только предположение, которое нуждается в обосновании.

III. Для проверки этого предположения собирают электрическую установку, показанную на рисунке 10.2. Замыкают ключ. В обмотке электромагнита, образованного магнитопроводом и катушкой L_1 , возникает электрический ток. При этом отклоняется стрелка гальванометра. Следовательно, в катушке L_2 возникает индукционный ток. Размыкая ключ, видят, что стрелка гальванометра отклоняется от нуля в

другую сторону. Следовательно, изменилось направление индукционного тока в катушке. Итак, замыкая или размыкая цепь первой катушки с помощью ключа, мы меняем магнитное поле и возбуждаем индукционный ток во второй катушке.

Чтобы продолжить проверку такого предположения, реостатом меняют силу тока, протекающего через первую катушку электромагнита. При этом меняется магнитное поле. В результате можно увидеть, что в катушке L_2 возникает индукционный ток. Итак, меняя силу тока, протекающего через первую катушку, во второй катушке возбуждают индукционный ток. Тем самым опыт подтверждает наше предположение, что *при любом изменении магнитного поля, пронизывающего катушку, в ней возникает индукционный ток*. Это явление назвали *электромагнитной индукцией*. Магнитное поле, которое не меняется, индукционного тока не создает.

Открытие Фарадея имело величайшие последствия. Оно послужило научной основой для создания электротехники. В последующих параграфах мы познакомимся с принципом действия генератора, трансформатора, микрофона, громкоговорителя. В основе их действия лежит открытое М. Фарадеем явление электромагнитной индукции.

В о п р о с ы д л я с а м о п р о в е р к и

1. Какой опыт послужил М. Фарадею основанием для выдвижения гипотезы о существовании явления электромагнитной индукции?
2. Когда Фарадей открыл явление электромагнитной индукции? Какой опыт был им поставлен для проверки своей гипотезы?
3. При каком условии возникает индукционный ток?
4. Какой из опытов по получению индукционного тока вы можете проделать?

§ 10.2. ЭЛЕКТРОДВИЖУЩАЯ СИЛА ИНДУКЦИИ. ПРАВИЛО ЛЕНЦА

I. Вам уже известно, что электрический ток в металлах — это упорядоченное движение свободных электронов вдоль проводника, вызванное электрическим полем. Следовательно, и индукционный ток также возникает под действием электрического поля, создающегося за счет изменения магнитного поля. Как всякое электрическое поле, оно совершает работу по перемещению заряда в цепи. Однако здесь имеются и свои принципиальные особенности.

В поле, связанном с электрическими зарядами (см.

главу 1), силовые линии начинаются на положительных зарядах и заканчиваются на отрицательных. Электрическое поле, возникающее в процессе изменения магнитного поля, не связано с каким-либо распределением электрических зарядов. Переменное магнитное поле неразрывно связано с этим электрическим полем, и поэтому говорят, что в этом случае мы имеем дело с электромагнитным полем.

Силовые линии электрического поля, связанного с переменным магнитным полем, не имеют начала и конца — они замкнуты наподобие силовых линий магнитного поля. Такое поле называется вихревым.

II. Электростатическое (кулоновское) поле не способно вызвать перемещение электрических зарядов по замкнутому контуру. Вихревое электрическое поле, возникающее в процессе электромагнитной индукции, *создает электрический ток в замкнутом проводнике, следовательно, оно способно вызывать циркуляцию электрических зарядов.* В связи с этим возникает необходимость введения специальной энергетической характеристики вихревого электрического поля: *электродвижущей силы индукции (сокращенно — ЭДС индукции).* Обозначается ЭДС индукции буквой \mathcal{E} .

Электродвижущей силой индукции называется отношение работы, совершаемой вихревым полем при перемещении электрического заряда по замкнутому контуру, к модулю перемещаемого заряда:

$$\mathcal{E} = \frac{A_{\text{вихр}}}{q}$$

Очевидно, что ЭДС индукции, как и напряжение, выражается в вольтах.

Закон Ома для замкнутой цепи запишется так:

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R},$$

где R — сопротивление всей замкнутой цепи.

III. Выясним, от чего зависит ЭДС индукции. Исходя из закона Ома для замкнутой цепи о значении ЭДС индукции можно судить, как видно из формулы, по силе индукционного тока и сопротивлению участка.

Если в катушку вносить один и тот же постоянный магнит (см. рис. 10.1), но с разной скоростью, то можно заметить, что при быстром движении магнита сила тока больше, чем при медленном.

Таким образом, делаем вывод: *ЭДС индукции пропорциональна скорости изменения магнитного поля, пронизывающего катушку.*

IV. Чтобы проверить это предположение, вновь обратимся к установке, изображенной на рисунке 10.2. Двигая ручку реостата, меняют силу тока, питающего первую катушку. Оказывается, что *сила индукционного тока во второй катушке тем больше, чем быстрее меняется сила тока в первой катушке*. Но ток, протекающий через обмотку первой катушки, определяет магнитное поле, пронизывающее вторую катушку. Итак, результаты опыта подтверждают наше предположение о том, что ЭДС индукции пропорциональна скорости изменения магнитного поля, пронизывающего катушку, в которой индуцируется ток.

V. Меняют вторичную катушку на катушку с другим числом витков. Опыт повторяют и видят, что сила индукционного тока, а следовательно, и ЭДС индукции пропорциональны числу витков вторичной катушки при одной и той же скорости изменения магнитного поля.

Таким образом, из проделанных опытов мы делаем вывод: *ЭДС индукции пропорциональна скорости изменения магнитного поля, пронизывающего катушку, и числу витков на ней*.

VI. Остается выяснить, от чего зависит направление индукционного тока. Опытами, изображенными на рисунке 10.1, демонстрируют зависимость направления индукционного тока от направления движения магнита, а также от того, какой полюс вносят в катушку: северный или южный. Опытами, изображенными на рисунке 10.2, демонстрируют зависимость направления тока от замыкания или размыкания цепи первичной катушки.

Исследуя это явление, Э. Х. Ленц в 1833 г. установил общее правило для определения направления индукционного тока: *индукционный ток всегда имеет такое направление, чтобы своим магнитным полем препятствовать причине, вызвавшей этот ток*.

Это правило можно подтвердить на опыте. В установке, изображенной на рисунке 10.3, подносят магнит к сплошному кольцу. Видят: кольцо отталкивается от полюса маг-

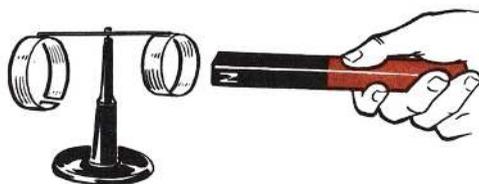


Рис. 10.3

нита. Если же надеть кольцо на магнит и затем вытягивать магнит из него, то кольцо тянется за магнитом. Как видно, индуцируемый в кольце ток препятствует в первом случае приближению магнита, во втором — его удалению.

В том, что причиной движения кольца является именно индукционный ток, а не другая причина (например, движение воздуха), можно убедиться. Попробуйте приблизить или удалить магнит относительно кольца с разрезом. Увидите, что кольцо не движется. Дело в том, что в разрезанном кольце индукционный ток не возникает, а следовательно, оно с магнитом не взаимодействует.

Вопросы для самопроверки

1. На основании каких фактов и теоретических соображений мы приходим к выводу о существовании ЭДС индукции?
2. От чего зависит ЭДС индукции; сила индукционного тока? Какими опытами подтверждаются ваши умозаключения?
3. Как формулируется правило Ленца? Как связаны направления индукционного тока и изменения магнитного поля?
4. Каким опытом можно подтвердить справедливость правила Ленца?

§ 10.3. ПЕРЕМЕННЫЙ ИНДУКЦИОННЫЙ ТОК

I. Если в установке, изображенной на рисунке 10.1, привести магнит в колебательное движение, двигая его периодически вверх и вниз, то в такт с ним придет в колебание и стрелка гальванометра. Дело в том, что при изменении направления движения магнита меняется и направление тока. Но при этом меняется не только направление, но и сила тока; при остановках магнита сила тока равна нулю, а наибольшее значение силы тока получается в те моменты времени, когда магнит движется с максимальной скоростью.

Таким образом, при колебании магнита в катушке в ней индуцируется электрический ток, у которого ЭДС и сила тока периодически меняются по модулю и направлению. Такой ток называется *переменным током*.

Электрический ток, сила которого периодически меняется по модулю и направлению, называется переменным током. В технике обычно применяется синусоидальный переменный ток, о чем будет сказано ниже.

II. Чтобы получить наглядную картину изменения силы индукционного тока и напряжения, используют специальный прибор — *электронный осциллограф*, основной частью которого является электронно-лучевая трубка

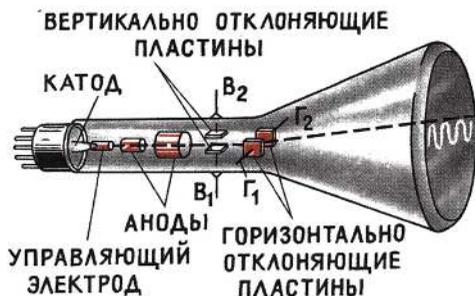


Рис. 10.4

(рис. 10.4). Электроны, пролетая в пучке между пластинами и попадая на экран, высвечивают на нем яркую точку. Если на пластины B_1 и B_2 подавать постоянное напряжение, то этот пучок электронов притянется к положительно заряженной пластине. Если же на пластины подать переменное напряжение, то пучок электронов станет колебаться вверх и вниз, т. е. вертикально, выписывая на экране прямую линию (рис. 10.5).

Если напряжение от специального генератора подать на пластины Γ_1 и Γ_2 , то электронный пучок будет медленно перемещаться по экрану горизонтально и скачком возвращаться обратно. В результате суммарного действия обоих электрических полей электронный пучок выписывает на экране кривую — *осциллограмму* (рис. 10.6), форма которой соответствует синусoidalному переменному току.



Рис. 10.5

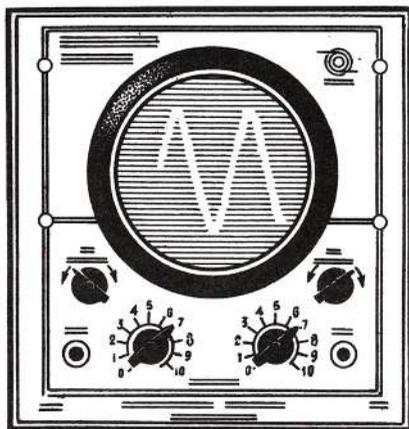


Рис. 10.6

Вопросы для самопроверки

1. Какой электрический ток называется переменным?
2. Почему при колебаниях магнита в катушке индуцируется переменный ток?
3. Как устроен электронный осциллограф?

§ 10.4. МИКРОФОН. ГРОМКОГОВОРИТЕЛЬ

I. Все вы видели, как говорят или поют в микрофон. (Слово «микрофон» образовано от греческих слов *mikros* — малый и *phone* — звук, голос.) Этот прибор служит для преобразования звука в электрические сигналы. Рассмотрим, как это происходит, на примере *электродинамического микрофона*.

Если снять с микрофона кожух, то под ним мы увидим небольшой постоянный магнит, имеющий Ш-образную форму (рис. 10.7). В промежутке между полюсами магнита находится легкая звуковая катушка 1, каркас которой соединен с мембраной 2. Мембрана с помощью очень гибких своих концов прикреплена к корпусу микрофона 3.

Если перед микрофоном кто-то будет говорить, то мембрана под действием воздуха начнет колебаться. Вместе с мембраной звуковая катушка начнет втягиваться в зазор

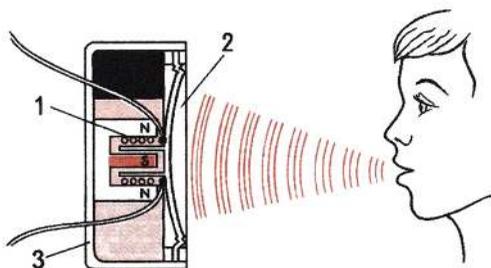


Рис. 10.7

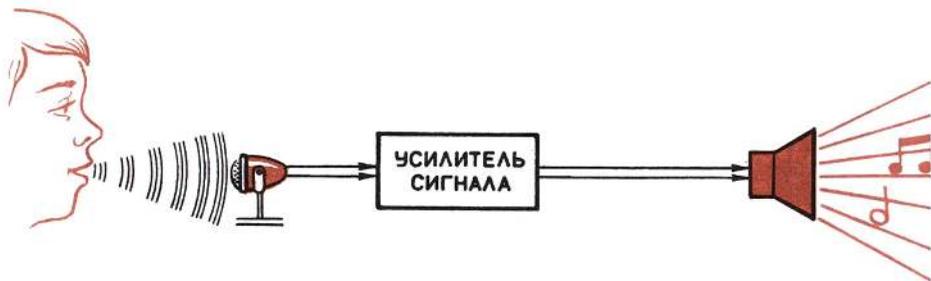


Рис. 10.8

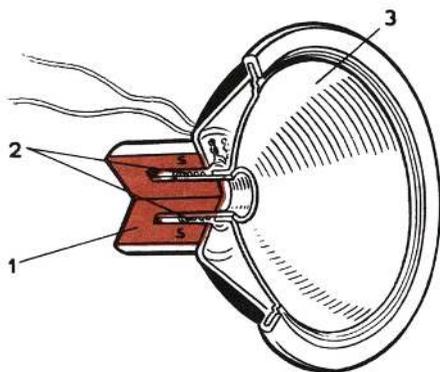


Рис. 10.9

магнита и выталкиваться из него, совершая колебания. А так как она находится в магнитном поле постоянного магнита, то в ней возникает переменный индукционный ток, форму которого можно наблюдать на экране осциллографа.

Таким образом, микрофон преобразует механическую энергию звуковых колебаний воздуха в электрическую энергию индукционного тока.

II. Ток, возникающий в микрофоне, очень слаб. Однако существуют специальные приборы, усиливающие слабые электрические колебания (см. § 11.6).

Слабый электрический ток от микрофона подают на вход усилителя, а усиленный сигнал — на громкоговоритель (рис. 10.8). Как же устроен громкоговоритель?

В *электродинамическом громкоговорителе*, как и в микрофоне, есть сильный постоянный Ш-образный магнит 1 (рис. 10.9). В зазоре между полюсами находится, как и в микрофоне, звуковая катушка 2, которая соединена с диффузором 3. Когда усиленный переменный ток от микрофона проходит по звуковой катушке, она то втягивается в зазор магнита, то выталкивается из него (см. § 9.5). Катушка и прикрепленный к ней диффузор совершают такие же колебания, как и катушка микрофона, только усиленные. Поэтому мы и слышим громкий звук.

Электродинамический громкоговоритель кратко называется *динамик*.

Вопросы для самопроверки

1. Как устроен и работает микрофон?
2. Как устроен и работает громкоговоритель?
3. Соединены между собой два микрофона, которые находятся в разных квартирах. Можно ли с их помощью переговариваться?

§ 10.5. ИНДУКЦИОННЫЙ ГЕНЕРАТОР ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

I. Для получения электрической энергии в настоящее время в технике в основном используются индукционные генераторы, в которых механическая энергия преобразуется в электрическую. Для этого используется явление электромагнитной индукции.

Пусть над сердечником с надетой на него катушкой вращается постоянный магнит. При его вращении магнитное поле, в котором находится катушка, непрерывно меняется и в ней возникает переменный индукционный ток, о котором можно судить по отклонению стрелки гальванометра. На этом принципе работает *индукционный генератор переменного тока*.

II. Схема индукционного генератора переменного тока изображена на рисунке 10.10. Неподвижная часть генератора, т. е. *статор 1*, представляет собой станину, набранную из листов магнитомягкой электротехнической стали. На статоре имеется обмотка из толстого медного провода.

Вращающаяся часть генератора — *ротор 2* представляет собой электромагнит, обмотка 3 которого питается от генератора постоянного тока — *возбудителя*. В маломощных генераторах в качестве ротора используется постоянный магнит.

При вращении ротора ипользуется магнитное поле, пронизывающее обмотку статора, периодически меняется, за счет чего в ней индуцируется переменная ЭДС индукции.

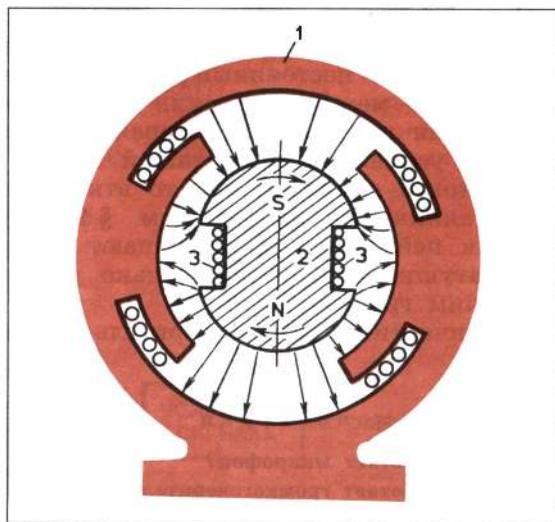


Рис. 10.10

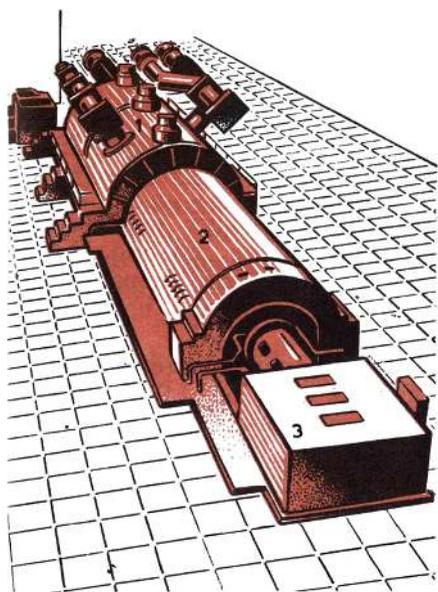


Рис. 10.11

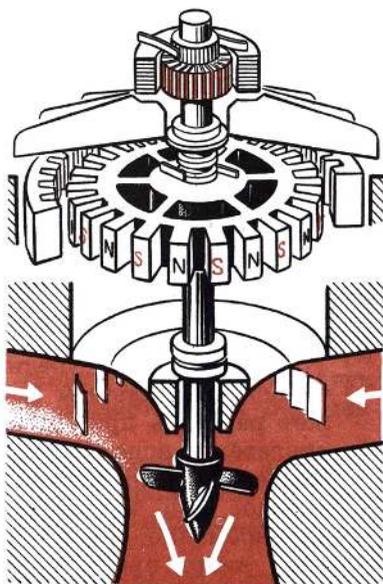


Рис. 10.12

III. На тепловых электростанциях для вращения ротора используются паровые турбины. Такой генератор называется *турбогенератором*. Вал турбогенератора по европейскому стандарту совершает 50 оборотов в секунду. За один оборот ротора в обмотке генератора направление тока меняется 1 раз, а за 50 оборотов — 50 раз. Это значит, что ток в течение одной секунды 50 раз поменяет свое направление. Таким образом, сила переменного тока совершает 50 колебаний за одну секунду. А так как в СИ частота электрических колебаний выражается в *герцах* (Гц), то в данном случае частота колебаний переменного тока равна 50 Гц (1 Гц равен одному колебанию в одну секунду). Ток синусоидальный (см. рис. 10.6).

Заметим, что ротор турбогенератора содержит одну пару полюсов (см. рис. 10.10).

Турбогенератор (рис. 10.11) состоит из трех основных узлов: паровой турбины 1, генератора синусоидального переменного тока 2 и возбудителя 3.

IV. На гидроэлектростанциях для вращения ротора используются сравнительно тихоходные водяные турбины. Поэтому для получения переменного тока частотой 50 Гц применяют генераторы с роторами, имеющими большое число пар полюсов (рис. 10.12).

V. Переменный ток обладает рядом свойств, аналогичных свойствам постоянного тока, однако некоторые его свойства отличны от свойств постоянного тока.

Так, протекая по проводникам, переменный ток их нагревает (как и постоянный). Это свойство используется в электронагревательных приборах и электрических лампах накаливания.

Вокруг проводников, по которым проходит переменный ток, обязательно существует магнитное поле, но оно, как и ток, переменно. У электромагнита, питаемого переменным током от сети, 50 раз в одну секунду меняется полярность концов магнитопровода (сердечника).

VI. Нетрудно убедиться, что коллекторный двигатель с последовательным возбуждением (см. рис. 9.22, а) может работать при питании его переменным током. Такие двигатели используются во многих бытовых приборах (пылесос, соковыжималка, вентилятор и др.). Действительно, при изменении полярности полюсов индуктора одновременно меняется направление тока в якоре, поэтому якорь продолжит вращение в том же направлении.

Вопросы для самопроверки

1. Каков принцип работы индукционного генератора?
2. Какие свойства переменного тока вы знаете?
3. Каковы устройства индукционного турбо- и гидрогенератора? Объясните по рисункам 10.11 и 10.12.
4. Почему у ротора турбогенератора одна пара полюсов, а у гидрогенератора — много?

Упражнения

1. Докажите, что гидрогенератор Братской ГЭС вырабатывает переменный ток частотой, равной 50 Гц. Его ротор, вращающийся с частотой 125 об/мин, имеет 24 пары полюсов.
2. Сколько пар полюсов должно быть у гидрогенератора, если его ротор вращается с частотой 5 об/с? Частота индуцируемого тока 50 Гц.
3. Докажите, что магнитоэлектрические приборы непригодны для измерений в цепях переменного тока, а электромагнитные и электродинамические — пригодны.

§ 10.6. ТРАНСФОРМАЦИЯ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

I. Переменный ток обладает еще одним важным свойством: его напряжение можно сравнительно легко менять — трансформировать (слово «трансформация» образовано от латинского слова *transformo* — преобразую).

Простейший трансформатор состоит из замкнутого магнитопровода, на который надеты две катушки (рис. 10.13). Одна из катушек, называемая *первичной*, включается в сеть переменного тока. Магнитное поле первичной катушки в основном проходит по магнитопроводу; оно переменное и меняется с той же частотой, что и ток в первичной катушке. Это переменное магнитное поле пронизывает другую катушку, называемую *вторичной*, и создает в ней переменный индукционный ток.

II. Допустим, что первичная катушка имеет w_1 витков и по ней проходит переменный ток при напряжении U_1 . Вторичная обмотка имеет w_2 витков, и в ней индуцируется переменный ток при напряжении U_2 .

Опыт показывает, что, во сколько раз число витков вторичной катушки больше (или меньше) числа витков первичной катушки, во столько же раз напряжение на вторичной катушке больше (или меньше) напряжения на первичной катушке:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{w_1}{w_2} = k.$$

Величина k называется *коэффициентом трансформации*. Он равен отношению числа витков в первичной обмотке к числу витков во вторичной обмотке. Если $k < 1$, то $U_2 > U_1$, т. е. трансформатор повышает напряжение, если же $k > 1$, то $U_2 < U_1$, т. е. напряжение понижает.

III. Трансформатор преобразует поступающую в первичную обмотку электрическую энергию переменного тока

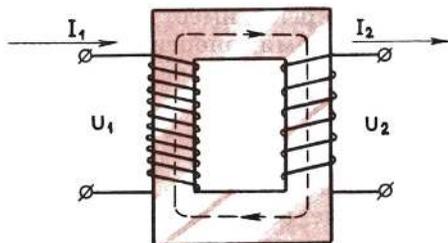


Рис. 10.13

одного напряжения в электрическую энергию переменного тока другого напряжения. Коэффициент полезного действия (КПД) у мощных трансформаторов достигает 99,5%, у бытовых при нормальной нагрузке — около 80—90%.

Трансформаторы широко применяются в технике и в быту. Так, только в одном телевизоре для питания кинескопа необходимы напряжения от 700 до 25 000 В, а для питания транзисторов — 1,5—2 В. Напряжение же в сети, как вы знаете, равно 220 В, поэтому для получения необходимых напряжений в телевизоре используется трансформатор, который и преобразует напряжение 220 В каждого узла в необходимое напряжение.

Еще один пример будет рассмотрен в § 10.7, при анализе передачи электроэнергии на большие расстояния.

Вопросы для самопроверки

1. Каково устройство трансформатора?
2. Почему во вторичной обмотке трансформатора возникает ток?
3. Почему с помощью трансформатора нельзя изменить напряжение постоянного тока?

Упражнения

1. Первичная обмотка трансформатора содержит 800 витков. Сколько витков на вторичной обмотке, если трансформатор повышает напряжение с 220 В до 28 кВ?
2. Электрический прибор мощностью 60 Вт рассчитан на напряжение 36 В. На паспорте трансформатора, от которого питается прибор, указано: 220 В/36 В; КПД прибора — 0,8. Определите силу тока, протекающего по первичной и вторичной обмоткам трансформатора.

§ 10.7. ПЕРЕДАЧА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

I. Электрическая энергия имеет неоспоримые преимущества перед другими видами энергии. Во-первых, ее легко преобразовать в другие виды энергии: вспомните работу электродвигателя, нагревательных приборов, электрическое освещение и др. Во-вторых, это экологически чистый вид энергии: при ее преобразовании в другие виды окружающая среда не загрязняется. В-третьих, электрическую энергию легко передать на любые расстояния.

О том, что электроэнергию легко передать на малые расстояния, вы знаете из повседневного опыта. По двум проводам электроэнергию можно подвести к любому прибору в

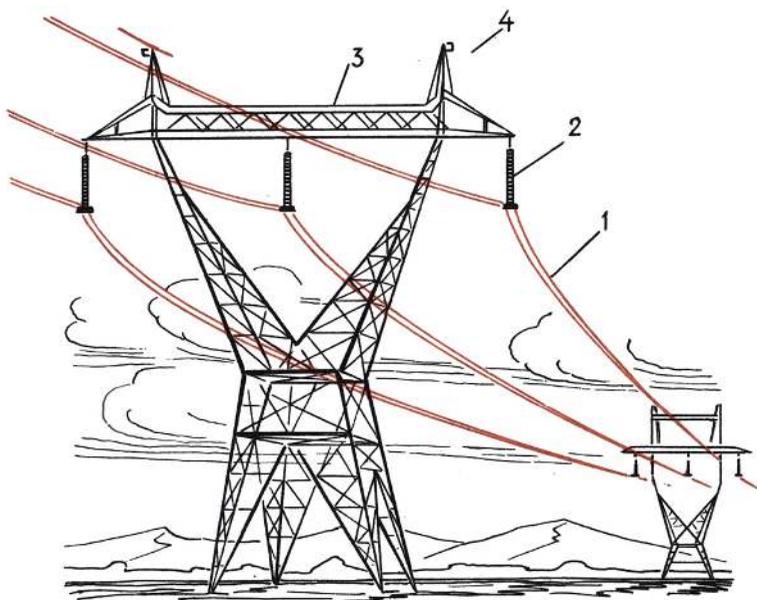


Рис. 10.14

квартире. На большие расстояния электроэнергию также можно передавать, но при этом приходится преодолеть некоторые трудности, связанные с потерей энергии за счет нагрева проводов линии электропередачи (ЛЭП).

II. Мощность тока, расходуемого на нагревание проводов (см. § 8.6), равна $P_{\text{пр}} = I^2 R_{\text{пр}}$, где I — сила тока в проводах и $R_{\text{пр}}$ — сопротивление проводов. Из этой формулы видно, что для уменьшения потерь энергии в линии необходимо уменьшить силу тока и уменьшить сопротивление линии.

Чтобы уменьшить сопротивление линии, используют провода, изготовленные из материала с малым удельным сопротивлением (обычно медь или алюминий), и увеличивают их поперечное сечение. Однако этот путь малоэффективен — провода должны иметь малую массу.

Для уменьшения силы тока при сохранении мощности ($P = IU$) повышают напряжение, т. е. ток трансформируют. Для этого на территории электростанции устанавливают повышающие трансформаторы (повышающая подстанция). Напряжение, вырабатываемое генераторами (обычно около 20 кВ), повышают до напряжения 75 кВ, 500 кВ и даже до напряжения 1,15 МВ, в зависимости от длины линии электропередачи. Повышая напряжение с 20 до 500 кВ, т. е. в 25 раз, уменьшают потери в линии в 25^2 , т. е. в 625 раз.

III. Линии, по которым электрическая энергия передается от электростанций к местам ее потребления, называют линиями электропередачи или сокращенно ЛЭП.

На дальние расстояния ЛЭП имеют следующие основные узлы (рис. 10.14): токонесущие провода 1, которые с помощью гирлянд тарельчатых изоляторов 2 подвешиваются к опорам 3; грозозащитные заземленные тросы (молниеотводы) 4.

Грозозащитные провода выполняют роль молниеотводов и защищают ЛЭП от непосредственных грозových разрядов.

IV. Переданная по ЛЭП электрическая энергия из-за ее высокого напряжения не может быть непосредственно использована потребителями, поэтому ее напряжение на месте потребления понижается.

Понижение напряжения происходит в несколько этапов. После понижающей трансформаторной подстанции, установленной в конце ЛЭП, энергия к месту потребления подается при напряжении 35 или 6 кВ. Затем, на местах потребления, она трансформируется до напряжения, на которое рассчитаны потребители (обычно 380/220 В переменного тока).

Вопросы для самопроверки

1. Каковы основные преимущества электрической энергии перед другими видами энергии?
2. Почему при передаче электрической энергии на дальние расстояния ее напряжение в цепи повышают?
3. Для чего нужны понижающие подстанции?
4. Из каких основных частей состоит ЛЭП?
5. Каков вид простейшей схемы производства, передачи и потребления электроэнергии?

Упражнения

1. Генератор маломощной электростанции вырабатывает ток напряжением 300 В. Для передачи на расстояние в 10 км ток трансформируют до напряжения 6 кВ. Во сколько раз уменьшились потери энергии на нагревание проводов?
2. Двухпроводная ЛЭП длиной 20 км выполнена из медного провода сечением 16 мм^2 . По линии передается электроэнергия при напряжении 650 В и силе тока 10 А. Каковы потери мощности тока в результате нагрева проводов? Целесообразна ли передача электроэнергии при данном напряжении ($\rho = 1,72 \cdot 10^{-2} \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2/\text{м}$)?
3. Если в условии предыдущей задачи принять напряжение на линии равным 6,5 кВ, то какова будет сила тока? Какая мощность будет потеряна в результате на-

грева проводов? Целесообразна ли передача электроэнергии при новом напряжении?

4. Определите КПД линии электропередачи в двух предыдущих задачах.

ДОМАШНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ЗАДАНИЯ

10.1. К самодельному гальванометру (см. задание 9.8) присоедините концы проволочной катушки, содержащей 50—70 витков провода ПЭЛ-0,2. В эту катушку вводите, а затем выводите полюс постоянного магнита. Присмотритесь, как себя ведет стрелка компаса у гальванометра. Прделайте тот же опыт с другим полюсом и посмотрите, что при этом меняется.

10.2. Изготовьте еще одну такую катушку (см. 10.1) и наденьте обе катушки на железный сердечник. Концами провода второй катушки коснитесь полюсов гальванического элемента (батарейки), затем отключите провода. Поясните то, что вы увидите при замыкании и размыкании цепи второй катушки. В этом упражнении вы повторили знаменитые опыты М. Фарадея (1832), где он впервые наблюдал явление электромагнитной индукции.

10.3. Присоедините самодельный гальванометр, сконструированный на базе компаса (см. задание 9.8), к громкоговорителю. По диффузору динамика пальцем или карандашом сделайте несколько легких ударов. Объясните наблюдаемое явление.

10.4. В мастерской по ремонту автомобилей или тракторов ознакомьтесь с устройством и принципом действия магнето или другой системы зажигания.

10.5. Ознакомьтесь с работой велосипедного генератора, питающего переднюю фару велосипеда. Выясните, как влияет скорость вращения колеса велосипеда на яркость горения лампы, и объясните это явление.

10.6. Ознакомьтесь с техническим описанием радиоприемника, телевизора или магнитофона. Найдите на схеме трансформаторы и разберитесь, какие функции они выполняют.

10.7. Катушка из медного провода (катушка самодельного гальванометра) колеблется между полюсами постоянного подковообразного магнита. Как будут отличаться колебания катушки при разомкнутых и закороченных ее концах?

Г Л А В А 11. ПОЛУПРОВОДНИКИ. ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ПРИБОРЫ

§ 11.1. ОСНОВНЫЕ СВОЙСТВА ПОЛУПРОВОДНИКОВ

I. До сих пор, изучая электромагнитные явления, мы имели дело только с *проводниками* — веществами, хорошо проводящими электрический ток, и *изоляторами* — веществами, не проводящими электрический ток. Однако в природе много таких веществ, которые при одних внешних условиях являются изоляторами, а при других внешних условиях — проводниками. Так, например, кремний в темноте не проводит электрический ток, а при освещении — проводит. Но тем не менее у таких веществ удельное сопротивление остается больше, чем у металлов.

Вещества, удельное сопротивление которых очень сильно зависит от внешних условий (нагревания, освещения), назвали полупроводниками.

Полупроводники и изготовленные из них приборы весьма широко используются в современной технике.

II. *Удельное сопротивление полупроводников зависит от их температуры.* Чтобы убедиться в этом, собирают установку, состоящую из источника тока, гальванометра, небольшого цилиндрика из полупроводникового материала и ключа. Ключ замыкают и видят: стрелка гальванометра едва отошла от нулевого деления. Это говорит о том, что сопротивление полупроводника велико.

Подносят к полупроводнику горящую спичку. Стрелка

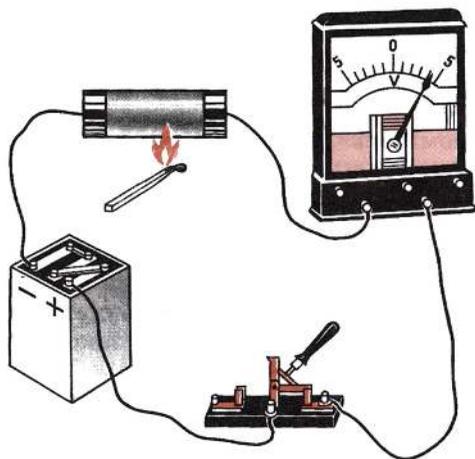


Рис. 11.1

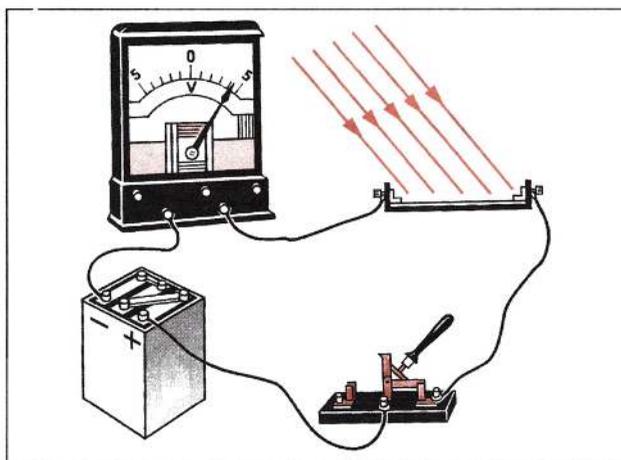


Рис. 11.2

гальванометра резко отклоняется и доходит до конца шкалы (рис. 11.1). Этот опыт говорит о том, что *сопротивление полупроводника*, а следовательно, и его *удельное сопротивление уменьшается при повышении температуры*.

Убрав спичку, замечают: стрелка гальванометра медленно, как бы нехотя, возвращается в первоначальное состояние; полупроводник остывает, его сопротивление растёт.

Зависимость удельного сопротивления полупроводников от температуры использована в специальных приборах — *терморезисторах* (термисторах), которые применяются в качестве датчиков в устройствах, измеряющих температуру электрическими методами. Они используются также в качестве датчиков в термореле и в автоматических устройствах, реагирующих на изменения температуры (например, в сигнализаторах пожара).

III. Удельное сопротивление полупроводников зависит от освещения. Чтобы убедиться в этом, помещают пластинку из полупроводникового вещества в темный, непрозрачный для света сосуд, а выводы, припаянные к этой пластинке, оставляют снаружи. Собирают такую же цепь, как и в предыдущем опыте, но вместо терморезистора включают полупроводниковую пластинку. Цепь замыкают и обнаруживают, что стрелка гальванометра почти не отходит от нулевого деления. Это говорит о большом сопротивлении вещества, из которого сделана пластинка. Осветив пластинку, видят, что стрелка гальванометра отходит к краю шкалы (рис. 11.2).

Опыт свидетельствует о том, что удельное сопротивление полупроводников зависит от того, как полупроводник освещают.

щен. Это свойство полупроводников использовано в *фоторезисторах*, которые применяются в фотореле и устройствах автоматики, реагирующих на изменение освещения. Они также используются в фотоэкспонетрах — приборах, позволяющих определить экспозицию (выдержку) при фотографировании.

Вопросы для самопроверки

1. Чем полупроводники отличаются от проводников и изоляторов?
2. Где применяются терморезисторы? Какой опыт с терморезистором вы можете описать?
3. В чем заключается действие фоторезистора? Где он применяется?

§ 11.2. ЭЛЕКТРОНЫ ПРОВДИМОСТИ И ДЫРКИ

I. Очевидно, что зависимость сопротивления полупроводников от освещения и нагревания связана с внутренним строением этих материалов.

Наиболее широко в технике используются такие материалы, как германий Ge и кремний Si. Напомним строение кристаллов этих веществ (см. § 2.7—2.8). В кристаллах германия, а также кремния атомы располагаются так, как показано на рисунке 11.3,а. Каждый из атомов германия окружен четырьмя другими атомами, с которыми он связан ковалентными связями (см. главу 2); свободных электронов в кристалле нет. Схема кристалла с ковалентными электрон-

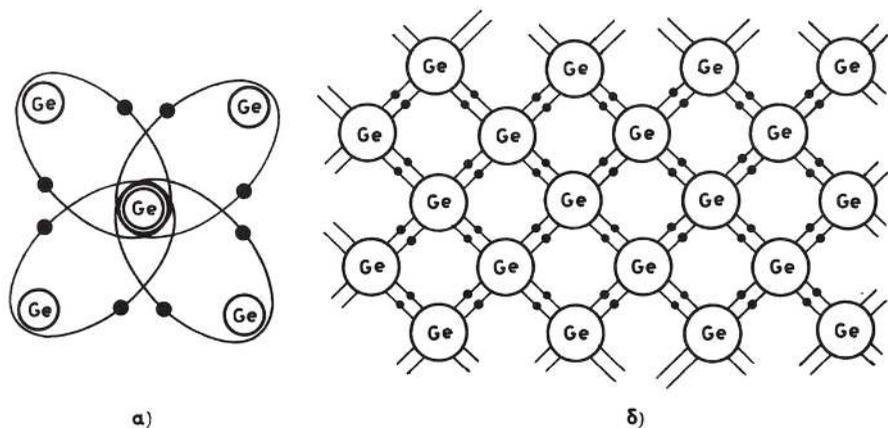


Рис. 11.3

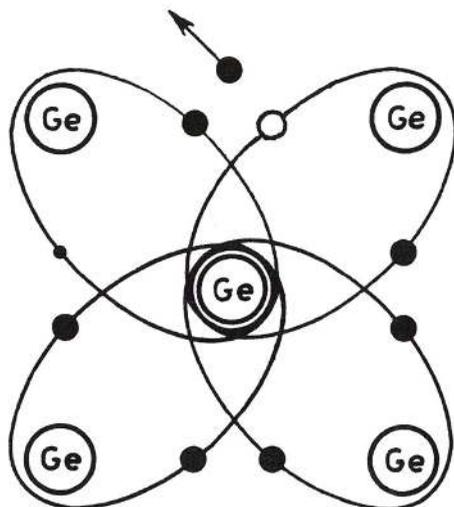


Рис. 11.4

ными связями при очень низких температурах показана на рисунке 11.3,б.

II. При нагревании или освещении кристалла некоторые электроны приобретают избыточную энергию и становятся свободными электронами. На рисунке 11.4 показан только один свободный электрон, но атомов в кристалле очень много, поэтому при нагревании или освещении кристалла в нем появляется много свободных электронов, следовательно, возрастает его электрическая проводимость.

Чем сильнее нагревается или освещается полупроводник, тем больше в нем появляется свободных электронов и тем больше становится его электрическая проводимость, т. е. уменьшается сопротивление полупроводника.

III. Освободившийся электрон уходит со своего места, которое находилось в системе связей между атомами. В этом месте образуется вакансия, т. е. незаполненная электронная связь, называемая дыркой (см. рис. 11.4). Число таких дырок тем больше, чем больше свободных электронов появится в кристалле в результате его нагревания или освещения. Следовательно, число дырок в кристалле полупроводника, как и число свободных электронов, зависит от внешнего воздействия на кристалл.

Дырка ведет себя как положительный заряд. Дело в том, что недостаток отрицательного заряда в системе электронной связи равносителен присутствию в этом месте положительного заряда. Заряд дырки равен по модулю заряду электрона.

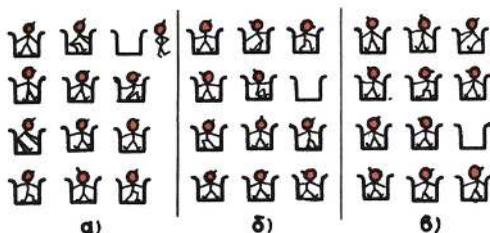


Рис. 11.5

Самое удивительное заключается в том, что дырка может двигаться по кристаллу подобно свободному электрону. Чтобы это понять, оставим на время кристалл и мысленно перейдем в зрительный зал театра. Допустим, что один из зрителей по какой-то причине вынужден был уйти (рис. 11.5,а). После его ухода осталось свободное кресло — своеобразная дырка. Представим, что на его место пересел зритель из второго ряда. Теперь пустое кресло будет уже во втором ряду (рис. 11.5,б). Допустим, что свободное место во втором ряду займет зритель из третьего ряда, тогда пустое место перейдет из второго ряда в третий (рис. 11.5,в) и т. д. Дырка (пустое кресло) как бы движется по залу.

Аналогично перемещается по кристаллу с места на место положительная вакансия в электронной связи — дырка.

IV. *Свободные электроны и дырки движутся в кристалле полупроводника хаотично, но характер их движения существенно изменится, если к кристаллу приложить напряжение.* Электрическое поле упорядочит движение как свободных электронов, так и дырок. Дырки под действием электрического поля станут двигаться к отрицательному полюсу источника — катоду, а свободные электроны к положительному полюсу — аноду. В кристалле полупроводника возникнет электрический ток.

Вопросы для самопроверки

1. Как связаны атомы в полупроводниковом кристалле германия или кремния?
2. Есть ли в полупроводниковом кристалле при низкой температуре свободные электроны; дырки?
3. За счет чего появляются электроны проводимости и дырки?
4. Что такое дырка? Как она появляется? Почему у дырки положительный заряд? Чему он равен?
5. Чем отличается электрический ток в полупроводниках от электрического тока в металлах?

§ 11.3. СОБСТВЕННАЯ И ПРИМЕСНАЯ ПРОВОДИМОСТЬ ПОЛУПРОВОДНИКОВ

I. Описанная в предыдущем параграфе *проводимость чистых полупроводников, возникающая при их нагревании или освещении, называется собственной проводимостью*. Она используется в терморезисторах и фоторезисторах, о чем говорилось в предыдущем параграфе.

Однако возможен еще один тип проводимости в полупроводниках. Ее можно обеспечить примесями, внедряемыми в полупроводник. Проводимость полупроводников, вызванная электронами примесных атомов, называется *примесной проводимостью*. Причем надо сказать, что различают электронную примесную проводимость и дырочную примесную проводимость, особенности которых мы разберем.

II. Электронная примесная проводимость возникнет, если заменить некоторые атомы германия или кремния атомами другого вещества, но с пятью валентными электронами, например мышьяка As или сурьмы Sb (рис. 11.6). Тогда четыре электрона сурьмы пойдут на ковалентные связи с соседними атомами, а пятый электрон окажется слабо связанным с атомом и легко может стать свободным. В одном кубическом сантиметре вещества содержится около 10^{22} атомов. Замена одного атома германия из миллиона на атом сурьмы (или мышьяка) приведет к тому, что в каждом кубическом сантиметре полупроводника появится около 10^{16} свободных электронов, что и создаст возможность полупроводнику проводить электрический ток.

Итак, за счет внедрения в германий или кремний атомов пентавалентного вещества мы получаем полупроводники с примесной электронной проводимостью. Их называют полупроводниками *n*-типа (от латинского слова *negativus* — отрицательный).

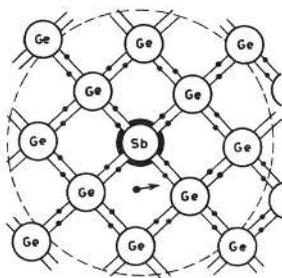


Рис. 11.6

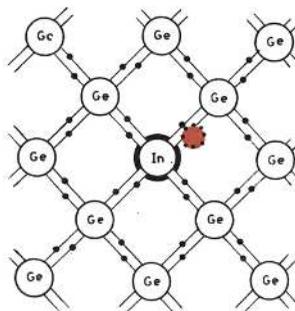


Рис. 11.7

III. *Дырочная примесная проводимость* возникает, если в полупроводниковом кристалле заменить некоторые атомы другими атомами, содержащими три валентных электрона, например атомами индия In. В этом случае на образование ковалентной связи с соседними атомами у примесного атома не хватает одного электрона (рис. 11.7). По этой причине в том месте, куда внедрился атом примеси, образуется дырка, т. е. одного электрона недостает. При замене одного из миллиона атомов основного вещества на атом трехвалентной примеси в каждом кубическом сантиметре полупроводника образуется примерно 10^{16} дырок. Такой полупроводниковый кристалл обеспечит электрический ток благодаря дрейфу дырок, которые переносят положительный электрический заряд.

Таким образом, за счет внедрения в германий или кремний атомов трехвалентного вещества мы получаем полупроводники с примесной дырочной проводимостью. Их называют полупроводниками *p*-типа (от латинского слова *positivus* — положительный).

IV. Говоря о принципе получения полупроводниковых кристаллов с электронной и дырочной проводимостью, нужно заметить, что технически это сложная проблема, и в том, что ее удалось решить, огромная заслуга ученых-химиков, научившихся получать очень чистые кристаллы германия и кремния и вводить в них дозированные примеси.

Вопросы для самопроверки

1. За счет чего возникает собственная проводимость полупроводников?
2. За счет чего возникает примесная проводимость полупроводников?
3. Равно ли число электронов проводимости и дырок при собственной проводимости; при примесной проводимости?
4. Как получить полупроводник с электронной примесной проводимостью? Откуда берутся свободные электроны?
5. Как получить полупроводник с дырочной примесной проводимостью? За счет чего здесь возникают дырки?
6. В кристалле германия 0,01% атомов заменили атомами таллия Tl. Какой тип проводимости при этом возник? Как он обозначается?
7. В кристалле кремния 0,02% атомов заменили атомами висмута Bi. Какой тип проводимости при этом возник? Как он обозначается?

§ 11.4. ЭЛЕКТРОННО-ДЫРОЧНЫЙ ПЕРЕХОД

I. Электронно-дырочный переход (сокращенно $n-p$ -переход) является основным элементом большинства полупроводниковых приборов. Он образуется в полупроводниковом кристалле, в котором имеется контакт между областью с электронной проводимостью и областью с дырочной проводимостью. *Электронно-дырочный переход и образуется на границе этих областей.*

Существует несколько способов изготовления полупроводниковых кристаллов с электронно-дырочным переходом. Один из них заключается в том, что на пластинку германия или кремния 1 кладут небольшую таблетку индия 2 (рис. 11.8); кристалл помещают в электрическую печь, из которой выкачан воздух (вакуумная печь). При плавлении таблетки индия она растекается по пластинке и атомы индия диффундируют в основное вещество (германий или кремний). В результате образуется область 3 с дырочной проводимостью. Напомним, что основной кристалл обладает электронной проводимостью. Между областями с электронной n - и дырочной p -проводимостями образуется так называемый $p-n$ -переход 4. Этот сложный и тонкий процесс произво-

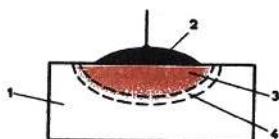
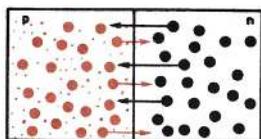
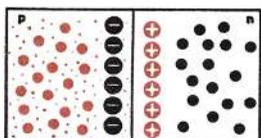


Рис. 11.8

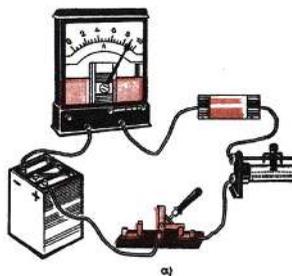


а)

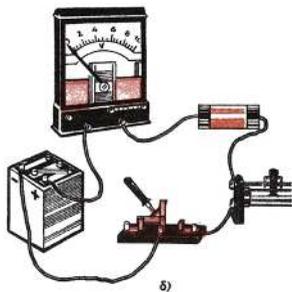


б)

Рис. 11.9



а)



б)

Рис. 11.10

дится в вакууме для того, чтобы не произошло окисление индия и полупроводниковой пластинки.

II. Рассмотрим явления, происходящие в кристалле с $p-n$ -переходом (рис. 11.9, а, б).

В отсутствие электрического поля свободные электроны и дырки хаотично движутся по кристаллу. В результате такого движения свободные электроны могут сами по себе перейти через $p-n$ -переход в дырочную область, а дырки — в электронную. Посмотрим, что при этом произойдет.

Электроны, переходя из области n в область p , уносят с собой свой отрицательный заряд из области n . Следовательно, в кристалле область n после ухода электронов зарядится положительно, а область p — наоборот, зарядится отрицательно, так как электроны принесут ей свой отрицательный заряд.

Не остаются в долгу и дырки. Диффундируя в электронную область, они несут ей свой положительный заряд, а в дырочной области в результате их ухода возрастает отрицательный заряд.

Таким образом, в результате диффузии электронов в дырочную область и дырок — в электронную пограничная область кристалла электризуется. На границе между областями возникает электрическое поле, получившее название поля электронно-дырочного перехода, которое начинает противодействовать дальнейшей диффузии зарядов, т. е. дырок и свободных электронов. Такое поле часто называют запирающим полем.

III. Опыты свидетельствуют о том, что полупроводниковый кристалл с $p-n$ -переходом обладает односторонней проводимостью. Рассмотрим электрическую цепь рисунка 11.10, а, состоящую из источника тока, полупроводникового кристалла с $p-n$ -переходом, реостата, гальванометра и ключа. Когда эту цепь замыкают, то по ней идет электрический ток. Затем меняют местами концы проводов, подходящих к источнику и, снова замкнув цепь, видят: тока в цепи нет (рис. 11.10, б).

Чтобы объяснить, почему в первом случае ток возникает, а во втором — тока нет, надо знать, что происходит внутри кристалла.

Если диод включить в цепь так, чтобы полупроводник n -типа был соединен с отрицательным полюсом источника тока, полупроводник p -типа — с положительным полюсом того же источника, то электрическое поле этого источника тока ослабляет запирающее поле $p-n$ -перехода. В результате дырки и электроны свободно переходят из одной области в другую и по цепи проходит электрический ток. Если же изменить полярность, то электрическое поле источника тока усилит запирающее поле электронно-дырочного пере-

хода, что препятствует диффузии электронов и дырок через $p-n$ -переход. Ток в цепи прекращается.

Таким образом, полупроводниковый кристалл с электронно-дырочным переходом обладает *односторонней проводимостью*.

Вопросы для самопроверки

1. Как можно изготовить кристалл с электронно-дырочным переходом?
2. Что собой представляет электронно-дырочный переход? За счет какого процесса он образуется?
3. Почему кристалл полупроводника с $p-n$ -переходом обладает односторонней проводимостью?

§ 11.5. ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЙ ДИОД И ЕГО ПРИМЕНЕНИЕ

I. *Полупроводниковым диодом* называют устройство, содержащее полупроводниковый кристалл с электронно-дырочным переходом. Такой диод имеет два вывода для включения в цепь.

На рисунке 11.11,а показан разрез полупроводникового диода. Его основными частями являются: полупроводниковый кристалл 1 с $p-n$ -переходом, выводы от кристалла 2, кожух 3 и радиатор для отвода тепла 4. *Основное свойство диода заключается в его односторонней проводимости*. Обозначение полупроводникового диода на электрических схемах показано на рисунке 11.11,б.

II. Полупроводниковые диоды наиболее часто применяются для выпрямления переменного тока. В радиоприемниках и телевизорах используются диоды разных типов. Мощные диоды служат для выпрямления переменного тока городской сети, а маломощные — для выпрямления принятых антенной радио- и телесигналов.

III. На практике широкое применение получили *полупроводниковые фотоэлементы* и *солнечные батареи* в качестве источников тока.

Если в кристаллическом полупроводнике создать $p-n$ -переход и осветить его, то число свободных носителей заряда — электронов и дырок будет увеличиваться. Однако из-за односторонней проводимости $p-n$ -перехода электронный и дырочный токи, текущие в противоположных направлениях, оказываются различными. Вследствие этого на $p-n$ -переходе создается напряжение, а если цепь замкнуть, то в ней потечет ток.

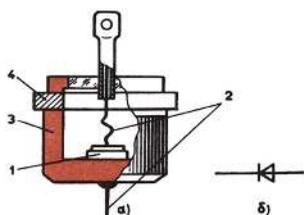


Рис. 11.11

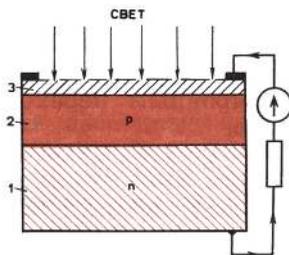


Рис. 11.12

В качестве примера (рис. 11.12) рассмотрим *вентильный фотоэлемент*, изготовленный из металла 1 (например, меди), его окиси 2 и напыленного сверху прозрачного тонкого золотого слоя 3. На границе между металлом и его окисью возникает $p-n$ -переход, пропускающий электроны из металла в окись, а дырки — из окиси в металл. Под действием света число электронов и дырок возрастает и во внешней цепи через резистор появляется ток, который течет в указанном на рисунке направлении.

Мы видим, что *вентильный фотоэлемент* является источником тока, который превращает энергию света в электрическую. Множество вентильных фотоэлементов, соединенных в батарею, образуют *солнечные батареи*, которые служат электрическими генераторами для космических кораблей. Последнее время стали строить автомобили, двигатели которых питаются от солнечных батарей; разрабатываются проекты экологически чистых электростанций.

Опыт показывает, что сила тока вентильных фотоэлементов зависит от их освещенности: с увеличением освещенности сила тока возрастает. Это позволяет использовать фотоэлементы данного типа в качестве датчиков — реагирующих элементов в автоматических устройствах, работающих под действием света, а также в качестве фотоэкспонетров в фотоаппаратах.

Вопросы для самопроверки

1. Что такое полупроводниковый диод? Каковы его свойства?
2. Для каких целей применяется полупроводниковый диод?
3. Почему магнитоэлектрические приборы непригодны для измерений в цепях переменного тока? Подумайте, как с помощью полупроводникового диода сделать магнитоэлектрический прибор пригодным для измерения напряжения и силы переменного тока. Нарисуйте схему.
4. Что собой представляет солнечная батарея? Где такие устройства используются?

§ 11.6. ПОЛЕВОЙ ТРАНЗИСТОР И ЕГО ПРИМЕНЕНИЕ

I. *Транзистором* называют полупроводниковый прибор, предназначенный для усиления и генерации сигналов. Такой транзистор имеет для включения в цепь три электрода. При этом ток, протекающий между двумя электродами, зависит от напряжения на третьем электроде.

Существует большое число транзисторов различных конструкций. Мы остановимся на *полевых (униполярных) транзисторах* с одним $p-n$ -переходом. Они существуют в большом количестве различных модификаций, но принцип работы у всех одинаковый.

II. Наиболее простой полевой транзистор представляет собой стерженек или пластинку из полупроводникового кристалла. К его концам привариваются электроды для включения в цепь. Один из электродов назвали *истоком* (И), другой — *стоком* (С). На транзисторе имеется область из полупроводника с другим типом проводимости, за счет чего возникает электронно-дырочный $p-n$ -переход. На рисунке 11.13 показан схематически разрез этого транзистора. Вывод от кольцевого $p-n$ -перехода приварен к третьему электроду, названному *затвором* (З). Он регулирует силу тока, протекающего от истока к стоку. Область полупроводника внутри кольцевого электронно-дырочного перехода назвали *каналом* (К).

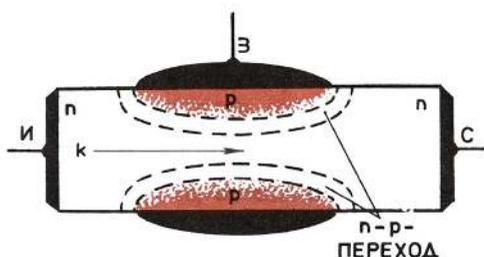


Рис. 11.13

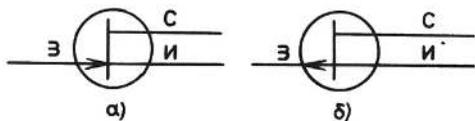


Рис. 11.14

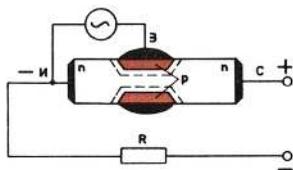


Рис. 11.15

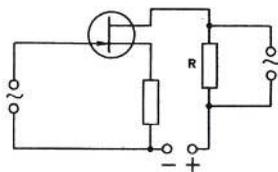
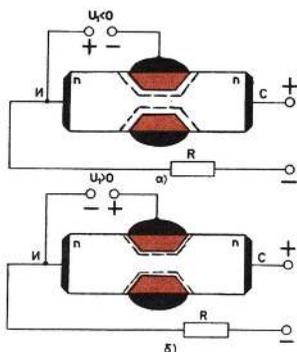


Рис. 11.17

← Рис. 11.16

На схемах полевой транзистор изображают так, как это показано на рисунке 11.14, а, б. На рисунке 11.14, а изображен схематически полевой транзистор с управляющим $p-n$ -переходом, в котором канал имеет электронную проводимость, а на рисунке 11.14, б — канал с дырочной проводимостью.

Схема включения транзистора, изготовленного из *электронного полупроводника*, изображена на рисунке 11.15. Для включения в цепь транзистора, изготовленного из *дырочного полупроводника*, нужно изменить полярность истока и стока. Итак, в случае электронного канала исток подключается к отрицательному полюсу источника, а в случае дырочного — к положительному. В цепь затвор — исток включается управляющее напряжение.

III. Сила тока через транзистор при постоянном напряжении источника зависит (согласно закону Ома) только от сопротивления канала, а оно зависит от площади его поперечного сечения.

Оказывается, что поперечное сечение канала не постоянно, а зависит от управляющего напряжения, приложенного к электронно-дырочному переходу, т. е. к участку затвор — исток. Дело в том, что ширина электронно-дырочного перехода зависит от того, какое управляющее напряжение приложено к этому участку ($U_1 > 0$ или $U_1 < 0$). Пусть канал обладает электронной проводимостью, исток присоединен к аноду, а затвор — к катоду батареи U_1 (рис. 11.16, а). Тогда электроны будут отталкиваться от катода, а дырки — притягиваться к нему. В результате область, занимаемая электронно-дырочным переходом, увеличивается, а поперечное сечение канала уменьшается. Соответственно уменьшается и сила тока, протекающего через транзистор и нагрузочный резистор R . Здесь уместна аналогия с водопроводным краном: закрывая кран, мы уменьшаем поперечное сечение отверстия, через которое вода может проходить, и поток ослабевает.

Если же затвор присоединить к аноду, а исток — к катоду батареи U_1 , то начнется рекомбинация электронов и дырок и область, занимаемая электронно-дырочным переходом, уменьшится, а поперечное сечение канала увеличится (рис. 11.16, б). Как следствие, увеличится сила тока, идущего через транзистор и нагрузочный резистор. Таким образом, незначительно изменяя напряжение на участке затвор — исток, можно в значительных пределах менять силу тока, протекающего через транзистор. Это основное и очень важное свойство полевого транзистора. Оно находит широкое применение в технике.

IV. Полевой транзистор используется в качестве усилителя электрических сигналов. Для этого напряжение сигнала, который хотят усилить, подают в цепь затвор — исток, а уже усиленный сигнал получают в цепи исток — сток (рис. 11.17). Этот сигнал снимают с нагрузочного резистора R .

Вопросы для самопроверки

1. Как выглядит схема устройства полевого транзистора с электронным каналом? Обозначьте его основные электроды.
2. Как выглядит схема устройства полевого транзистора с дырочным каналом? Назовите его основные электроды.
3. Как выглядят условные изображения полевых транзисторов?
4. Каков принцип работы полевого транзистора?
5. Для каких целей используется полевой транзистор? Нарисуйте схему усилителя.

ДОМАШНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ЗАДАНИЯ

11.1. Ознакомьтесь с фотоэкспонетром. Обратите внимание, как меняются его показания при изменении освещенности.

11.2. Самодельный гальванометр (см. задание 9.8) присоедините к полюсам гальванического элемента (например, батарейки) через полупроводниковый диод. Затем поменяйте полюса на противоположные. Что при этом вы наблюдали? Объясните явление.

11.3. Как убедиться в том, что полупроводниковый диод исправен? Проведите опыт с исправным и неисправным диодами.

11.4. Концы самодельного гальванометра присоедините к клеммам велосипедного генератора. Будет ли отклоняться стрелка компаса при быстром вращении колеса велосипеда? Включите последовательно с гальванометром полупроводни-

ковый диод. Будет ли сейчас отклоняться стрелка магнита при вращении колеса?

11.5. В техническом описании радиоприемника, телевизора или магнитофона найдите на схеме полупроводниковые диоды и транзисторы. Попробуйте по схеме выяснить их функции.

ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ

Работа № 1.

Измерение силы взаимодействия между наэлектризованными телами

Прямое измерение силы взаимодействия между электрически заряженными телами связано со значительными трудностями и требует достаточно чувствительных приборов. В данной работе используется косвенный метод измерения силы взаимодействия между заряженными телами, т. е. сравнение этой силы с силой тяжести.

Пусть два шарика, висящие на длинных нитях, несут на себе одноименные электрические заряды. Между ними действуют силы отталкивания (рис. Л.1, а). На каждый шарик действуют три силы: электрическая F , сила тяжести $P = mg$ и сила натяжения нити T . Под действием этих сил нить с шариком отклоняется на такой угол α от вертикали, при котором момент силы тяжести относительно точки подвеса

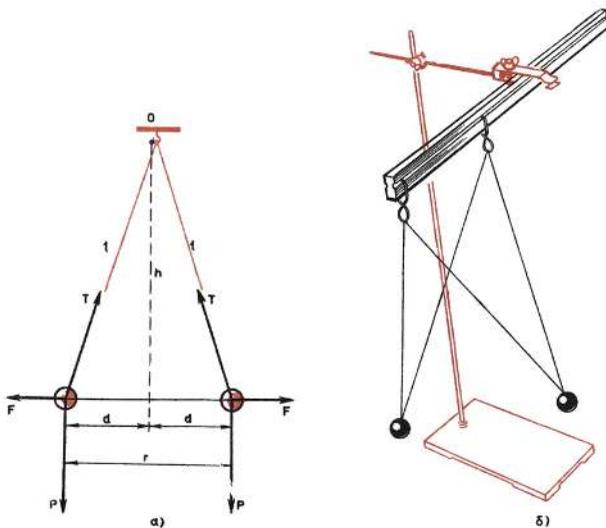


Рис. Л.1

$M_1 = Pd = mgd$ окажется равным моменту электрической силы $M_2 = Fh$. Условие равновесия запишется так:

$$mgd = Fh. \quad (1)$$

Отсюда легко найти электрическую силу взаимодействия между заряженными телами.

Приборы и материалы: весы с разновесом; линейка; мерная лента; две нити длиной около 1,5 м каждая; два кусочка фольги (от конфет); палочка из эбонита, плексигласа или стекла; кусок шелковой или шерстяной ткани (или газета); рычаг (линейка с серьгами); штатив; лапка штатива.

У к а з а н и е. Скатайте из кусочков фольги шарики. Измерьте их массу на весах.

Задание 1. Измерение электрической силы

1. Соберите установку, используя штатив и лабораторный рычаг (рис. Л.1,б). Измерьте длину подвеса мерной лентой. Шарики должны касаться друг друга.

Наэлектризуйте трением плексигласовую (или эбонитовую) палочку. Коснитесь ею шариков: они разойдутся.

2. Измерьте расстояние $r = 2d$ между наэлектризованными шариками с помощью линейки (не касаясь их). Результаты измерений занесите в таблицу.

Масса шарика m , мг	Длина подвеса l , м	Расстояние между шариками r , мм	Сила $F_{\text{эл}}$, Н	Заряд q , Кл

3. Поскольку измерение расстояния между шариками производится с погрешностью 2—3%, то вместо плеча h электрической силы можно с такой же погрешностью подставить в формулу (1) длину нити l , которую измерить гораздо легче. Получим расчетную формулу для электрической силы:

$$F_{\text{эл}} = mgd/l. \quad (2)$$

4. Учтите, что в этой формуле все величины следует выразить в единицах СИ.

Задание 2. Определение электрического заряда на шариках

1. Поскольку шарики из фольги имеют одинаковые размеры и в процессе электризации касались друг друга, то они заряжены одинаково и их заряды равны: $q_1 = q_2 = q$. Размеры шариков много меньше расстояния между ними, вследствие чего заряды можно считать точечными. Это позволяет с помощью закона Кулона определить значение электрического заряда на каждом из шариков.

2. Пользуясь законом Кулона и значением силы, которую вы нашли по формуле (2), вычислите значение электрического заряда.

Работа № 2.

Изучение кристаллических решеток некоторых веществ на моделях

Современные методы исследования структуры вещества показали, что кристаллические решетки ряда твердых тел, например металлов, ионных кристаллов типа хлорида натрия (поваренная соль) и др., имеют структуру типа плотно упакованных шаров одинаковых или разных размеров. Это позволяет исследовать данные структуры с помощью простых моделей.

В данной работе вы на моделях познакомитесь с двумя кристаллическими структурами: гексагональной и гранецентрированной кубическими решетками.

Приборы и материалы: шарики одинакового диаметра (не менее 50 штук); коробка из плексигласа в форме куба, сторона которого в 4 раза больше диаметра шарика; коробка из плексигласа в форме правильной шестигранной призмы, у которой сторона основания в 2,7 раза больше диаметра шарика; линейка; мензурка.

Задание 1. Изучение структуры гексагональной решетки

По типу гексагональной упаковки расположены ионы в кристаллической решетке таких металлов, как магний, цинк, кадмий. Пространственная решетка такого типа показана на рисунке Л.2. Расположение центров ионов (или атомов) в пространстве показано на рисунке Л.3. Элементарная ячейка кристалла имеет форму призмы, в основании которой правильный шестиугольник.

Цель работы. Построить из шаров модель указанной решетки и исследовать ее.

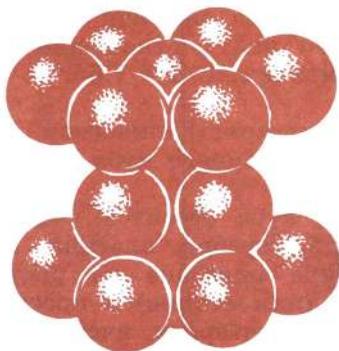


Рис. Л.2

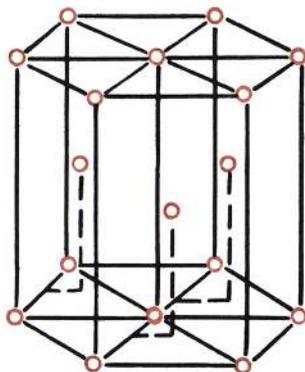


Рис. Л.3

Ход работы. 1) На дно шестигранной призмы уложите шарики в один слой так, чтобы они касались друг друга (рис. Л.4). Обозначьте этот слой буквой *A*.

2) В углубления между шарами первого слоя уложите шарики так, чтобы они касались друг друга (на рисунке Л.4 они показаны пунктиром). Получите второй слой *B*, повернутый относительно первого слоя на 60° .

3) На слой *B* в углубления между шарами уложите третий слой шаров так, чтобы эти шарики находились точно против шариков слоя *A*.

4) Заполните шарами всю шестигранную коробку, соблюдая расположение шаров в слоях по принципу *ABABAB...* Вы получите плотнейшую гексагональную упаковку, изображенную на рисунке Л.2.

5) Измерьте диаметр d шарика.

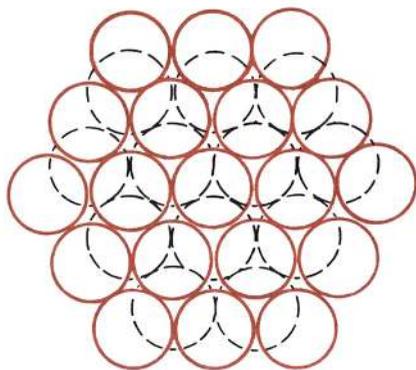


Рис. Л.4

б) Измерьте расстояние C между слоями. Поскольку расстояние между центрами шаров при их плотной упаковке равно диаметру шара d , то можно найти отношение C/d . Сравните его с теоретическим значением: $C/d = 1,63$.

Задание 2. Изучение структуры кристаллической решетки типа гранцентрированного куба

По типу гранцентрированного куба строится упаковка ионов в таких металлах, как медь, серебро, платина. Пространственная решетка такого типа показана на рисунке Л.5. Расположение центров ионов (или атомов) в пространстве показано на рисунке Л.6. Элементарная ячейка кристалла имеет форму куба, в котором частицы (ионы, атомы) расположены в вершинах куба и в центрах граней, что нашло отражение в названии решетки — гранцентрированный куб.

Цель работы. Построить из шаров модель указанной решетки и исследовать ее.

Ход работы. 1) Уложите в шестигранной коробке два слоя шаров, как в первом задании (слой A и B).

2) На слой B в углубления между шариками наложите третий слой шаров так, чтобы эти шарики находились против незаштрихованных лунок первого слоя (см. рис. Л.4). Как видно, этот слой не повторяет ни слой A , ни слой B . Назовите его слой C .

3) Заполните шарами всю коробку, соблюдая расположение слоев по принципу $ABCABCABC...$

4) Чтобы выяснить характер новой упаковки, вытащите шары из шестигульной коробки и уложите их послойно в кубической коробке, как показано на рисунке Л.7. Вы по-



Рис. Л.5

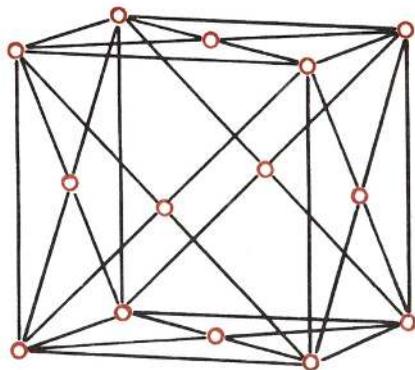


Рис. Л.6

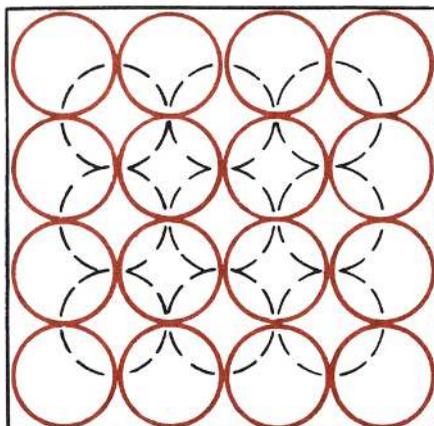


Рис. Л.7

лучите плотнейшую упаковку в виде гранецентрированного куба, изображенную на рисунке Л.5.

5) Определите отношение C/d и сравните его с теоретическим значением: $C/d = 1,63$.

Задание 3. Определение степени заполнения частиц в кристалле

Важнейшей характеристикой кристаллической решетки является ее *степень заполнения*: отношение суммарного объема частиц (ионов, атомов), из которых построена решетка, к объему кристалла. Степень заполнения показывает, какая часть объема кристалла заполнена частицами.

Для плотнейшей гексагональной решетки и для гранецентрированного куба характерна одна и та же степень заполнения: 74,05%.

Ход работы. 1) Определите объем одного шарика V_0 либо с помощью мензурки, либо по его диаметру: $V_0 = 0,5236d^3 = d^3/1,91$.

2) Подсчитайте число N шариков в призматической коробке.

3) Определите объем шестигранной призмы по формуле $V = SH = 3bhH$, где b — ребро основания (сторона шестиугольника), h — расстояние от центра основания призмы до ребра, H — высота призмы (рис. Л.8 и см. рис. Л.3).

4) Вычислите степень заполнения, найдя отношение NV_0/V . Сравните его с теоретическим значением 0,74.

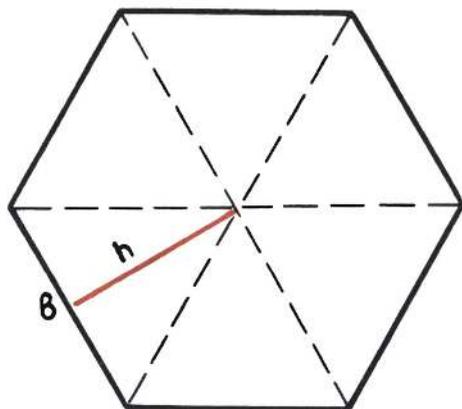


Рис. Л.8

5) Тот же эксперимент и расчет произведите с гранецентрированным кубом.

Работа № 3.

Градуировка термометра и измерение температуры

Процесс градуировки необходим при изготовлении любого измерительного прибора. При этом данную физическую величину одновременно измеряют образцовым прибором и градуируемым, т. е. рабочим прибором. В данной работе в качестве образцового используется термометр для лабораторных работ, а в качестве рабочего — комнатный термометр с закрытой шкалой.

Приборы и материалы: термометр для лабораторных работ; комнатный термометр с закрытой шкалой; сосуд с горячей водой; линейка с миллиметровыми делениями.

Задание 1. Градуировка комнатного термометра

Ход работы. 1) С помощью лабораторного термометра убедитесь в том, что температура воды в сосуде не превышает 40°C . Опустите в воду комнатный термометр. На бумажной полоске, закрывающей шкалу рабочего термометра, сделайте отметку, соответствующую температуре примерно 40°C . Сверьте это с эталонным термометром.

2) Не вынимая термометры, долейте в сосуд холодную воду так, чтобы температура смеси стала равна примерно 20°C . Сделайте на шкале вторую отметку.

3) Вынув термометры из воды, проградуируйте рабо-

чий прибор, изготовив шкалу с ценой деления, равной $1^\circ\text{C}/\text{дел}$.

4) Отметьте на изготовленной вами шкале деление, соответствующее 0°C .

5) Опустив рабочий прибор в тающий лед или снег, проверьте, правильно ли вы отметили положение 0°C . Найдите абсолютную погрешность рабочего прибора при этой температуре.

6) Измерьте температуру воздуха в комнате образцовым и рабочим термометрами. Сравните их показания и определите абсолютную погрешность рабочего прибора при комнатной температуре.

Работа № 4.

Изучение закона сохранения энергии при установлении теплового равновесия

При установлении теплового равновесия между двумя телами происходит уменьшение внутренней энергии остывающего тела и увеличение внутренней энергии тела, температура которого повышается. В работе необходимо проверить это положение, оценив соответствующие количества теплоты: передаваемое одним телом и получаемое другим.

Приборы и материалы: цилиндр измерительный; термометр; калориметр; чайник с горячей водой (один на весь класс); стакан.

Ход работы. 1) Налейте в стакан определенный объем холодной воды и измерьте ее температуру t_1 .

2) В калориметр налейте горячую воду и измерьте ее температуру t_2 .

3) Влейте в калориметр холодную воду. Определите температуру смеси t .

4) Измерьте объем смеси и вычислите объем горячей воды. Подсчитайте количество теплоты, которое отдала горячая вода, и количество теплоты, полученное холодной водой.

5) Относительную погрешность эксперимента оцените соотношением

$$\varepsilon = \left| \frac{Q_2 - Q_1}{Q_2} \right|,$$

где Q_1 — количество теплоты, полученное холодной водой, и Q_2 — количество теплоты, отданное горячей водой.

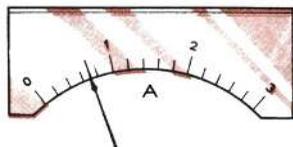


Рис. Л.9

Работа № 5. Измерения в электрических цепях

При прямых измерениях силы тока амперметром и напряжения вольтметром необходимо уметь верно включать электроизмерительные приборы и тщательно снимать их показания.

Необходимо помнить, что результат измерения включает в себя отсчет со шкалы прибора и абсолютную погрешность измерения.

Абсолютная погрешность прямого измерения равна сумме погрешности электроизмерительного прибора и погрешности отсчета.

Погрешность прибора определяется на заводе-изготовителе и вносится в паспорт прибора. Лабораторный амперметр АЛ-2,5 имеет основную погрешность $\Delta I_A = 0,05 \text{ A}$, вольтметр ВЛ-2,5 — погрешность $\Delta U_V = 0,15 \text{ В}$. Погрешность отсчета не превосходит половины цены деления шкалы. Тогда полная погрешность измерения, например силы тока амперметром, равна: $\Delta I = \Delta I_A + \Delta I_{\text{отсч}} = 0,05 \text{ A} + 0,05 \text{ A} = 0,1 \text{ A}$ (рис. Л.9). Следовательно, сила тока по показаниям прибора равна: $I = (0,7 \pm 0,1) \text{ A}$.

Качество измерений характеризуется относительной погрешностью, которая вычисляется в процентах:

$$\varepsilon = \Delta x/x,$$

где x — измеряемая величина.

Приборы и материалы: амперметр; вольтметр; миллиамперметр; источник тока; провода соединительные; ключ для замыкания цепи; резистор 4 Ом; реостат.

Задание 1. Измерение силы тока и напряжения

1. Соберите электрическую цепь в соответствии со схемой, изображенной на рисунке Л.10. Измерьте силу тока в резисторе и напряжение на нем. Результаты измерения запишите в таблицу.

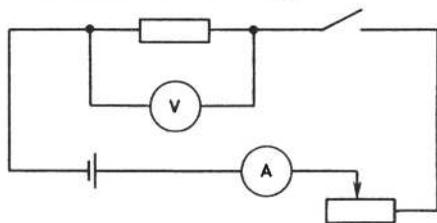


Рис. Л.10

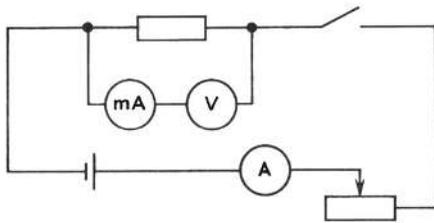


Рис. Л.11

Номер опыта	Сила тока I , А	Абсолютная погрешность ΔI , А	Напряжение U , В	Абсолютная погрешность ΔU , В
1				
2				

2. Определите относительные погрешности измерения силы тока и напряжения.

3. Измените положение движка реостата и снова измерьте новые значения силы тока и напряжения.

Задание 2. Измерение силы тока, протекающего через вольтметр

1. Принцип действия вольтметра основан на том, что через измерительный механизм этого прибора протекает небольшая часть электрического тока, проходящего в цепи. В этом можно убедиться, сравнив силу тока, который проходит через вольтметр, с силой тока в цепи.

2. Соберите цепь в соответствии со схемой, изображенной на рисунке Л.11. Ток, идущий через вольтметр, в сотни и тысячи раз меньше тока, протекающего через резистор, поэтому для его измерения необходимо воспользоваться миллиамперметром.

3. Сравните силу тока, протекающего через вольтметр, с силой тока, протекающего через резистор.

4. Проверьте, меняются ли показания амперметра при отключении вольтметра.

Работа № 6.

Изучение закона Ома для участка цепи

В соответствии с законом Ома сила тока через металлический проводник (резистор) прямо пропорциональна напряжению между его концами. При экспериментальном изучении зависимостей между величинами целесообразно пользоваться построением графиков.

При графической иллюстрации результат совместных измерений двух величин x и y изображается не просто точкой, а прямоугольниками, включающими погрешности измерений. Именно численные значения x_0, y_0 измеряемых величин являются координатами центра этого прямоугольника, а длина его сторон в 2 раза больше погрешности измерений (рис. Л.12).

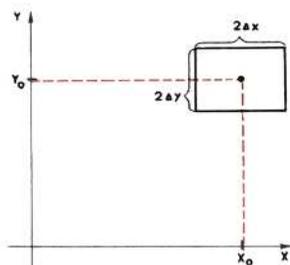


Рис. Л.12

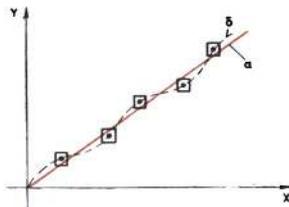


Рис. Л.13

Отсюда следует простое правило построения графика по точкам, координаты которых получены в результате эксперимента: линия проводится так, что одинаковое число точек оказываются по разные стороны от нее. На рисунке Л.13 график *a* построен верно, а график *b* построен неверно.

Приборы и материалы: амперметр; вольтметр; проволочный резистор 4 Ом; источник тока; соединительные проводники; ключ замыкания тока; реостат.

Задание 1. Построение графика зависимости силы тока от напряжения

1. Соберите электрическую цепь в соответствии со схемой, изображенной на рисунке Л.10.
2. Отрегулируйте силу тока в цепи с помощью реостата.
3. Проведите совместные измерения силы тока и напряжения при постепенном увеличении этих величин.
4. Результаты измерений занесите в таблицу.

Номер измерения	Сила тока I , А	Погрешность ΔI , А	Напряжение U , В	Погрешность ΔU , В
1				
2				
3				
4				

5. По результатам измерений постройте график зависимости силы тока от напряжения и сделайте вывод о характере этой функции.

Задание 2. Вычисление сопротивления резистора

При вычислении погрешности учесть, что относительная погрешность сопротивления равна сумме относительных погрешностей силы тока и напряжения:

$$\varepsilon_R = \varepsilon_I + \varepsilon_U,$$

или

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta I}{I} + \frac{\Delta U}{U}.$$

Работа № 7. Изучение взаимодействия постоянных магнитов

В работе необходимо выяснить, какова зависимость силы взаимодействия постоянных магнитов от расстояния между ними.

На рисунке Л.14,а изображен керамический магнит, находящийся в равновесии. Это происходит потому, что сила отталкивания компенсируется силой тяжести: $F = P = mg$.

Приборы и материалы: набор керамических магнитов; весы и набор гирь; линейка с миллиметровыми делениями; набор шайб из немагнитного материала (медь, алюминий).

Ход работы. 1) Измерьте массу керамического магнита и массы шайб.

2) Наденьте керамический магнит на стержень так, чтобы он оттолкнулся от магнита, лежащего на основании (рис. Л.14,б). Измерьте расстояние между осевыми линиями обоих магнитов. Внесите данные в таблицу.

3) Наденьте на верхний магнит одну, две, три шайбы, измеряя каждый раз расстояние между осевыми линиями магнитов. Данные занесите в таблицу (см. стр. 284).

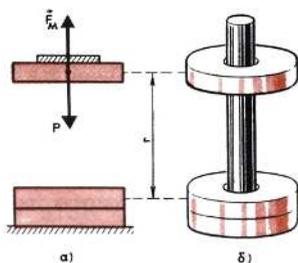


Рис. Л.14

	Масса m , кг	Сила отталкивания F , Н	Расстояние r , мм	$x = \frac{1}{r^3}$, м ⁻³
Один магнит				
Магнит с одной шайбой				
Магнит с двумя шайбами				
Магнит с тремя шайбами				

4) Постройте график зависимости силы взаимодействия между магнитами от расстояния между ними.

Работа № 8.

Наблюдение явления электромагнитной индукции

Как известно, индукционный ток в замкнутом проводнике (контуре) возникает при любых изменениях магнитного поля внутри контура. *Целью данной работы* является исследование разных случаев явления электромагнитной индукции.

Приборы и материалы: миллиамперметр; постоянный магнит; электромагнит разборный; соединительные провода; источник постоянного тока ВУ-4; реостат; ключ для размыкания цепи; штатив с держателем; амперметр.

Для обнаружения индукционного тока используется миллиамперметр на 5 мА с нулем посередине шкалы (рис. Л.15). Если клемма *A* присоединена к минусу источника тока, а клемма *B* — к плюсу, то стрелка гальванометра отклоняется вправо. При изменении полярности стрелка отклоняется влево. Это позволяет не только обнаружить наличие индукционного тока, но и определить его направление.

Задание 1. Получение индукционного тока с помощью постоянного магнита

1. Соберите цепь в соответствии с рисунком Л.15.
2. Вдвигая магнит внутрь катушки, определите направление индукционного тока. Выдвигая магнит из катушки, определите другое направление индукционного тока.
3. Проверьте, существует ли ток, если магнит покоится относительно катушки.

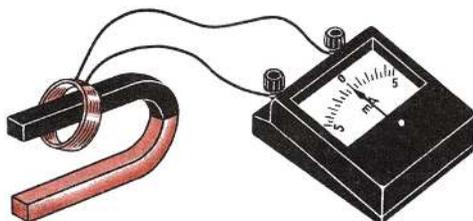


Рис. Л.15

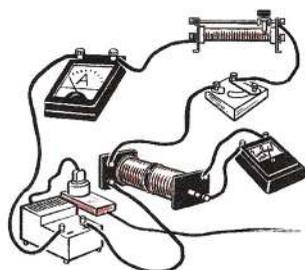


Рис. Л.16

4. Проверьте, как влияет скорость движения магнита на силу индукционного тока.

5. Закрепив неподвижно магнит в штативе, перемещайте катушку, надевая ее на сердечник магнита и снимая с него. Проверьте, возникает ли при этом индукционный ток и зависит ли его направление от направления движения катушки.

Задание 2. Получение индукционного тока при размыкании и замыкании цепи

1. Соберите цепь и проследите, возникает ли индукционный ток во второй катушке при включении и выключении тока в первой катушке (рис. Л.16). Определите его направление. Проверьте, есть ли индукционный ток во второй катушке, когда сила тока в первой катушке не меняется.

2. Размыкая цепь, проследите, возникает ли индукционный ток во второй катушке. Определите его направление и сравните с направлением тока при замыкании первичной цепи.

3. Замкнув цепь, меняйте силу тока в ней с помощью реостата. Проверьте, возникает ли при этом индукционный ток во второй катушке. Определите направление индукционного тока при возрастании и убывании силы тока в первой цепи.

Задание 3. Исследование влияния ферромагнитного сердечника на явление электромагнитной индукции

1. Соберите цепь в соответствии с рисунком Л.16. Проведите те же опыты, что и в задании 2, сначала при нали-

чи в катушках стального сердечника, а затем — при его отсутствии. Проверьте, как влияет наличие стального сердечника на силу индукционного тока во второй катушке.

2. Замените стальной сердечник деревянным, медным или алюминиевым. Определите, влияют ли они на силу индукционного тока.

Работа № 9.

Наблюдение взаимодействия постоянного магнита и катушки с током

Как известно, вокруг проводника с током существует магнитное поле, которое действует на другие проводники с током и на постоянные магниты. В данной работе исследуется воздействие катушки с током на постоянный магнит.

Приборы и материалы: источник постоянного тока ВУ-4; амперметр; катушка; реостат; проводники соединительные; ключ для замыкания цепи; магнит дугообразный; рычажная линейка; штатив; чашка от весов; набор гирь.

Задание 1. Исследование зависимости силы взаимодействия от направления тока в катушке

1. Соберите установку в соответствии с рисунком Л.17. С помощью гирь уравновесьте магнит так, чтобы линейка была горизонтальной.

2. Замкните цепь и определите, втягивается ли магнит в катушку или выталкивается из нее. Разомкните цепь и дайте системе уравновеситься.

3. Поменяйте провода на клеммах катушки, и тем самым вы измените направление тока в катушке. Замкните цепь и определите, как ведет себя магнит в этом случае.

4. Перевесьте магнит так, чтобы около катушки расположился противоположный полюс магнита. Проведите вновь оба опыта и обратите внимание на то, как ведет себя магнит в новом положении.

Задание 2. Измерение силы взаимодействия магнита и катушки с током

1. Соберите установку в соответствии с рисунком Л.17. Направление тока в катушке выберите такое, чтобы магнит втягивался в катушку.

2. Замкнув цепь, вы убедитесь,

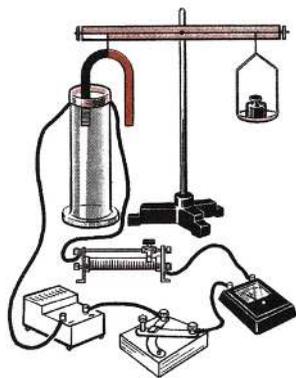


Рис. Л.17

что равновесие нарушается. Накладывая дополнительные гири на чашку весов, добейтесь равновесия, т. е. горизонтального расположения рычага-линейки.

3. Очевидно, что вес дополнительных гирь равен силе притяжения магнита к катушке:

$$F_{\text{магн}} = P_{\text{доп}} = gm_{\text{доп}},$$

где $m_{\text{доп}}$ — масса дополнительных гирь.

**Задание 3. Исследование зависимости
силы взаимодействия между магнитом и катушкой
от силы тока в катушке**

1. Используется та же установка, что и в задании 2. Изменяя с помощью реостата силу тока в катушке, регистрируйте каждый раз массу дополнительных гирь, уравновешивающих силу тяжести. Данные занесите в таблицу.

У к а з а н и е. Массу дополнительных гирь удобно записать по их маркировке, т. е. в граммах и миллиграммах. Но при расчете силы в единицах СИ массу следует выразить в килограммах.

Нет надобности использовать гири массой менее 200 мг, ибо это выходит за пределы точности измерений. Данные занесите в таблицу.

№ опыта	Сила тока I , А	Масса дополнительных гирь m , г	Сила F , Н
1			
2			
3			
4			
5			

2. По результатам измерений постройте график зависимости силы взаимодействия от силы тока, откладывая на оси абсцисс значения силы тока, а на оси ординат значения силы взаимодействия.

**Работа № 10.
Изучение свойств переменного тока**

Цель работы заключается в изучении некоторых свойств переменного тока: его магнитного поля, выпрямления переменного тока, измерительных приборов для переменного тока.

Для того чтобы иметь источник переменного тока напряжением 4 В, следует немного переоборудовать школьный выпрямитель ВУ-4. Для этого на панели надо установить на изолирующих прокладках два дополнительных трансформатора (до выпрямителя).

Приборы и материалы: комбинированный источник постоянного и переменного тока ВУ-4; электромагнит разборный с принадлежностями; диод полупроводниковый на колодке; лампочка на подставке; вольтметр; реостат; соединительные провода; ключ для замыкания цепи; динамометр школьный; модель электрического двигателя из конструктора; постоянный магнит.

Задание 1. Исследование магнитного поля переменного тока

1. Соберите установку по схеме рисунка Л.18. Присоедините катушку сначала к клеммам источника постоянного тока, а затем — переменного тока. Пронаблюдайте за поведением ферромагнитного сердечника: одинаково ли он реагирует на магнитное поле постоянного и переменного тока?

2. Меняя с помощью реостата силу тока в цепи, выясните, как меняется характер втягивания сердечника в катушку. Прodelайте опыт с постоянным и переменным токами.

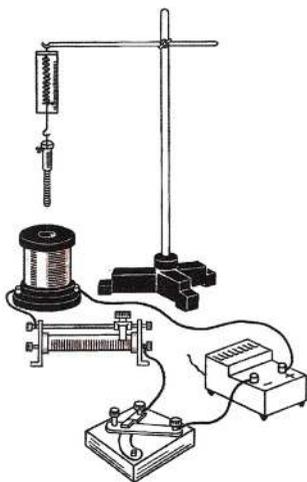


Рис. Л.18

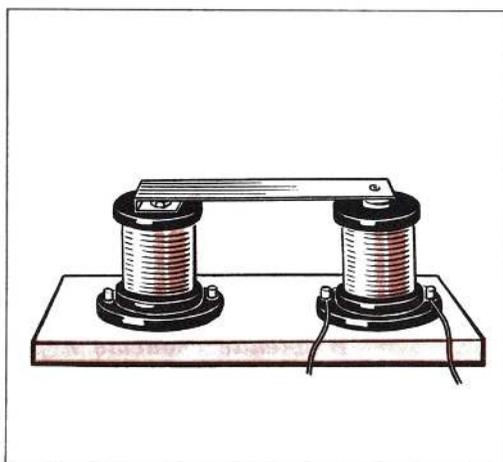


Рис. Л.19

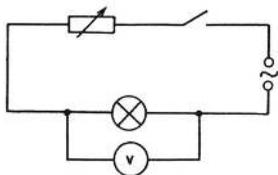


Рис. Л.20

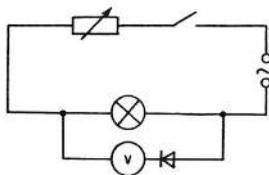


Рис. Л.21

Задание 2. Выпрямление переменного тока

1. Соберите установку в соответствии с рисунком Л.19. Подключите выводы катушки к клеммам переменного тока. Пронаблюдайте за частотой колебаний пластинки. Объясните: почему она колеблется? С какой частотой, если частота переменного тока равна 50 Гц (т. е. 50 колебаний в секунду)?

2. Включите последовательно катушке полупроводниковый диод. Обратите внимание на изменение частоты колебаний пластинки и попытайтесь это объяснить.

Задание 3. Измерения в цепи переменного тока с помощью магнитоэлектрического прибора

1. Ознакомьтесь детально с условными обозначениями на шкале школьного вольтметра. Определите его тип, пределы измерения, для какого тока он предназначен.

2. Соберите цепь в соответствии с рисунком Л.20. Объясните, почему лампочка горит, а вольтметр не дает никаких показаний.

3. Включите последовательно вольтметру полупроводниковый диод (рис. Л.21). Отклоняется ли сейчас стрелка прибора? Как это объяснить?

4. Меняя с помощью реостата накал лампы, выясните, меняются ли показания вольтметра. Объясните это явление. Для измерений надо переградуировать шкалу.

Задание 4. Работа коллекторного электродвигателя в цепи переменного тока

Соберите модель коллекторного электродвигателя, включив последовательно обмотку якоря и обмотку возбуждения. Включите двигатель сначала в цепь постоянного, а затем — переменного тока. Сравните, как работает двигатель в обоих случаях.

Работа № 11.
Трансформация переменного тока

Целью работы является изучение устройства и принципа действия трансформатора.

Приборы и материалы: комбинированный источник постоянного и переменного тока; три катушки от электромагнита разборного; стальной стержень диаметром 6 мм и длиной 12 см; медный или алюминиевый стержень таких же размеров; лампочка на подставке; вольтметр; диод полупроводниковый; проводники соединительные; ключ для замыкания цепи.

Задание 1. Наблюдение явления электромагнитной индукции в цепи переменного тока

1. Соберите установку, как показано на рисунке Л.22, вставив в катушку стальной стержень. Объясните, почему горит лампочка, хотя между катушками нет электрического контакта.

2. С помощью вольтметра, последовательно которому включен полупроводниковый диод, сравните напряжения на первичной и вторичной катушках.

3. Проведите тот же эксперимент, надев катушки на медный (алюминиевый, деревянный) стержень. Объясните результат этого эксперимента.

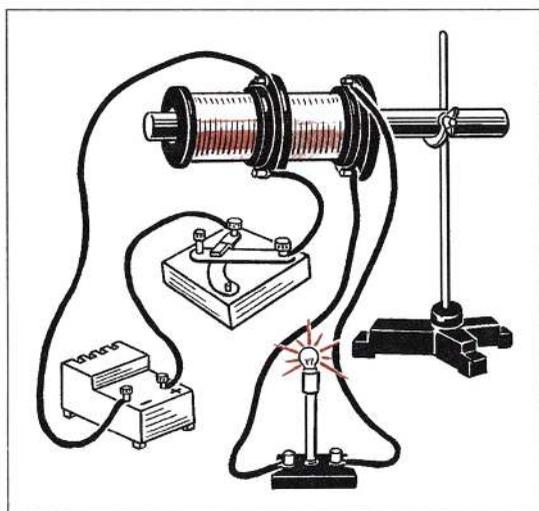


Рис. Л.22

Задание 2. Сборка модели повышающего трансформатора

1. Соберите модель трансформатора по схеме, изображенной на рисунке Л.23.

2. С помощью вольтметра с диодом измерьте сперва напряжение на клеммах *B* и *A*. Затем, соединив клеммы *B* и *D* проводником, измерьте напряжение на клеммах *A* и *C*.

3. Сравните эти результаты и сделайте вывод о зависимости напряжения на выходе трансформатора от числа витков на вторичной обмотке.

4. Подайте напряжение 4 В от комбинированного источника тока на клеммы *A* и *C* (при этом клеммы *B* и *D* должны быть соединены). Измерьте напряжение на клеммах средней катушки, которая сейчас стала вторичной, и сделайте вывод о том, как зависит напряжение от коэффициента трансформации.

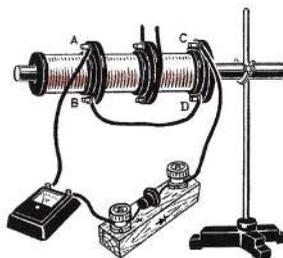


Рис. Л.23

Таблица 4.1

Удельная теплоемкость веществ

Вещество	c , кДж/(кг · °С)	Вещество	c , кДж/(кг · °С)
Газы (при атмосферном давлении)		Твердые тела	
Азот (20 °С)	1,051	Алюминий (0—200 °С)	0,92
Водород (20 °С)	14,269	Вольфрам (0—1000 °С)	0,13
Воздух (20 °С)	1,009	Железо (0—400 °С)	0,46
Гелий (20 °С)	5,296	Золото (0—500 °С)	0,13
Кислород (20 °С)	0,913	Медь (0—300 °С)	0,38
Оксид углерода (IV)	0,837	Никель (0—500 °С)	0,46
Водяной пар (100 °С)	2,14	Платина (0—500 °С)	0,14
Неон (20 °С)	1,038	Свинец (0—300 °С)	0,13
Жидкости		Серебро (0—500 °С)	0,24
Азот (-196 °С)	2,00	Сталь, чугун (0—200 °С)	0,46—0,52
Водород (-258 °С)	7,41	Цинк (0—300 °С)	0,40
Воздух (-192 °С)	2,05	Алмаз (20 °С)	0,5
Гелий (-269 °С)	4,27	Бетон	0,88
Кислород (-216 °С)	1,67	Гранит	0,8
Вода (10—100 °С)	4,18	Графит (20 °С)	0,7
Вода морская (20 °С)	3,94	Дерево	2,4
Бензин	1,4—2,1	Кирпич	0,84
Керосин (20—100 °С)	2,1	Лед (-40—0 °С)	2,1
Ртуть (0—300 °С)	0,14	Пробка	2,05
Спирт (0—100 °С)	2,4	Стекло (0—100 °С)	0,7—0,8
Эфир (20—100 °С)	2,0—2,3	Эбонит (20—100 °С)	1,38

Таблица 4.2

**Температура плавления и удельная теплота плавления
(при нормальном атмосферном давлении)**

Вещество	$t_{\text{плавл}},$ °С	$\lambda,$ кДж/кг	Вещество	$t_{\text{плавл}},$ °С	$\lambda,$ кДж/кг
Азот	-210,0	25,9	Нафталин	80,3	151
Алюминий	660,4	393	Никель	1455	305,6
Вода (лед)	0	332,4	Олово	231,9	59
Водород	-259,14	58,6	Платина	1772	113
Вольфрам	3387	185	Ртуть	-38,862	11,7
Гелий (при давлении 2,5 МПа)	-272,2	5,72	Свинец	327,5	24,3
Железо	1535	270	Серебро	961,93	87,3
Золото	1064,43	67	Спирт (этиловый)	-98,0	105
Кислород	-218,4	13,8	Сталь, чугун	1100—1500	85—140
Медь	1084,5	213	Стекло	460—800	—
			Цинк	419,58	112,2

Таблица 4.3

**Температура кипения и удельная теплота парообразования
(при нормальном атмосферном давлении)**

Вещество	$t_{\text{кип}},$ °С	$r,$ кДж/кг	Вещество	$t_{\text{кип}},$ °С	$r,$ кДж/кг
Азот	-195,80	199,3	Кислород	-182,962	213
Ацетон	56,5	521	Нафталин	217,9	314
Бензин	40—180	290	Ртуть	356,66	293,1
Бензол	80,1	394	Скипидар	161	287
Вода	100	2257	Спирт (этиловый)	78,3	906
Водород	-252,87	457	Фреон-12	-29,8	167
Гелий	-268,93	19,5			

Таблица 4.4

Удельная теплота сгорания топлива

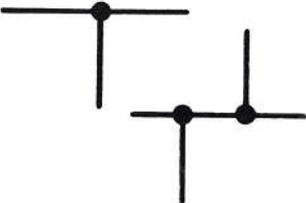
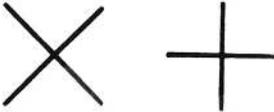
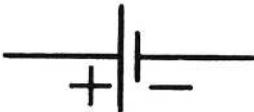
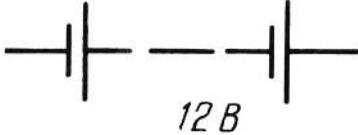
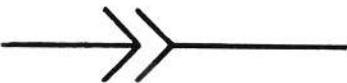
Вещество	q , МДж/кг	Вещество	q , МДж/кг
Ацетилен	50	Мясо (говядина)	7,5
Бензин	44	Природный газ	41—49
Водород	120	Сахар	17
Дизельное топливо	43	Уголь каменный	21—30
Картофель	3,8	Условное топливо	29,3
Керосин	43	Хлеб	8—9
Масло сливочное	33	Дрова	10—12

Таблица 4.5

Отношение теплопроводности разных веществ к теплопроводности воды (при 20 °С)

Вещество	$k_{отн}$	Разные вещества и материалы	$k_{отн}$
Газы		Алмаз	222,5
Водород	0,31	Асбест (картон)	0,24
Водяной пар (100 °С)	0,04	Бумага	0,23
Воздух сухой	0,04	Бетон	0,18—3,9
Гелий	0,25	Вода	1
Оксид углерода (IV)	0,026	Войлок, сукно	0,1
Металлы		Гранит	5,7
Алюминий	340	Графит (чистый)	8,2
Вольфрам	267	Дерево (сухое)	0,6—0,7
Железо	122	Земля (сухая)	0,2
Золото	518	Керосин	0,2
Медь	656	Кирпич	0,8—1,3
Никель	150	Лед (0 °С)	3,8
Платина	117	Плексиглас	0,3
Ртуть	11	Стекло	1,3
Свинец	57	Эбонит	0,27
Серебро	698		
Сталь, чугун	75—97		
Цинк	188		

Условные графические обозначения

Наименование	Условное обозначение
1. Ток переменный (220 В)	~ 220 В
2. Провод	
3. Соединение при ответвлении и пересечении проводов	
4. Отсутствие соединения при пересечении проводов	
5. Гальванический или аккумуляторный элемент	
6. Батарея элементов	
7. Штепсельное соединение (вилка и розетка)	

Наименование	Условное обозначение
8. Кнопка (звонковая) с нормально разомкнутыми контактами; выключатель	
9. Резистор	
10. Реостат, потенциометр	
11. Предохранитель плавкий	
12. Лампа накаливания	
	ИЛИ
13. Электрический звонок	
14. Счетчик ватт-часов	
15. Обмотка реле, трансформатора	

Планеты Солнечной системы

Группа	Планета	Звездный период обращения (год)	Среднее расстояние от Солнца		Число спутников	Экваториальный диаметр		Масса (в массах Земли)	Средняя плотность, $\times 10^3$ кг/м ³
			$\times 10^6$ км	а. е.		в диаметрах Земли	$\times 10^3$ км		
Земная группа	Меркурий	0,241	58	0,387	нет	0,38	4,9	0,06	5,4
	Венера	0,615	108	0,723	нет	0,95	12,1	0,82	5,2
	Земля	1,000	150	1,000	1	1,00	12,76	1,00	5,5
	Марс	1,881	228	1,524	2	0,53	6,8	0,11	4,0
Планы-гиганты	Юпитер	11,86	778	5,203	16	11,2	142,0	318	1,3
	Сатурн	29,46	1426	9,539	17	9,5	120,0	95,1	0,6
	Уран	84,01	2869	19,18	15	3,9	50,0	14,5	1,3
	Нептун	164,8	4496	30,06	2	3,9	50,0	17,3	1,6
	Плутон	247,7	5900	39,44	1	0,2	28(?)	?	?

ОТВЕТЫ

§ 1.2. 1. Гильзы несут равные по модулю и противоположные по знаку электрические заряды. 2. Электрические заряды на гильзах противоположны по знаку и различаются по модулю.

§ 1.3. 1. На теле и стержне электроскопа заряды одинакового знака. 2. На теле и стержне электроскопа заряды с противоположными знаками. 3. Может, если на стержне и теле электрические заряды равны по модулю и противоположны по знаку. 4. На стержнях электроскопов заряды равны по модулю и противоположны по знаку.

§ 1.4. 1. Электроскопы зарядятся противоположно тому, как показано на рисунке 1.9. 2. Оба электроскопа зарядятся одинаково. 3. Второй электроскоп не зарядится.

§ 1.5. 1. $9 \cdot 10^3$ Н. 2. 90 Н. 3. $2,5 \cdot 10^3$ Н.

§ 1.7. 1. Нельзя; нельзя; можно. 2. Три. 3. $6,2 \cdot 10^{18}$.

§ 2.3. 1. 1; 2; 92. 2. $1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл; $3,2 \cdot 10^{-19}$ Кл; $1,5 \cdot 10^{-17}$ Кл. 3. $8,2 \cdot 10^{-8}$ Н. 4. 2; 3; 2; 18.

§ 2.4. 1. Указание — см. таблицу 2.1.

Элемент \ Слой	Слой		Элемент \ Слой	Слой		
	K	L		K	L	M
литий	2	1	натрий	2	8	1
бериллий	2	2	магний	2	8	2
бор	2	3	алюминий	2	8	3
углерод	2	4	кремний	2	8	4
азот	2	5	фосфор	2	8	5
кислород	2	6	сера	2	8	6
фтор	2	7	хлор	2	8	7
неон	2	8	аргон	2	8	8

2. Бериллий. 3. Углерод. 4. $2 + 8 + 18 + 7$.

§ 2.7. 1. В 1639 раз. 2. В 10,6 раза. 3. В 11,8 раза.

§ 2.8. 3. Все атомы одинаковые. 4. $2,96 \cdot 10^{-9}$ Н.
5. $2,21 \cdot 10^{-9}$ Н. 6. $1,9 \cdot 10^6$ Н. 7. Наличие в кристалле большого числа дефектов.

§ 2.9. 1. 8,3%. 2. 4,2%.

§ 3.2. 1. В 1,4 раза. 2. В 3 раза меньше. 3. 1912 м/с; 637 м/с.

§ 3.5. 1. От -20°C до 90°C ; 2°C ; 1°C . 2. 52°C . 3. При тепловом равновесии.

§ 3.6. 1. $1^{\circ}\text{C} = 0,8^{\circ}\text{R}$. 2. 20°R . 3. 40°C . 4. Может; 49°C ; 39°R . 5. $29,3^{\circ}\text{R}$; $97,9^{\circ}\text{F}$. 6. Нельзя, капилляр лопнет.

§ 3.7. 1. $309,8\text{ K}$. 3. Увеличилась в 1,2 раза. 4. Уменьшилось в 2 раза. 5. $14,2\text{ K}$; $20,2\text{ K}$.

§ 3.8. 1. 8% ; 92% . 2. $12,4\%$; $87,6\%$.

§ 4.6. 1. $3,4 \cdot 10^5\text{ Дж}$. 2. $1,27 \cdot 10^6\text{ Дж}$. 3. $4,2 \cdot 10^9\text{ Дж}$. 4. $6,1\text{ МДж}$.

§ 4.7. 1. $46,3^{\circ}\text{C}$. 2. 31°C . 3. $27,6^{\circ}\text{C}$. 4. $6,85\text{ кг}$ ($8,56\text{ л}$).

§ 4.8. 1. В деревянном. 2. У алюминия большая теплопроводность. 3. При плавлении нарушается кристаллическая решетка и уменьшается длина свободного пробега электронов. 4. У сплавов нарушена кристаллическая решетка и уменьшается длина свободного пробега электронов.

§ 4.9. 1. Чтобы возбудить конвекцию — теплая жидкость всплывает вверх. 2. Холодный воздух опускается вниз. 3. При обычных давлениях невозможна. 4. См. задачу 1. 5. Из-за особенностей теплового расширения воды. 7. Естественная конвекция недостаточна. 9. Нет.

§ 4.10. 1. Плохо — зеркало отражает излучение. 2. Любкую. 3. Блестящий металл хорошо отражает излучение. 4. Чернозем. 5. Светлые ткани слабее поглощают излучение. 6. Грязный. 7. Чтобы меньше поглощать внешнее излучение. 8. Можно. 9. Чтобы уменьшить поглощение солнечного излучения и избежать перегрева и ослепления ярким светом.

§ 4.11. 1. Температура понизится. 2. Возросла на 3 кДж . 3. Может; уменьшится внутренняя энергия; понизится температура. 4. Может; внутренняя энергия не изменится. 5. Второму.

§ 5.5. 1. 50% . 2. 30% . 3. 60% .

§ 6.1. 1. $3,8 \cdot 10^{23}\text{ кВт}$. 2. $3 \cdot 10^{14}\text{ лет}$. 3. $1,3 \cdot 10^{19}\text{ кг}$.

§ 6.3. 1. $3,3 \cdot 10^4\text{ Па}$; $0,1\text{ Па}$. 2. Перегрев атмосферы. 3. Уменьшается прозрачность атмосферы для инфракрасного излучения Земли.

§ 6.6. 2. $2 \cdot 10^9\text{ Дж}$; около 10^6°C . 3. 76 лет . 4. 2062 год . 5. У ядра низкая температура; высыхание белья на морозе.

§ 7.3. 3. 40 В . 4. 600 Дж .

§ 7.4. 2. $8,3\text{ А}$. 3. $2,7 \cdot 10^3\text{ Кл}$. 4. $q_1 = q_2$; $q_1/t = q_2/t$; $I_1 = I_2$.

§ 7.5. 1. 0,6 Ом. 2. 14,5 м. 3. $1 \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2/\text{м} = 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{м}^2/\text{м} = 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{м}$. 4. 0,5 мм.

§ 7.6. 1. 440 Ом. 2. 2,9 А. 3. $0,38 \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2/\text{м} = 3,8 \cdot 10^{-7} \text{ Ом} \cdot \text{м}$. 4. 16 м.

§ 8.1. 2. 20 В. 3. 133 витка.

§ 8.2. 4. 1040 Ом; 0,21 А. 5. 19 ламп. 8. Можно, лампочка от карманного фонаря будет гореть в полнакала.

§ 8.3. 2. $I = GU$. 4. Параллельно; 1,2 А. 7. 2,5 А; 88 Ом; в 5 раз меньше. 8. 44 Ом.

§ 8.4. 1. 432 кДж = 120 Вт·ч. 2. 13 МДж = 3,6 кВт·ч. 3. $A = I^2 R t = U^2 t/R$.

§ 8.5. 1. 0,83 А; 120 В. 2. 25 м. 3. $P = I^2 R = U^2/R$. 4. Вторая; первая.

§ 8.6. 1. 0,5 Ом; 200 Вт. 2. $\approx 4\%$. 3. $Q = I^2 R t$; при последовательном соединении сила тока во всех проводниках одинакова. 4. С меньшим сопротивлением: $Q = U^2 t/R$. 5. 3100 с = 52 мин.

§ 10.5. 1. $24 \cdot 125/60 = 50$. 2. 10 пар полюсов.

§ 10.6. 1. 102 000 витков. 2. 0,34 А; 1,7 А.

§ 10.7. 1. В 400 раз. 2. 4,3 кВт; нецелесообразно. 3. 1 А; 43 Вт; целесообразно. 4. 34%; 99%.

СОДЕРЖАНИЕ

Советы юным читателям	3
Введение	6
Глава 1. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ЗАРЯД	
§ 1.1. Электризация тел	7
§ 1.2. Электрический заряд	8
§ 1.3. Электроскоп	10
§ 1.4. Проводники и изоляторы	11
§ 1.5. Закон Кулона	14
§ 1.6. Электрическое поле	16
§ 1.7. Электрон	18
Глава 2. СТРОЕНИЕ ВЕЩЕСТВА	
§ 2.1. Химические элементы и соединения	23
§ 2.2. Периодическая система химических элементов	26
§ 2.3. Атом. Ион	27
§ 2.4. Строение электронных оболочек атома	31
§ 2.5. Молекула. Химическая связь	34
§ 2.6. Газ. Плазма	37
§ 2.7. Кристалл	39
§ 2.8. Типы кристаллических связей	43
§ 2.9. Жидкости. Аморфные тела	49
Глава 3. ТЕМПЕРАТУРА	
§ 3.1. Диффузия	52
§ 3.2. Броуновское движение. Температура и движение молекул	56
§ 3.3. Явления, используемые для измерения температуры	59
§ 3.4. Плавление и кипение	63
§ 3.5. Термометр	65
§ 3.6. Температурные шкалы. Градус	67
§ 3.7. Абсолютная (термодинамическая) шкала температур	70
§ 3.8. Особенности теплового расширения воды	74
Глава 4. ВНУТРЕННЯЯ ЭНЕРГИЯ	
§ 4.1. Закон сохранения энергии и тепловые явления	79
§ 4.2. Внутренняя энергия	81
§ 4.3. Работа и внутренняя энергия	83
§ 4.4. Теплообмен	86
§ 4.5. Количество теплоты. Закон сохранения энергии	88
§ 4.6. Как вычислить количество теплоты	90

§ 4.7. Как решать задачи на явление теплообмена	93
§ 4.8. Теплопроводность	97
§ 4.9. Конвекция	100
§ 4.10. Лучистый теплообмен	105
§ 4.11. Законы термодинамики	109

Глава 5. ТЕПЛОВЫЕ МАШИНЫ

§ 5.1. Тепловые машины и развитие техники	114
§ 5.2. Паровая турбина	115
§ 5.3. Двигатель внутреннего сгорания	119
§ 5.4. Газовая турбина и реактивные двигатели	121
§ 5.5. Коэффициент полезного действия теплового двигателя	124
§ 5.6. Холодильная установка	126
§ 5.7. Экологические проблемы использования тепловых машин	127

Глава 6. ПРИРОДА ТЕЛ СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ

§ 6.1. Солнце и его роль в Солнечной системе	131
§ 6.2. Две группы планет. Происхождение Солнечной системы	135
§ 6.3. Земля и ее спутник Луна	137
§ 6.4. Планеты земной группы	146
§ 6.5. Планеты-гиганты, их спутники и кольца	154
§ 6.6. Малые тела Солнечной системы: астероиды, метеориты, кометы	159

Глава 7. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК

§ 7.1. Первоначальные сведения об электрическом токе	167
§ 7.2. Электрический ток в металлических проводниках	170
§ 7.3. Электрическое напряжение	172
§ 7.4. Сила электрического тока	175
§ 7.5. Электрическое сопротивление	177
§ 7.6. Закон Ома	181
§ 7.7. Ток в электролитах	184
§ 7.8. Ток в газах	186
§ 7.9. Молния	187

Глава 8. ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ЦЕПЬ

§ 8.1. Резисторы. Реостаты. Делители напряжения	191
§ 8.2. Последовательное соединение электрических устройств	194
§ 8.3. Параллельное соединение электрических устройств	197
§ 8.4. Электрическая энергия. Работа тока	199
§ 8.5. Мощность тока	201
§ 8.6. Тепловое действие электрического тока и его практическое применение	202
§ 8.7. Меры безопасности при работе с электрическими приборами	206

Глава 9. МАГНИТНОЕ ПОЛЕ

§ 9.1. Первоначальные сведения о магнетизме	210
§ 9.2. Магнитное поле .	211
§ 9.3. Опыт Эрстеда. Магнитное поле тока	214
§ 9.4. Электромагнит	
§ 9.5. Действие магнитного поля на проводник с током и движущиеся заряды .	221
§ 9.6. Взаимодействие электрических токов	224
§ 9.7. Электрический двигатель .	226
§ 9.8. Электроизмерительные приборы	229
§ 9.9. Магнитные свойства вещества	231
§ 9.10. Магнитные поля в Солнечной системе	234

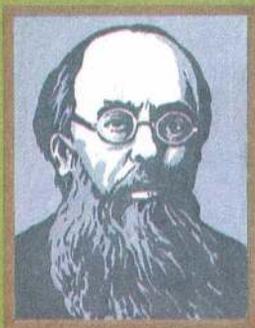
Глава 10. ЯВЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ

§ 10.1. Открытие Фарадея	241
§ 10.2. Электродвижущая сила индукции. Правило Ленца	243
§ 10.3. Переменный индукционный ток	246
§ 10.4. Микрофон. Громкоговоритель	248
§ 10.5. Индукционный генератор переменного тока	250
§ 10.6. Трансформация переменного тока	253
§ 10.7. Передача электрической энергии	254

Глава 11. ПОЛУПРОВОДНИКИ. ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ПРИБОРЫ

§ 11.1. Основные свойства полупроводников	258
§ 11.2. Электроны проводимости и дырки.	260
§ 11.3. Собственная и примесная проводимость полупроводников	263
§ 11.4. Электронно-дырочный переход	265
§ 11.5. Полупроводниковый диод и его применение	267
§ 11.6. Полевой транзистор и его применение	269

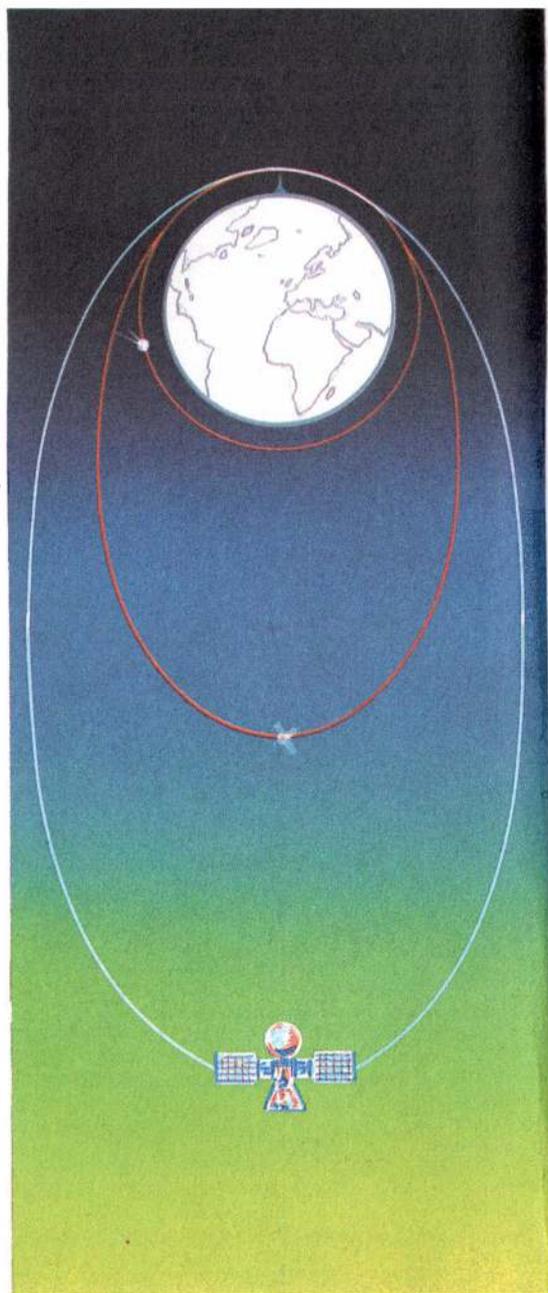
Лабораторные работы	272
Приложение	292

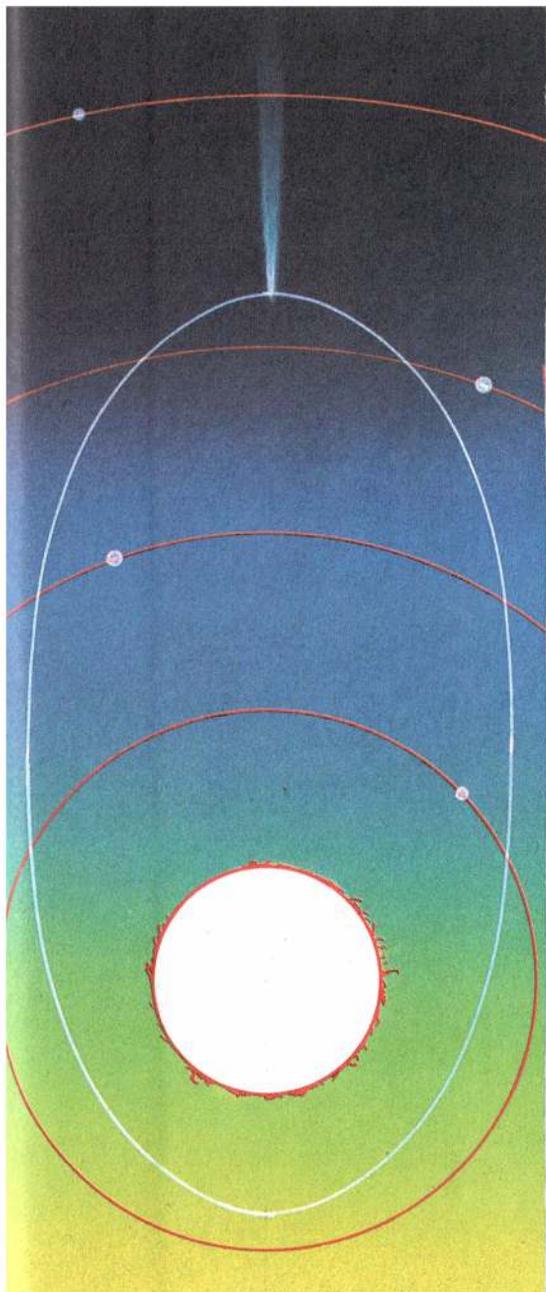


Э.К. Циолковский
1857—1935



С.П. Королев
1907—1966

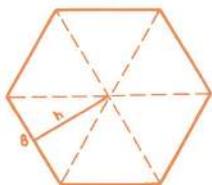




Э. Галлей
1656—1742



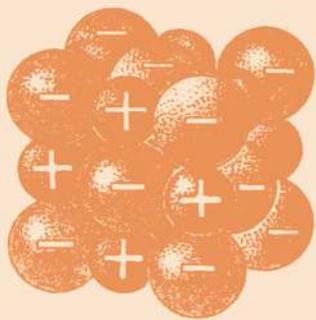
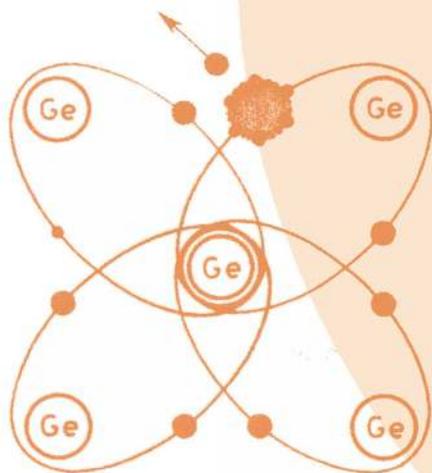
У. Леверье
1811—1877



Новый интегрированный учебник:

- физика и астрономия
- два уровня сложности
- система домашних экспериментальных заданий
- качественные и расчетные задачи
- вопросы для самопроверки

Учебник является логическим продолжением учебника «Физика и астрономия» для 7 класса того же авторского коллектива.



ISBN 5-09-010380-1



9 785090 103800