

Начальное  
и среднее  
профессиональное  
образование

П. И. Самойленко

# ФИЗИКА

ДЛЯ ПРОФЕССИЙ И СПЕЦИАЛЬНОСТЕЙ  
СОЦИАЛЬНО-ЭКОНОМИЧЕСКОГО  
И ГУМАНИТАРНОГО ПРОФИЛЕЙ

Учебник

Общеобразовательные дисциплины



  
ACADEM A

УДК 53(075.32)

ББК 22.3я723

С17

Рецензенты:

зам. директора по инновационной и экспериментальной деятельности

ГБОУ Железнодорожный колледж № 52

канд. техн. наук, доц. *Т. В. Герш;*

преподаватель физики ГБОУ Железнодорожный колледж № 52

*М. В. Боганова*

**Самойленко П. И.**

С17 Физика для профессий и специальностей социально-экономического и гуманитарного профилей : учебник для образоват. учреждений начального и среднего проф. образования / П. И. Самойленко. — 5-е изд., стер. — М. : Издательский центр «Академия», 2013. — 496 с.

ISBN 978-5-4468-0433-7

Наглядно и убедительно показано, что все многообразие физических явлений можно привести в стройную систему и понять, опираясь на небольшое количество фундаментальных законов. Для учебника характерны строгая логика, современные подходы к изложению материала, широкое использование исторических фактов. Первостепенное внимание уделяется физическому смыслу и границам применимости основных понятий, формул, законов, теорий.

Для обучающихся в образовательных учреждениях начального и среднего профессионального образования.

УДК 53(075.32)

ББК 22.3я723

*Оригинал-макет данного издания является собственностью Издательского центра «Академия», и его воспроизведение любым способом без согласия правообладателя запрещается*

© Самойленко П. И., 2010

© Образовательно-издательский центр «Академия», 2010

© Оформление. Издательский центр «Академия», 2010

ISBN 978-5-4468-0433-7

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Физика — фундамент современного естествознания. Она имеет важное значение для теории познания, формирования научно-мировоззрения, а также для развития других наук и различных областей техники. Изучение основ физики создает необходимую базу для качественной профессиональной подготовки будущих специалистов среднего звена. Задачи экономического и социального развития нашего общества должны решать люди, вооруженные современными знаниями, поэтому в соответствующих разделах и темах курса обучающиеся знакомятся с задачами и перспективами развития науки и техники, вопросами экологии, а в плане общекультурного развития — с современной физической картиной мира во всем ее многообразии.

Данный учебник вместе со «Сборником задач по физике» (П. И. Самойленко, 2010) входит в учебный комплект для обучающихся в образовательных учреждениях начального и среднего профессионального образования, где на курс физики отводится относительно немного часов (социально-экономический и гуманитарный профили). В связи с этим материал изложен на качественной основе, без использования сложного математического аппарата.

Курс физики с учетом современных требований должен соответствовать профессиональной направленности. В предлагаемом учебнике показана роль физической науки в решении глобальных проблем человечества, а также в становлении культуры.

Особое внимание уделяется самостоятельной работе обучающихся в процессе изучения физики, развитию их познавательной деятельности и умению выделять главное — обобщать полученные знания. Для этого в конце каждой главы дается сводка основных понятий и выводов, приводятся вопросы и упражнения для самопроверки.

## ВВЕДЕНИЕ

### Физика — наука о природе

Человек живет в мире природы. Физика изучает наиболее общие закономерности природы, строение и свойства материи. *Материей* в науке называется все то, что реально существует в природе, независимо от нас и нашего сознания, все то, что мы можем воспринимать с помощью органов чувств непосредственно или используя специальные приборы.

Науки о природе зародились давно — в Древнем Китае, Индии и Древней Греции. Слово «физика» древнегреческого происхождения. Оно появилось в сочинениях ученого-энциклопедиста Аристотеля, жившего в IV в. до н. э., и в переводе на русский язык означает «природа» (от греч. *physys* — природа). В русский язык это слово ввел в 1746 г. М. В. Ломоносов, когда издал в переводе с немецкого языка первый в России учебник физики «Вольфианская экспериментальная физика».

Таким образом, физика — самая общая наука о природе: о строении, свойствах и взаимодействии составляющих ее материальных тел и полей.

Физика — наука об изменениях и процессах, происходящих в природе, свойствах живой и неживой материи, из которой состоит окружающий мир.

**Физика — наука, изучающая простейшие и вместе с тем наиболее общие закономерности явлений природы, свойства и строение материи и законы ее движения.**

Главная цель этой науки — выявить и объяснить законы природы, которыми определяются все физические явления.

Физику и другие науки о природе (астрономию, биологию, химию, геологию, метеорологию, физическую географию и т. д.) называют *естественными*. В отличие от физики другие естествен-

ные науки изучают объекты и явления, которые выделяются определенным признаком, свойством, принадлежностью.

Например, астрономия изучает явления, происходящие с небесными телами и их системами; биология — живые организмы и среду, в которой они обитают; геология — строение поверхности и недр Земли, а также состав и происхождение горных пород; метеорология — атмосферу, ее строение, свойства, процессы, которые в ней происходят, а также разрабатывает методы, позволяющие предсказывать атмосферные явления; физическая география — изменения на Земле и в околоземном пространстве — литосфере, гидросфере и атмосфере; химия — такой вид взаимодействия, при котором одни вещества превращаются в другие. Как видим, физические методы исследования широко применяются в естественных науках.

Толчком к развитию физики как науки послужило использование закономерностей явлений природы, имеющих практическое значение. Так, установив законы механического движения тел, в частности планет, ученые создали календарь, с помощью которого могли предсказывать сезонные изменения времен года, рассчитывать последствия воздействия различных природных стихий и т. п.

На протяжении многих веков знания о физических законах природы обогащались и совершенствовались. Используя их, ученые и конструкторы создавали машины, разрабатывали новые технологии, преобразовали окружающий нас мир. Без преувеличения можно сказать, что не существует технических устройств или приборов, современных технологий, при создании которых не использовались бы знания физики.

Что же изучает физика?

**Физика изучает физические явления и физические свойства тел.**

Движение самолетов и автомобилей, обращение Земли вокруг Солнца и космической орбитальной станции вокруг Земли, свечение экрана телевизора, молния, гром, радуга, влияние магнитного поля Земли на стрелку компаса, отражение света от зеркальных поверхностей, таяние льда, образование облаков, взрывы атомных бомб и процессы, происходящие в недрах звезд, — все это примеры физических явлений. Многие физические явления обладают общими свойствами, и в зависимости от этого можно говорить о *механических, тепловых, электрических, магнитных, оптических* и других процессах и явлениях.

Все эти явления свойственны неживой природе. Но многие из них могут происходить внутри живых организмов. Например,

влага поднимается от земли к колосу по стеблю растения; кровь течет по сосудам в теле человека и животного; по нервным волокнам передаются сигналы от мозга и т. д.

Помимо явлений природы физика изучает свойства отдельных тел, материального мира в целом. Например, очень важно знать, какие тела лучше проводят теплоту или электрический ток, какие материалы следует использовать для звукоизоляции, каким веществом нужно покрыть экран телевизора, чтобы на нем можно было получить изображение, из какого вещества следует изготовить пленку для магнитофона, чтобы записать на ней звуковой сигнал, и т. д. Ответить на эти вопросы можно, если исследовать соответствующие свойства тел. Таким образом,

**физика — фундаментальная наука о свойствах и строении материи, законах ее движения.**

### **Структурные уровни организации материи**

Согласно современным естественно-научным представлениям все объекты неживой и живой природы представляют собой упорядоченные, структурированные, иерархически организованные и взаимосвязанные системы. На основе системного подхода, учитывающего фундаментальный характер взаимодействия объектов природы и отношения между ними, все известные в настоящее время объекты материального мира в зависимости от их размеров условно относят к микро-, макро- или мегамиру.

**Естественно-научный метод познания, его возможности и границы применимости.** Физика — сокровищница научной информации об окружающем нас мире. Но она ценна не только объемом накопленных знаний о природе, но и своим методом научного познания, одним из основоположников которого является итальянский физик Галилео Галилей (1564—1642). Этот метод определяют как последовательность нескольких этапов, важнейшими из которых являются следующие:

1) *наблюдение явлений*, которое возможно благодаря органам чувств человека и используемым приборам при исследовании явления;

2) *выдвижение гипотезы* — предположительного суждения о закономерной связи явлений;

3) *создание теории на основе выдвинутой гипотезы*, позволяющей обсудить совокупность наблюдаемых явлений, предвидеть явления еще неизвестные, предсказывать ход их развития;

4) *экспериментальная проверка* выдвинутой гипотезы и теоретических следствий, вытекающих из нее.

Первый этап происходит в виде непосредственного *наблюдения* явлений. Чувственный опыт, считал Галилей, привлекает наше внимание к наблюдаемому явлению, но не открывает законов природы, так как они «написаны на языке математики».

За чувственным опытом должно следовать выдвижение *гипотезы* — научно обоснованного предложения о внутренних связях, управляющих данными явлениями или совокупностью явлений. Выдвижение гипотезы — творческий процесс, в котором силой ума создается абстрактная модель наблюдаемого явления, способная сделать его понятным для нас. Поэтому изучение любого явления начинается с выделения главного, от чего оно зависит, и отбрасывания второстепенных факторов, не влияющих на него существенно. Подобное упрощение называют моделированием.

*Моделирование* — один из методов научного исследования, в котором изучаемое физическое явление (объект) заменяется другим, сходным с ним, — *моделью*. Модели могут быть материальными и идеальными.

К *материальным* относятся такие модели, которые состоят из вещественных элементов и реально функционируют. Они предназначены для воспроизведения структуры объекта, характера протекания и сущности рассматриваемого процесса. Например, моделью жидкости может служить речной песок, моделью земного шара — глобус. Планетарий представляет собой устройство, с помощью которого демонстрируют модели звездного неба, Солнечной системы и различных небесных явлений.

К *идеальным* относятся такие модели, которые конструируются мысленно (материальная точка, математический маятник, идеальный газ, кристаллическая решетка). Их можно фиксировать с помощью рисунков, мультипликации, определенных символов. Однако все преобразования элементов модели осуществляются в сознании человека по логическим, математическим, физическим правилам и законам.

С возникновением новых поколений ЭВМ в науке получило широкое распространение *компьютерное моделирование* с помощью специально созданных для этой цели программ.

После построения модели начинается ее изучение (теоретический анализ). Выводы, полученные при этом, проверяют, выясняют их соответствие научному эксперименту либо результатам практической деятельности. Нельзя чисто теоретически установить, пригодна данная модель для описания конкретного явления

или нет. Только опыт, практика дают уверенность в правильности той или иной модели явления.

Одной из первых моделей в истории науки была модель строения вещества из неделимых и неизменных атомов. Эта модель помогла понять большинство природных процессов, с которыми человек встречается ежедневно, и дать им естественное объяснение. И хотя современные представления об атомах существенно отличаются от представлений Демокрита, в основе своей атомистическая модель строения вещества оказывается применимой в науке и сегодня.

Развитием атомистической модели строения вещества стала модель идеального газа. Эта модель позволила от качественного объяснения природных явлений перейти к установлению количественных связей между различными физическими величинами, характеризующими свойства газов. На основе этой модели была выведена формула, определяющая давление  $p$  газа через концентрацию  $n$  молекул газа и среднюю кинетическую энергию  $\bar{E}$  од-

ной молекулы:  $p = \frac{2}{3} n\bar{E}$ , и установлено, что средняя кинетическая энергия  $\bar{E}$  беспорядочного поступательного движения молекул идеального газа пропорциональна абсолютной температуре  $T$  газа:

$$\bar{E} = \frac{3}{2} kT,$$

где  $k$  — коэффициент пропорциональности,  $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К — постоянная Больцмана.

Создание М. Фарадеем моделей электрических и магнитных полей как непрерывных, заполняющих все мировое пространство, материальных носителей электромагнитных взаимодействий тел способствовало быстрому прогрессу в экспериментальных и теоретических исследованиях электромагнитных явлений.

После создания абстрактной модели наблюдаемого явления следует этап *математического развития гипотезы*. Если он приводит к выводу следствий, не известных ранее науке и доступных экспериментальной проверке, то гипотеза становится физической теорией.

**Физическая теория** — система обобщенных знаний, которая описывает, объясняет совокупность явлений реального мира и предсказывает какие-то новые явления или свойства исследуемых объектов. В отличие от практики теория не содержит процесса непосредственного взаимодействия человека с реальным миром. Предметом изучения теории являются абстрактные понятия, со-

зданные мыслью, умом человека на основе практики взаимодействия человека с реальным миром.

*Научная теория* для объяснения известных научных фактов предлагает в качестве гипотезы мысленную модель изучаемых объектов и явлений реального мира, не содержащую внутренних логических противоречий. Из этой гипотезы выводят следствия, неизвестные ранее и допускающие экспериментальную проверку.

Например, господствовавшее в науке на протяжении почти двух тысячелетий мнение, высказанное Аристотелем о том, что тяжелые тела падают на землю быстрее легких, Галилей опроверг, бросая шары различной массы с Пизанской башни. Однако, установив опытным путем законы падения тел на Землю, Галилей не смог объяснить причину их падения. И только И. Ньютон высказал гипотезу, согласно которой причиной падения всех тел является притяжение их к Земле. Затем эта гипотеза, получив математическое оформление, перешла в закон всемирного тяготения, согласно которому масса тела оказалась не только мерой силы притяжения любых тел к Земле, но и мерой силы взаимодействия этих тел с другими телами во Вселенной.

Физическая теория объединяет несколько опытных закономерностей и гипотез и дает объяснение целой области явлений природы с единой точки зрения. Теория позволяет не только объяснять уже наблюдавшиеся явления, но и предсказывать новые. Так, Д. И. Менделеев на основе открытого им периодического закона предсказал существование нескольких новых химических элементов.

Все физические теории построены либо по *методу принципов*, либо по *методу модельных гипотез*.

В основе физической теории, построенной по методу принципов, лежат два-три исходных положения, полученные путем обобщения большого числа экспериментальных фактов. Эти положения составляют принципы теории. Все другие экспериментальные факты объясняются или предсказываются в ходе теоретических построений, опирающихся на эти принципы. Так построена, например, классическая механика, в основе которой лежат три закона Ньютона.

Если физическая теория построена на основе модельной теории, то обычно предлагается какая-либо модель как некий образ, упрощенно характеризующий рассматриваемый материальный объект. Например, можно представить, как «выглядит» атом любого вещества (как он устроен), что удерживает электроны и ядро в едином целом и почему атом во многих явлениях «неде-

лим», каким законам подчиняется движение электронов в атоме, и т. д.

С помощью модели электрона и электромагнитного поля ученые пытаются объяснить различные физические явления (например, электризацию тел, происхождение электрического тока, намагничивание тел). Если объяснение удастся, то модель признается правильной. В ходе познания модель обычно уточняется, углубляется и более точно отражает свойства реального объекта.

Однако физике известны как плодотворные теории, так и ошибочные, не выдержавшие экспериментальной проверки, например теория теплорода. Эта теория объясняла нагревание тел увеличением, а охлаждение — уменьшением содержащегося внутри них теплорода. Но простейшие явления, например нагревание тел при трении, она объяснить не могла.

Заключительным этапом метода научного познания является *экспериментальная проверка* гипотезы или теории. Эксперимент — это специально поставленный опыт, который позволяет практически проверить ту или иную закономерную связь явлений. Например, давление света теоретически предсказал английский физик Дж. Максвелл еще в 1873 г., но экспериментально его обнаружил и измерил русский ученый П. Н. Лебедев только в 1890 г.

До тех пор, пока гипотеза или теоретические выводы, следующие из нее, не подтверждены экспериментально, содержащиеся в них утверждения считаются предположительными. Экспериментально проверяются также устойчивые количественные связи между явлениями, выраженные в виде математических формул. Если такая зависимость установлена, то говорят, что открыт *опытный физический закон*.

В связи с огромной ролью эксперимента в физике ее считают экспериментальной наукой. Но при изучении любого физического явления в равной мере необходимы и эксперимент, и теория.

Нередко теоретические выводы не полностью согласуются с результатами экспериментальных исследований. Обычно это ведет к уточнению (часто к усложнению) гипотезы или приемов вычислений. Изучение явления осуществляется заново, но уже на иных основах, более точно отражающих реальную действительность.

«Наблюдение — теория — эксперимент, и снова все сначала — такова бесконечная, уходящая ввысь спираль, по которой движутся люди в поисках истины», — писал известный отечественный физик Б. Мигдал.

**Физические законы и границы их применимости.** Физический закон устанавливает количественную зависимость одних физи-

ческих величин от других. Законы могут быть получены двумя способами: в результате обобщения данных экспериментов (опытные законы) или путем выводов из известных законов (теоретические законы).

Некоторые законы, открытые опытным путем, позже получили теоретическое объяснение, например опытный закон Архимеда.

Поскольку законы всегда базируются на ограниченном экспериментальном материале, они приближительны и имеют границы применимости.

Следует отметить, что связи между физическими величинами, характеризующими различные физические процессы, бывают двух видов — *динамические* и *статистические*. Динамическими называют такие закономерности, в которые точно известные причины позволяют получать точно известные следствия.

Динамический характер имеют закономерности взаимодействия тел силами всемирного тяготения, действия электромагнитных полей на электрические заряды и многие другие.

Статистическими называют такие закономерности, в которых точно известная причина не позволяет получить точно известное следствие, а указывает лишь вероятность. Статистические закономерности устанавливаются в случае взаимодействия большого числа взаимодействующих тел или неконтролируемого и случайным образом изменяющегося во времени внешнего воздействия на одно тело. Статистический характер имеют все закономерности, описывающие процессы в микромире.

Любые физические теории и законы имеют определенные *границы применимости*. Границы применимости теории определяются, прежде всего, условием применимости физической модели, использованной при создании теории. Экспериментально установленные законы применимы лишь в тех условиях, в которых они установлены.

Например, если в молекулярно-кинетической теории использована модель идеального газа, то выводы и законы этой теории применимы к реальным газам лишь в том случае, если свойства реального газа приближаются к свойствам идеального газа. Закон сохранения энергии установлен экспериментально для изолированных систем, поэтому и ожидать его выполнения можно лишь в изолированных системах.

Классический закон сложения скоростей экспериментально установлен в опытах при значениях скоростей движения тел, значительно меньших скорости света. Поэтому нет оснований для уверенности в его применимости при скоростях движения, близ-

ких к скорости света. И в экспериментах действительно обнаружено, что при скоростях, близких к скорости света, действует другой закон сложения скоростей, названный релятивистским законом сложения скоростей.

## Связь физики с астрономией

Физика изучает общие законы природы, и поэтому многие естественные науки тесно связаны с физикой. В частности, существуют такие смежные разделы этой науки, как биофизика, геофизика, физическая химия и т. п. Но особенно тесно связана с физикой астрономия. Астрономия изучает движение звезд, планет, спутников, процессы, происходящие в атмосфере планет, в звездах и других небесных телах (рис. В.1, В.2). Ведущим разделом современной астрономии является астрофизика.

**Астрофизика — это часть астрономии, которая изучает физические свойства небесных тел и процессы, протекающие в них и в космическом пространстве.**

При этом широко используются физические законы, поэтому она и получила такое название. Так, с одной стороны, астрофизика занимается разработкой и применением физических методов исследования небесных тел, а с другой — на основании законов физики дает объяснение наблюдаемым во Вселенной явлениям и процессам. Например, одним из важнейших методов изучения состава вещества является спектральный анализ, который позволил доказать, что звезды и Земля состоят из одних и тех же химических элементов (атомов), что свидетельствует о *единстве* вещества во Вселенной. Кроме того, астрофизика является важным стимулом для развития современной теоретической физики. Например, вопрос об атомной энергии начал разрабатываться на основе данных об энергетической светимости Солнца и звезд. Наконец, астрономические наблюдения позволяют изучать поведение вещества в таких условиях, которые искусственным путем в земных условиях неосуществимы. С этой точки зрения Вселенную можно рассматривать как неповторимую и неисчерпаемую природную физическую лабораторию. Например, большинство так называемых элементарных частиц было открыто в космосе. Средняя энергия частиц первичного космического излучения (на верхней границе атмосферы) составляет около  $10^4$  МэВ. Отдельные частицы обладают энергией порядка  $10^{12}$  МэВ, т.е. космичес-

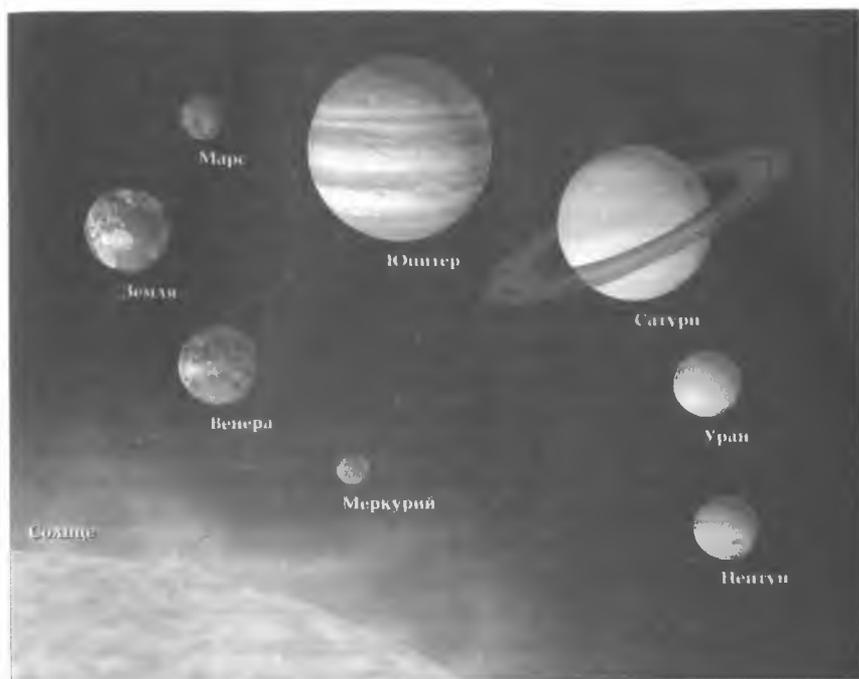


Рис. В.1

кие лучи являются источником *частиц сверхвысоких энергий*, еще не достигнутых в лабораторных условиях. При взаимодействии таких частиц с веществом происходят принципиально новые

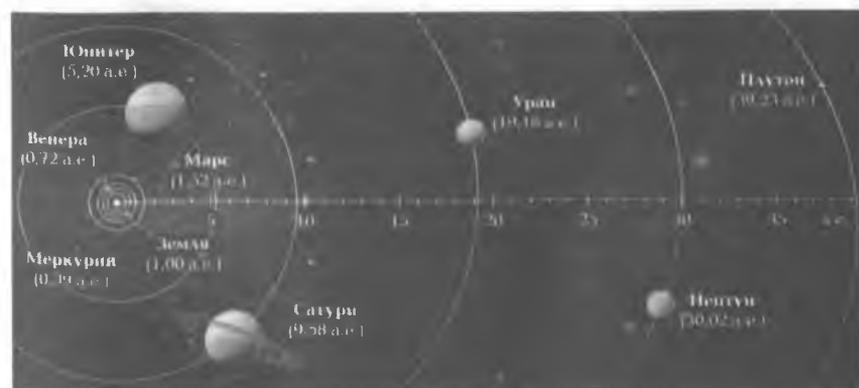


Рис. В.2

ядерные реакции, изучение которых углубляет наши знания о свойствах ядер и элементарных частиц.

**Космос — это природная физическая лаборатория.** В ней интенсивно происходят явления, невозможные в земных условиях (например, нагревание тел до миллионов градусов). В космосе есть небесные тела, подобные Земле, какой она была миллионы лет назад или какой она станет в далеком будущем. Поэтому, изучая космос, человек углубляет свои знания о Земле, в том числе и о самом себе.

**Земля — это мизерная часть Вселенной.** На процессы, протекающие в земной атмосфере, и на жизнедеятельность всех организмов на Земле существенное влияние оказывают другие планеты, а также Солнце и Луна. Это тоже объекты изучения астрофизики — науки, раскрывающей двери перед человечеством в огромнейший, удивительный и прекрасный мир звезд, комет, туманностей и галактик, определившей пространственные и временные масштабы этого динамического и сложного мира.

Раздел астрономии, изучающий происхождение и развитие небесных тел, называется *космогонией* (от греч. *kosmos* — Вселенная и *genos* — происхождение). Космогония отвечает на вопросы, как и когда возникли Вселенная, галактики, звезды, планеты, какие на них происходят физические изменения и процессы.

*Космология* представляет собой учение о Вселенной в целом, о ее наиболее общих свойствах.

Значительно увеличила возможности изучения Земли и других небесных тел *космонавтика* (от греч. *kosmos* + *pautike* — кораблевождение) — наука о полетах в космическое пространство; совокупность отраслей науки и техники, которые проводят исследования и освоение космического пространства для нужд людей с использованием космических летательных аппаратов. Космонавтика решает следующие проблемы: расчет траектории, конструирование космических ракет, двигателей, бортовых систем управления, пусковых комплексов, систем связи и информации, создание бортовых систем обеспечения жизнедеятельности человеческого организма в условиях космического полета и др.

Основоположником космонавтики является выдающийся русский ученый Константин Эдуардович Циолковский (1857 — 1935), который теоретически обосновал возможность покорения космоса с помощью ракет. На практике это осуществил академик Сергей Павлович Королев (1906 — 1966). Начало практической космонавтике было положено 4 октября 1957 г., когда в нашей стране был запущен первый искусственный спутник Земли. Вскоре пос-

ле этого, в 1959 г., были запущены отечественные межпланетные автоматические станции для исследования Луны и получены фотографии ее обратной, не видимой с Земли, стороны. Старт «Востока» 12 апреля 1961 г. с первым в мире космонавтом Юрием Алексеевичем Гагариным (1934 – 1968) на борту открыл век космических полетов.

В 1969 г. американские астронавты Н. Армстронг и Э. Олдрин вышли из космического корабля на поверхность Луны. Космические исследования не ограничиваются изучением Земли и ее спутника Луны.

В настоящее время запущены автоматические межпланетные станции к Марсу, Венере, Юпитеру. Обсуждается идея совместной экспедиции отечественных и американских астронавтов к планете Марс.

Единство законов природы для земных и космических явлений тесно связывает физику и астрономию. Так, движение планет вокруг Солнца и падение тел на землю происходит под действием одной и той же силы — силы тяготения (гравитационной). Движение космических аппаратов осуществляется по законам, которые были открыты на Земле при изучении движения свободно падающих тел.

Развитие астрономии, в частности астрофизики и космонавтики, способствует развитию физики. Вселенная для ученых представляет собой огромную физическую лабораторию. Вещество в ней находится нередко в таких состояниях, которые нельзя получить в земных условиях.

Многие физические открытия были сделаны при анализе явлений в космосе. Так, инертный газ гелий (от греч. *helios* — Солнце) был открыт при исследовании солнечного света, а затем его обнаружили в атмосфере Земли.

## **Роль физики в технике, производственной деятельности человека и в развитии цивилизации**

Развитие физики обусловлено потребностями техники. С одной стороны, необходимость технического прогресса определяет тематику физических исследований, с другой стороны, от уровня развития техники зависят возможности применяемой в научных исследованиях аппаратуры.

Между наукой и производством, наукой и практикой имеются довольно сложные отношения, но независимо ни от чего все эти

виды человеческой деятельности не могут существовать без полной взаимообусловленности и взаимосвязи. Можно привести множество примеров, когда наука (теория) обгоняла практику и, наоборот, практика (техника) влияла на развитие теории.

Известно, что теоретические основы движения тел за пределами земного тяготения были сформулированы в трудах И. Кеплера (1571 – 1630) и И. Ньютона (1643 – 1727), открывших законы движения небесных тел и выяснивших причины этого движения. Однако от теории до практического использования этих законов в космонавтике прошло около трех столетий, пока не были подготовлены технические условия для запуска первого искусственного спутника Земли и полета человека в космос: изготовлены особо прочные материалы для постройки космического корабля, создано горючее для двигателей, разработаны средства управления и связи, а главное — открыт новый вид движения и сконструированы реактивные двигатели и ракеты, способные вывести полезную нагрузку за пределы Земли. Еще одним примером открытия, сделанного «на кончике пера», служит расчет орбиты планеты Нептун, а затем и ее обнаружение в 1846 г. Так было еще раз продемонстрировано величие науки, важное значение теории в процессе познания окружающего мира.

Приведем несколько обратных примеров. Несмотря на то что люди уже давно использовали в практике тепловые явления и даже создали паровые машины, теория тепловых двигателей была предложена С. Карно лишь в 1824 г. и только тогда был показан метод исследования процессов и определения коэффициента полезного действия этих машин. Появились двигатели внутреннего сгорания, холодильные машины и реактивные двигатели.

Физика имеет огромное практическое значение. На основе фундаментальных физических теорий развиваются современная техника и вместе с ней производительные силы общества. В наши дни, в эпоху интенсивного научно-технического прогресса, осуществляется непосредственная связь науки (прежде всего физики) с производством. Этим объясняется невиданный ранее технический прогресс, характерный для современного общества.

Вся современная техника основана на широком применении результатов исследований в физике. Физику поэтому считают основой техники, подчеркивая, что физика сегодня — это техника завтра. Примером, подтверждающим эту мысль, может служить компьютеризация современного производства, проникновение электронно-вычислительной техники во все сферы жизни человека. Движением современных воздушных и океанских лайнеров,

полетом космических кораблей, автоматическими процессами управляют электронно-вычислительные машины (ЭВМ). Они производят сложнейшие математические расчеты и решают задачи в различных отраслях человеческой деятельности (от управления производством до медицины и лингвистики). В настоящее время создаются ЭВМ, производящие несколько миллионов математических операций в секунду. Как же велики силы человеческого ума, создавшего себе такого умного помощника!

Компьютеризация как одно из направлений научно-технического прогресса основана также на достижениях физики, в частности физической электроники, в рамках которой создаются компактные полупроводниковые и магнитные элементы, входящие в конструкции ЭВМ. Пока с компьютеризацией производства в нашей стране дело обстоит несколько хуже, чем в ряде других цивилизованных стран.

На законах физики основана работа разнообразных машин, используемых в промышленности, сельском хозяйстве, железнодорожном, воздушном, автомобильном, водном транспорте. Современная промышленность черной и цветной металлургии, машиностроение, химическая промышленность, станкостроение, пищевая промышленность, промышленность строительных материалов и многие другие отрасли народного хозяйства нуждаются в контроле и управлении технологическими процессами. Контроль и управление технологическими процессами в настоящее время при широко развитой автоматизации производств осуществляются разнообразными теплофизическими, электронными, радиоэлектронными, оптическими приборами и ЭВМ. Поэтому появились целые отрасли приборостроительной промышленности, неразрывно связанные с физическими лабораториями университетов и научно-исследовательских институтов Российской академии наук (РАН). Наука в физических лабораториях становится производительной силой.

Наша жизнь невозможна без энергетики, в основе которой также лежат законы физики из таких ее разделов, как термодинамика, электродинамика, атомная и ядерная физика. О степени развития государства и уровне жизни народа судят по энерговооруженности.

Достижения физики второй половины XX в. глубоко проникли и в другие отрасли научных знаний. Если ранее в области естественных наук происходил процесс обособления, дифференциации отдельных наук (биологии, геологии, химии и др.), то теперь в результате расцвета физических знаний и методов исследования

Библиографический указатель  
Исследования  
Исследования  
Исследования

ний вновь началось их сближение и появились интегративные науки, такие как биофизика, геофизика, физическая химия, химическая физика, агрофизика, астрофизика, радиоастрономия и др. Комплексное изучение физических процессов, происходящих в атмосфере, гидросфере и земной коре, разными науками позволяет оптимально и целенаправленно решать экологические проблемы, связанные с работой промышленности и транспорта.

Люди с древних времен пользовались духовыми и струнными музыкальными инструментами. Однако развитие радиоэлектроники, физики электромагнитных колебаний способствовало созданию принципиально новых музыкальных инструментов. Цветомузыка вышла из периода лабораторных экспериментов и получила путевку в жизнь. Сейчас никого уже не удивляют звуковое, широкоэкранный и широкоформатное кино, стереокино, микрофоны, усилители, видеоманитофоны, стереопроекторы, DVD-проекторы и другие аппараты записи и воспроизведения звука, а ведь в основе всего этого лежит физика!

Вам, может быть, кажется, что мы перегнули палку с высокой оценкой физики как лидера естествознания? Действительно, физика дала человеку не только выход в космос, ЭВМ, атомную энергию, но и трагедию Хиросимы, Нагасаки, Чернобыля. Не несет ли наука человечеству горе и страдания? Не следует ли в связи с этим притормозить развитие науки? Как бы вы ответили на эти вопросы? А вот что сказал по этому поводу известный физик А. Эйнштейн: «Открытие деления урана угрожает цивилизации не более чем изобретение спичек. Дальнейшее развитие человечества зависит от его моральных устоев, а не от уровня технических достижений». Подумайте над тем, как бы вы развили и обосновали эту мысль (подискутируйте с А. Эйнштейном).

Притормозить и остановить развитие науки нельзя. Наука обеспечивает развитие производства, при этом возникают новые вопросы, нуждающиеся в научных ответах. Потребности производства являются движущей силой развития науки. Но дело не только в этом. Выдающийся французский физик Луи де Бройль отмечал: «Научный прогресс во многом обязан чувству. Если он существует, то потому, что люди любили и любят науку». И эта любовь неистребима, так как человек — мыслящее существо. «Мысль — значит существо», — подчеркивал французский мыслитель Р. Декарт. А мысли не остановишь. Останавливать надо не мысль, не науку, а безнравственные действия людей, которые в варварских и бесчеловечных целях используют самые выдающиеся достижения человеческого ума. Физику, как правило, делают люди с

чистой совестью. Вот несколько штрихов к портретам отдельных физиков, отражающих их мысли и поступки.

Пьер Кюри — известный французский физик, изучавший радиоактивность, — подверг радиоактивному излучению свою руку, чтобы исследовать его физиологическое действие, тогда еще никому не известное. Возникла большая язва, которая медленно заживала, а он скрупулезно описывал воздействие излучения на руку и ход заживления язвы. В ответ на сообщение о представлении его к ордену он ответил: «Прошу Вас, будьте любезны передать господину министру мою благодарность и осведомить его, что я не имею никакой нужды в ордене, но весьма нуждаюсь в лаборатории». На вечере, посвященном его чествованию, главным занятием П. Кюри был подсчет в уме числа физических лабораторий, которые можно было бы оборудовать на выручку от продажи золотых и бриллиантовых украшений, принадлежащих дамам высшего общества, присутствовавшим на этом торжестве.

Как видим, роль физики в материальной и духовной жизни человека настолько велика, что ее элементы подобно литературе и музыке несомненно должны быть достоянием каждого культурного человека. По мнению лауреата Нобелевской премии профессора И. А. Раби, физика составляет сердцевину гуманитарного образования нашего времени.

## Понятие о физической картине мира

Чрезвычайно велико философское значение физики. Представление о строении и развитии Вселенной в свете последних научных открытий, а также законов, описывающих известные формы движения материи, составляет современную физическую картину мира — основу научного мировоззрения. В то же время возникает вопрос: является ли эта картина вполне законченной, истинно отражающей реально существующий мир?

Стремление создать единую теорию, объясняющую общее развитие природы как на Земле, так и во всей Вселенной, имеет давнюю историю. Еще в XVIII в. сложилась механическая картина мира. Ученым того времени казалось, что закон всемирного тяготения и законы динамики И. Ньютона объясняют не только устойчивость Солнечной системы, но и всевозможные движения в окружающей человека природе, во Вселенной.

Основной смысл механической картины мира образно выразил один из создателей теоретической механики французский ученый

П. Лаплас: «Дайте мне начальные условия, и я рассчитаю весь мир». Следовательно, все многообразие явлений во Вселенной сводилось к чисто механическому движению.

В XIX в. началась коренная ломка общих представлений о законах природы, радикально изменившая все наше миропонимание. Благодаря развитию учения о свойствах света, а также электродинамике Д. К. Максвелла физика окончательно была освобождена от оков чисто механической картины мира, которая не могла объяснить многие наблюдаемые явления в природе. Началось становление новой электромагнитной, или классической, картины мира, в рамках которой механическое взаимодействие частиц и тел дополнялось электромагнитным взаимодействием. Однако незыблемым принципом, провозглашенным еще И. Ньютоном, оставался *принцип абсолютного пространства и времени*. Считалось, что пространство одинаково всегда и везде и не зависит ни от физических тел, которые в нем находятся, ни от явлений, которые в нем происходят. Образно говоря, пространство — это сцена, на которой разыгрываются реальные события. Но даже если на сцене нет «актеров», сцена остается сценой. В том же смысле говорилось и о времени. Оно течет само по себе равномерно во всех точках пространства и ни от каких физических процессов и явлений не зависит. Согласно классической картине мира Вселенная бесконечна в пространстве и времени и в целом абсолютно неизменна. Она всегда была таковой, какова сейчас, и всегда таковой останется. Только отдельные тела во Вселенной имеют свою историю. Они возникают, развиваются, гибнут. Из вещества погибших тел образуются новые тела. Говорить же об истории самой Вселенной не имеет смысла.

В XX в. в связи с открытием релятивистских и квантовых законов физики произошел очередной революционный переворот в стиле человеческого мышления. Он расширил его рамки и принципы, уверенно вывел науку за пределы наглядного, в глубины мировоззрения. Современная физика овладела и оперирует формальным с такой же легкостью и уверенностью, как и наглядным. В этом неоценимый вклад новой физики в общечеловеческую культуру. При этом классическая картина мира уступила место современной. Эта смена происходила в упорной борьбе идей, гипотез, теорий. Наиболее важные из этих теорий — теория относительности, квантовая теория, теория горячей Вселенной — лежат в основе современной физической картины мира.

Итак, анализируя изложенное, мы видим, что по мере развития науки одна картина мира сменяла другую. Вот почему нельзя ут-

верждать, что современная картина мира не будет заменена в будущем более совершенной.

Но тогда возникает вопрос: какой смысл ее изучать, а тем более классическую физику? На этот вопрос дал исчерпывающий ответ выдающийся датский физик, лауреат Нобелевской премии Нильс Бор. Он выдвинул принцип, согласно которому

**новая теория не отменяет старую теорию, а только включает ее в себя как частный предельный случай.**

Действительно, при решении многих практических задач вполне устраивает классическая физика. Чтобы построить дом, собрать автомобиль или токарный станок, запустить искусственный спутник Земли, достаточно прочных знаний классической физики. Однако создать лазер, атомный ледокол или термоядерный реактор без знаний современной физики уже нельзя.

В то же время, не изучив классическую физику, невозможно понять квантовую теорию и теорию относительности. Также невозможно осмыслить проблемы современной астрофизики и теорию горячей Вселенной, не разобравшись в вопросах элементарной астрономии, которая начинается с визуальных наблюдений неба.

Мир — это единое целое, и человек может и должен создать в своем сознании общую картину природы. Уверенность в этом была и остается источником неиссякаемого оптимизма и необычайной настойчивости, с которыми физики всех эпох искали и ищут общие законы природы, из которых складывается обобщенный образ, модель природы, лежащая в основе нашего миропонимания. «Человек стремится каким-то адекватным способом создать в себе прочную и ясную картину мира. Высшим долгом физиков является поиск тех общих элементарных законов, из которых можно получить картину», — отмечал А. Эйнштейн. Можно забыть законы Архимеда и Ома, явление диффузии и многое другое, что есть в физике (если твоя профессия не связана с точными науками), и быть культурным человеком. Однако у каждого из вас в результате изучения физики должно сложиться прежде всего общее понимание того, как устроен мир, т. е. *физическая картина мира*. Таким образом,

**физика как наука, дающая методологические и мировоззренческие знания и нормы мышления, есть важнейший элемент общечеловеческой культуры.**



## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ

1. Как понимают термин «физика» в современной науке?
2. Что такое материя?
3. Каковы структурные уровни организации материи?
4. Что изучает физика? В чем состоит задача физики?
5. Какие науки о природе вам известны? Связаны ли они между собой?
6. Почему физику считают лидером естествознания?
7. Как связаны между собой физика и астрономия?
8. Как связаны между собой физика и техника, физика и производство?
9. Что представляет собой естественно-научный метод познания?
10. Что представляют собой физические законы и каковы границы их применимости?
11. Используя свои наблюдения за окружающим миром, приведите примеры, иллюстрирующие применение физики в производстве и технике.
12. В какие сферы жизни, по вашему мнению, еще не проник научно-технический прогресс?
13. С вашей точки зрения, не несет ли наука человечеству страдания?
14. Какую роль играет физика в жизни современного общества?
15. Какое место занимает физика в системе культуры в условиях научно-технического прогресса?
16. В чем заключаются общечеловеческие ценности физики?
17. Что представляет собой современная физическая картина мира?
18. Каковы перспективы и направления развития современной научной картины мира?



## Темы докладов и рефератов

1. Материя, формы ее движения и существования.
2. Первый русский академик М.В.Ломоносов.
3. Великий Н.Коперник и революция в естествознании.
4. К.Э.Циолковский — основоположник космонавтики, ученый и патриот.
5. Достижения современной космонавтики и перспективы ее развития.
6. Искусство и процесс познания.
7. Физика и музыкальное искусство.
8. Воздействие света на произведения искусства.
9. Цветомузыка.
10. Физика в современном цирке.

ИТАК УДИИ БУДИНО

Раздел I

**ФИЗИЧЕСКИЕ  
ОСНОВЫ МЕХАНИКИ**



### 1.1. Общие сведения о движении

**Классическая механика** — фундаментальная физическая теория. Основы классической механики, которые были сформулированы в XVII в. Галилеем и Ньютоном, считались незыблемыми более двух столетий до тех пор, пока в конце XIX в. и начале XX в. не были обнаружены явления, которые невозможно было объяснить на ее основе.

Однако первоначальные представления, с которых ведет свое существование механика, были заложены в трудах Аристотеля (384 — 322 до н. э.) в IV в. до н. э. Древнегреческие ученые, к числу которых принадлежал Аристотель, утверждали, что главное средство изучения природы — размышление, его помощник — наблюдение.

В своем трактате «Физика», состоящем из восьми книг, Аристотель обобщил известные в те времена физические знания и высказал следующие взгляды на природу:

- «Земля является центром Вселенной, вокруг нее движутся все остальные планеты, Солнце и звезды»;
- «движется только движимое», т. е. только то, к чему приложена сила;
- «пространство и время конечны: за сферой неподвижных звезд нет ни пространства, ни времени, ни движения» и т. д.

Именно с этих законов, далеких от истины, началось существование механики. Вместе с тем Аристотель сделал ряд правильных выводов, в частности дал достаточно полную классификацию механических движений, сформулировал закон прямолинейного

распространения света. Хотя представления Аристотеля во многом были неверны, они оставались неизбежными около двух тысячелетий, поскольку согласовывались с повседневным жизненным опытом человечества.

Позднее другой древнегреческий ученый Архимед (ок. 287 — 212 до н. э.) установил законы, которые дали толчок дальнейшему развитию физического знания, в том числе механики. Он сформулировал «золотое» правило механики, вывел формулу выталкивающей силы, действующей на тело, погруженное в жидкость, и т. д.

Родоначальником экспериментального метода физики был итальянский физик Галилео Галилей (1564 — 1642), который сумел преодолеть многие ошибочные представления Аристотеля. Он доказал, что для сохранения состояния движения не нужна принудительная «движущая сила». Галилей, наблюдая движение тела по наклонной плоскости вверх и вниз, пришел к выводу, что не скорость, а ускорение пропорционально действующей силе. Далее Галилей установил, что «скорость, однажды сообщенная движущемуся телу, строго сохраняется, если устранены внешние причины ускорения или замедления» (закон инерции). Галилей также полагал, что с точки зрения механики совершенно равноправны тело, находящееся в покое, и тело, которое равномерно и прямолинейно движется, и что любой механический опыт, поставленный на равномерно и прямолинейно движущемся теле, будет протекать точно так же, как если бы оно покоилось (принцип относительности в механике). Таким образом, Галилей заложил основы механики как науки о движении.

Идеи Галилея успешно развил английский ученый Исаак Ньютон, который создал первую фундаментальную физическую теорию — классическую механику. Он сформулировал законы движения и взаимодействия тел, открыл закон всемирного тяготения, на основе которого можно рассчитать движение небесных тел, объяснить причины морских приливов и отливов действием Луны и т. д.

Ньютон считал, что открытые им законы движения едины для всех механических процессов, потому что в природе существует единое, так называемое *абсолютное*, время, которое «само собой и по самой своей сущности без всякого отношения к чему-либо внешнему протекает равномерно и иначе называется длительностью». Он полагал также, что все тела природы размещены в однородном и неподвижном пространстве, законы которого определяются геометрией Эвклида. Движение тел относительно этого

пространства ученый рассматривал как абсолютное движение, а законы этих движений — как абсолютные законы, обязательные для всех тел Вселенной. Свои взгляды Ньютон изложил в книге «Математические начала натуральной философии» (1687).

Современная наука называет механику, построенную на идеях Ньютона, *классической механикой* (от лат. *classic* — образец). Ее построение (структура) послужило для ученых образцом при создании других физических теорий. Фундаментальный характер классической механики состоит в том, что ее основные понятия (масса, энергия, импульс, сила и др.) и законы широко используются в других физических теориях, а также позволяют объяснить все многообразие механических явлений и служат научной базой для создания огромного числа различных машин, механизмов, технических устройств, основанных на движении тел, — от обычного велосипеда до космической ракеты.

Классическая механика (и классическая физика в целом) описывает привычный нам мир, масштабы которого сравнимы с обычными расстояниями.

**Пространство и время.** По современным представлениям наша Вселенная возникла примерно 15 — 20 млрд лет назад в результате взрыва огромной силы, который породил множество осколков из некоего плотного и горячего *протовещества*, разлетающихся во все стороны с огромными скоростями. Иначе говоря, мы живем в расширяющейся Вселенной. Это расширение, как и все другие процессы в природе, происходит в пространстве и во времени.

Что же такое — пространство и время? У каждого человека с детства на основе личного жизненного опыта вырабатываются определенные интуитивные представления об этих понятиях, кажущихся на первый взгляд весьма простыми. Действительно, время — это то, что показывают часы, а пространство — это существование в природе физических тел, занимающих определенный объем. Но по мере взросления, когда человек больше узнает об окружающем мире, для него эти понятия наполняются более глубоким смыслом. В физике нет ни одного закона, явления, процесса, которые не включали бы в себя пространственные и временные характеристики.

Пространство и время — фундаментальные физические понятия, связанные с формами существования материи. Их нельзя четко определить, но можно описать.

Чередование различных событий, а также возникновение и прекращение многообразных процессов, различающихся своей

длительностью, определяют то, что мы называем *временем*. В более строгом определении время выражает порядок смены физических состояний каких-либо событий и является объективной характеристикой физического процесса или явления.

Промежутки времени между событиями определяются с помощью показаний часов — приборов, в основу которых положены какие-либо повторяющиеся процессы или явления. Примером таких процессов могут служить колебания маятника, вращение Земли вокруг собственной оси, колебания атомов и др. В средние века часто использовались песочные часы. Современными наиболее точными часами являются атомные часы, с помощью которых в настоящее время устанавливается основная единица времени — секунда (с).

Основными свойствами времени являются одномерность и однородность. *Одномерность* времени проявляется в том, что для указания момента изучения какого-то события или длительности какого-либо процесса достаточно одного числа. Например, можно указать дату события, считая от Рождества Христова. *Однородность* времени проявляется в постоянстве законов природы, т. е. они справедливы всегда (вчера, сегодня, завтра).

Существование протяженности у материальных объектов, наличие у них границ и внутренней структуры определяет понятие *пространства*. Опыт свидетельствует о том, что

**пространство является трехмерным, однородным и изотропным.**

*Трехмерность* физического пространства означает, что положение любой точки или места, в котором происходят какие-либо события, определяется тремя числами —  $x$ ,  $y$ ,  $z$ , называемыми пространственными координатами (рис. 1.1). *Однородность* физического пространства проявляется в том, что одни и те же законы действуют одинаково во всех уголках Вселенной. *Изотропность* физического пространства проявляется в постоянстве физических законов по всем направлениям.

В пространственной структуре нашего мира различают три уровня:

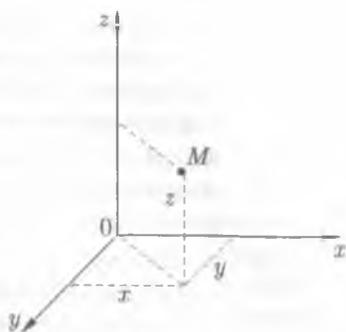


Рис. 1.1

- **мегамир** — мир огромных астрономических масштабов и скоростей, расстояние в котором измеряется световыми годами, а время существования космических объектов (галактик, звезд) — миллионами и миллиардами лет;
- **макромир** — мир, в котором мы живем, наблюдая окружающие нас тела — от песчинки до планет Солнечной системы;
- **микромир** — мир молекул, атомов, элементарных частиц (электронов, протонов и т. д.), пространственная размерность которых составляет  $10^{-16}$ — $10^{-6}$  см, а время жизни — от  $10^{-24}$  с до бесконечности.

В классической механике будем рассматривать лишь те явления, которые происходят на уровне макромира.

**Механическое движение.** В окружающем нас мире все находится в непрерывном движении: движутся люди, детали машин и механизмов, планеты и звезды, вода и воздух, мельчайшие частицы вещества (атомы и молекулы) и галактики. Простейшей формой движения является механическое движение.

**Механическое движение** — это изменение с течением времени взаимного расположения тел или их частей относительно друг друга.

Каждый из нас обычно легко отличает движущееся тело от неподвижного. Если положение тела меняется относительно окружающих его других тел, то считаем, что тело движется, если не меняется — тело покоится.

В окружающем нас мире нет абсолютно неподвижных тел. Движутся все тела и частицы, из которых эти тела состоят. Например, столы в аудитории неподвижны относительно самой аудитории и относительно друг друга, но в то же время они вместе с Землей движутся относительно Солнца, участвуя в суточном вращении Земли. Механическое движение относительно; относительно и состояние покоя. *Относительность является важным и неотъемлемым свойством любого механического движения.* Понятие относительности движения можно проиллюстрировать примером (рис. 1.2): во время заправки реактивных самолетов в полете самолеты относительно поверхности



Рис. 1.2

Земли движутся со скоростями в несколько сот километров в час, тогда как относительно друг друга они покоятся.

**Система отсчета.** Для изучения движения какого-либо объекта прежде всего нужно выбрать тело, относительно которого рассматривается движение. Такое тело обычно называют *телом отсчета*. Любое тело может служить телом отсчета, однако выбор не каждого из них оказывается удобным. Так, перемещение автомобиля удобнее рассматривать относительно Земли, а не Солнца или Луны. Наоборот, движение планет целесообразнее (поскольку их траектории будут более простыми) рассматривать относительно Солнца, а не Земли или другой планеты. Для описания изменения положения предметов на Земле чаще всего за тело отсчета принимают тело, неподвижно связанное с Землей (дом, телеграфный столб, дерево и т. д.).

Если заранее не условиться о выборе тела отсчета, то будет непонятно, о каком движении идет речь. Пусть, например, на палубе теплохода, плывущего по реке, сидит пассажир. С точки зрения наблюдателя, находящегося на палубе, пассажир не движется. Стоящий же на берегу реки наблюдатель увидит его перемещение. Если по берегу реки едет автомобиль параллельно плывущему теплоходу с такой же скоростью, то относительно автомобиля теплоход и пассажир на его палубе не изменяют своего положения.

С телом отсчета обычно связывают *систему координат* (см. рис. 1.1). Положение движущегося тела  $M$  (на рис. 1.2 — самолет) определяется в каждый момент времени  $t$  тремя координатами:  $x$ ,  $y$ ,  $z$ . Координаты с течением времени изменяются, т. е. представляют собой функции времени. Если движение происходит в плоскости, то за систему координат удобно принять две взаимно-перпендикулярные прямые  $Ox$  и  $Oy$ , лежащие в той плоскости, в которой перемещается тело (на рис. 1.3 — автомобиль). Наконец, когда тело движется прямолинейно, то одну из координатных осей (например,  $Ox$ ) можно совместить с прямой, по которой движется тело, и надобность в остальных двух осях отпадает.

Для полного описания движения кроме тела отсчета и системы координат нужно выбрать еще способ измерения времени. Время измеряют с помощью часов, неподвижных относительно тела отсчета.

**Тело отсчета, связанную с ним систему координат и выбранный способ измерения времени принято называть *системой отсчета*.**

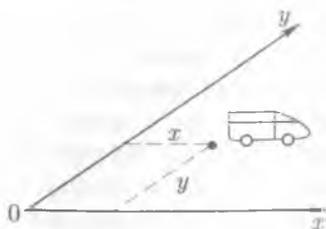


Рис. 1.3



Рис. 1.4

Для описания движения тела в выбранной системе отсчета нужно знать, как с течением времени изменяются координаты движущегося тела.

**Материальная точка.** Любое тело имеет бесконечное множество точек, поэтому указать его точное положение в пространстве практически невозможно, так как необходимо указывать координаты всех точек тела. Указать координаты всех точек тела при его движении еще сложнее, поскольку эти координаты при движении постоянно меняются.

В том случае, когда размерами тела можно пренебречь, движение всех точек тела можно не рассматривать, а достаточно рассмотреть движение только одной его точки, в которой сосредоточена вся масса тела.

**Тело, размерами и формой которого в условиях данной задачи можно пренебречь, называют материальной точкой.**

Словом «материальная» подчеркивается ее отличие от геометрической точки, не обладающей вообще никакими физическими свойствами, по крайней мере массой.

Какое тело можно рассматривать как материальную точку, зависит не от размеров самого тела, а от конкретных условий задачи. Одно и то же тело в одних случаях может считаться материальной точкой, в других — должно рассматриваться как протяженное тело. Например, космический корабль с точки зрения наблюдателя, находящегося в Центре управления полетом на Земле, может рассматриваться как материальная точка, но для космонавта, переходящего на этот корабль из космической станции, он имеет протяженные размеры.

**Траектория, путь и перемещение.** Тело (материальная точка) движется в пространстве по определенной линии.

**Линия, которую описывает тело при своем движении, называется траекторией.**

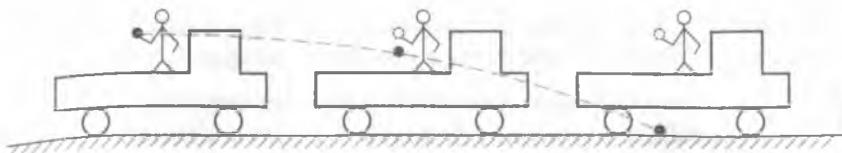


Рис. 1.5

Если траектория тела — прямая линия, то движение называется прямолинейным (рис. 1.4, а). Если она представляет собой кривую линию, то движение называется криволинейным (рис. 1.4, б).

Траекторию реактивного самолета, летящего на большой высоте, мы видим благодаря оставляемому им за собой туманному белому следу, траекторию автомобиля или велосипеда — благодаря отпечаткам шин колес на влажной дороге. Форма траектории зависит от выбора системы отсчета. Допустим, что за борт едущего равномерно по прямолинейному участку шоссе грузовика уронили предмет (рис. 1.5). По отношению к автомобилю этот предмет падает вертикально, тогда как относительно шоссе он движется по кривой линии.

Рассмотрим другой пример: движение точек пропеллера самолета, летящего горизонтально, относительно самолета и относительно Земли. Понятно, что относительно самолета точки описывают окружность, но относительно Земли их траектории имеют форму винтовой линии, поскольку они движутся вместе с самолетом в горизонтальном направлении (рис. 1.6).

**Путь** — это расстояние, пройденное телом вдоль траектории.

Если измерить пройденное точкой расстояние от начального пункта движения до конечного вдоль траектории, то получим *длину пути*  $s$  (или просто путь), который точка прошла за некоторый промежуток времени.

Путь, как и всякая длина, — величина скалярная; он измеряется в метрах (или других единицах длины) и показывает, как далеко переместилась точка по своей траектории, но ничего не говорит о том, в какую сторону она переместилась и где находится в данный момент. Для опре-

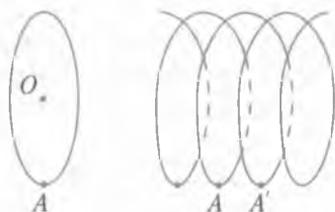


Рис. 1.6

деления положения тела в произвольный момент времени надо знать не пройденный им путь, а его перемещение.

**Перемещением  $\vec{r}$**  называют вектор, проведенный из начального положения движущейся точки в ее положение в настоящий момент (рис. 1.7).

Физический смысл перемещения заключается в том, что оно показывает, на какое расстояние и в каком направлении сместилось тело за данное время.

Путь и перемещение — разные физические величины. Поясним это. Предположим, что рыбак должен перебраться с одного берега озера на другой (рис. 1.8). Он может обойти озеро в одном или другом направлении или же переплыть на лодке. В любом случае конечная точка (перемещение  $\vec{AB}$ ) одна и та же, но путь рыбака в каждом случае будет неодинаковой длины. Вектор перемещения, вообще говоря, не совпадает с траекторией точки. Они совпадают только при прямолинейном движении.

Из рис. 1.8 видно также, что в общем случае пройденный рыбаком путь  $AB$  не равен модулю вектора перемещения  $\vec{AB}$ :  $AB \neq |\vec{AB}|$ . Более того, в случае замкнутой траектории, т. е. когда начальная и конечная точки траектории совпадают, перемещение равно нулю, в то время как пройденный путь может исчисляться километрами.

**Равномерное прямолинейное движение. Скорость.** Простейший вид механического движения — это *равномерное прямолинейное движение*, при котором материальная точка за любые равные промежутки времени совершает одинаковые перемещения. Примером этого движения может служить падение шарика в масле, снижение парашютиста вблизи поверхности Земли с раскрытым парашютом и т. д.

**Скорость** — векторная величина, характеризующая быстроту и направление движения тела.



Рис. 1.7



Рис. 1.8

В случае равномерного прямолинейного движения скоростью называют векторную величину, численно равную отношению перемещения ко времени, за которое оно совершено. Отсюда следует, что скорость равномерного прямолинейного движения показывает, какое перемещение совершает материальная точка за единицу времени. Таким образом, скорость измеряется отношением перемещения  $\vec{r}$  за промежуток времени  $t$  к этому промежутку времени:

$$\vec{v} = \frac{\vec{r}}{t}. \quad (1.1)$$

Единица измерения скорости в СИ — 1 м/с.

В случае прямолинейного движения скорость направлена так же, как и перемещение (рис. 1.9, а), а при криволинейном — по касательной к траектории (рис. 1.9, б).

**Сложение перемещений и скоростей.** Система отсчета, относительно которой рассматривается движение тела, сама может перемещаться относительно какой-то иной системы отсчета, принимаемой за неподвижную. Например, система отсчета, связанная с вагоном поезда, движется по отношению к системе, связанной со станцией. Рассмотрим, как можно определить перемещение и скорость пассажира в неподвижной системе отсчета «станция», зная его перемещение и скорость в подвижной системе отсчета «вагон» и относительное движение этих систем.

Итак, пассажир идет по вагону и вместе с ним движется относительно станции. За время  $t$  перемещение вагона равно  $\vec{r}_1$ , а пассажира в вагоне  $\vec{r}_2$ . Тогда перемещение пассажира относительно станции

$$\vec{r} = \vec{r}_1 + \vec{r}_2. \quad (1.2)$$

Если пассажир идет по ходу поезда, то направления векторов  $\vec{r}_1$  и  $\vec{r}_2$  совпадают (рис. 1.10, а), перемещение  $\vec{r}$  направлено так же, как  $\vec{r}_1$  и  $\vec{r}_2$ , а его модуль (длина) равен сумме модулей (длин) векторов  $\vec{r}_1$  и  $\vec{r}_2$ :

$$r = r_1 + r_2.$$

Если пассажир идет против хода поезда, то векторы  $\vec{r}_1$  и  $\vec{r}_2$  имеют противоположные направления (рис. 1.10, б), перемещение

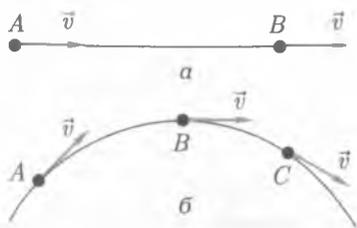


Рис. 1.9

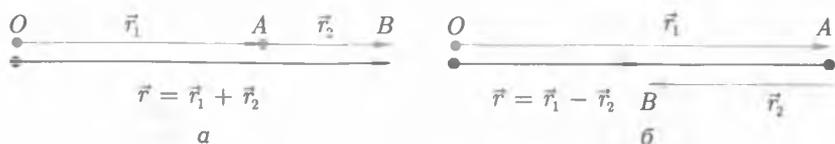


Рис. 1.10

$\vec{r}$  направлено в сторону большего из них ( $\vec{r}_1$ ), а его модуль равен разности модулей векторов  $\vec{r}_1$  и  $\vec{r}_2$ :

$$r = r_1 - r_2.$$

Рассмотрим, как складываются перемещения, образующие между собой некоторый угол, например при полете самолета в ветреную погоду. Пусть самолет летит с запада на восток со скоростью  $\vec{v}_1$  относительно воздуха, а дующий в это время южный ветер имеет скорость  $\vec{v}_2$  относительно поверхности Земли. Тогда самолет будет перемещаться относительно воздуха с запада на восток и вместе с ветром на север. За время  $t$  его перемещение будет:  $\vec{r}_1 = \vec{v}_1 t$ , а вместе с воздухом (телом отсчета) на юг  $\vec{r}_2 = \vec{v}_2 t$ . Отложим от точки  $A$  перемещение  $\vec{r}_1$  самолета относительно воздуха и перемещение  $\vec{r}_2$  самолета вместе с воздухом по отношению к Земле (рис. 1.11). В результате этих двух перемещений самолет попадет в точку  $B$ . Таким образом, определение суммарного перемещения  $\vec{r}$  сводится к нахождению диагонали параллелограмма, сторонами которого служат перемещение самолета относительно воздуха  $\vec{r}_1$  и его перемещение вместе с воздухом  $\vec{r}_2$ . Это правило сложения двух перемещений часто называют *правилом параллелограмма*, его смысл ясен из рис. 1.11. По правилу параллелограмма складываются и

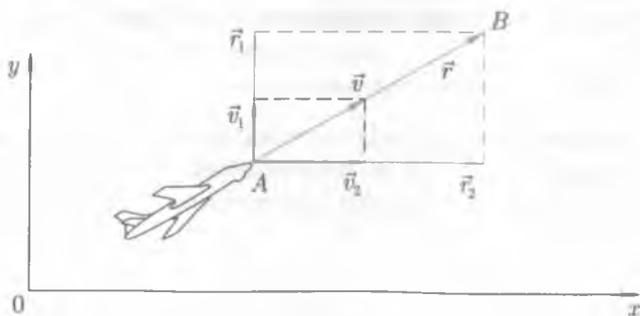


Рис. 1.11

скорости, поскольку скорость движения определяется перемещением тела в единицу времени.

В качестве примера рассмотрим использование правила сложения скоростей при запуске искусственных спутников Земли. Для вывода спутника на орбиту ему надо сообщить относительно центра Земли скорость около 8 км/с. Вследствие вращения Земли спутник, находясь еще на ее поверхности, обладает скоростью  $\vec{v}_1$ , равной скорости движения места запуска. Если спутник запускается в восточном направлении, то его скорость равна  $\vec{v}_1 + \vec{v}_2$ , где  $\vec{v}_2$  — скорость, сообщаемая ему реактивными двигателями. Значит, двигатели сообщают ему в этом случае скорость, меньшую 8 км/с на  $\vec{v}_1$ . При запуске спутника в западном направлении его скорость будет  $\vec{v}_1 - \vec{v}_2$  и ракетные двигатели должны сообщить ему скорость, большую 8 км/с на  $\vec{v}_1$ . Таким образом, спутники выгоднее запускать в восточном направлении и с малых широт (где больше  $\vec{v}_1$ ). Поэтому космодромы, откуда производятся запуски космических кораблей и спутников, целесообразнее строить поближе к экватору.

## 1.2. Неравномерное прямолинейное движение

Наблюдая движение автобуса, трамвая, поезда, мы замечаем, что на одних участках пути они движутся быстрее, на других — медленнее, а на остановках скорость их движения равна нулю. Иными словами, скорость движения этих тел изменяется с течением времени. Такого рода движение называют *неравномерным*, или *переменным*.

**Средняя скорость.** На рис. 1.12 показаны положения санок, которые сначала скатываются по наклонной плоскости (ледяной поверхности горки), а затем движутся по горизонтальному участку, через равные промежутки времени. Сравнивая перемещения са-

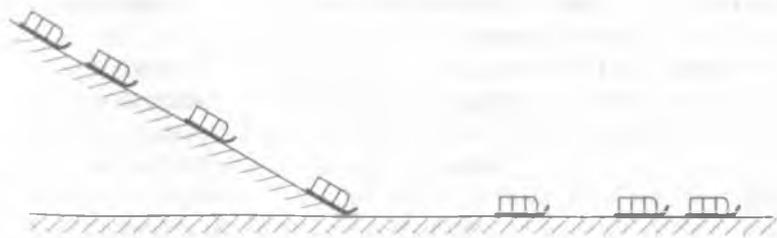


Рис. 1.12

нок за одинаковые промежутки времени, видим, что при скатывании санок с ледяной горки расстояние между ними увеличивается, следовательно, скорость санок возрастает. Скатившись с горки, санки постепенно замедляют свое движение — за равные промежутки времени уменьшается расстояние, пройденное санками.

При неравномерном движении тело совершает за одинаковые промежутки времени неодинаковые перемещения. Скорость такого перемещения изменяется от одной точки траектории движения до другой. Для характеристики переменного (неравномерного) движения пользуются понятием *средней скорости*.

**Для нахождения средней скорости на данном участке пути (или за данное время) надо пройденный телом путь разделить на время его движения:**

$$v_{\text{ср}} = \frac{s}{t}. \quad (1.3)$$

Если тело проходит участки пути  $s_1, s_2, s_3, \dots, s_n$  соответственно за время  $t_1, t_2, t_3, \dots, t_n$ , то средняя скорость

$$v_{\text{ср}} = \frac{s_1 + s_2 + s_3 + \dots + s_n}{t_1 + t_2 + t_3 + \dots + t_n}.$$

Приведем пример расчета средней скорости при переменном движении. Троллейбус, двигаясь с остановками по прямолинейному участку дороги, за три часа переместился на 114 км. Определим среднюю скорость его движения:

$$v_{\text{ср}} = \frac{114 \text{ км}}{3 \text{ ч}} = 38 \text{ км/ч}.$$

Средняя скорость дает представление только о быстроте прохождения пути. Она не определяет направления движения и является скалярной величиной.

**Мгновенная скорость.** Часто на практике нужно знать скорость не среднюю, а в определенный момент времени или, что то же самое, в данной точке траектории. Например, для расчета движения космического корабля важно знать его скорость в момент отделения ступеней ракеты-носителя, при прекращении работы двигателей, в момент вхождения в плотные слои атмосферы при спуске и т. д.

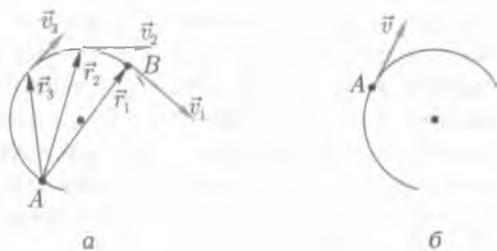


Рис. 1.13

**Скорость, которую имеет тело в данный момент времени (в данной точке траектории), называют *мгновенной скоростью*.**

Мгновенная скорость — векторная величина. Спидометры, устанавливаемые на автомобилях, мотоциклах, показывают модуль (численное значение) этой скорости.

Для выяснения физического смысла мгновенной скорости удобнее рассмотреть движение тела по криволинейной траектории  $AB$  (рис. 1.13, *a*) за время  $t_1$ .

Сравним среднюю скорость за достаточно малый промежуток времени с мгновенной скоростью в точке  $A$ . Средняя скорость на участке  $AB$  рассчитывается по формуле  $\vec{v}_1 = \vec{r}_1/t_1$ , где  $\vec{r}_1$  — перемещение тела. Уменьшая одновременно участок траектории (и соответственно перемещение) и промежутки времени ( $t_1 > t_2 > t_3 \dots$ ), получим среднюю скорость на каждом участке:  $\vec{v}_2 = \vec{r}_2/t_2$ ;  $\vec{v}_3 = \vec{r}_3/t_3$  и т.д. С уменьшением перемещения исчезает разница между дугой и хордой, стягивающей эту дугу. Промежуток времени может быть настолько мал ( $\Delta t \rightarrow 0$ ), что за это время можно пренебречь изменением скорости, а движение можно считать равномерным и прямолинейным. В этом случае среднюю скорость можно считать мгновенной скоростью в точке  $A$  (рис. 1.13, *б*).

Таким образом, для нахождения мгновенной скорости в данной точке траектории нужно очень малое перемещение  $\Delta \vec{r}$  на участке, включающем эту точку, разделить на очень малый промежуток времени  $\Delta t$ , за который это перемещение произошло. Математически это можно выразить так:

$$\vec{v} = \frac{\Delta \vec{r}}{\Delta t}. \quad (1.4)$$

Под символом «lim» (предел) записывается условие, при котором выполняется предельный переход. В рассматриваемом случае — это стремление к нулю промежутка времени ( $\Delta t \rightarrow 0$ ). Поэтому *мгновенной скоростью называют предел, к которому стремится средняя скорость за бесконечно малый промежуток времени*

Скорость равномерного прямолинейного движения тела является его мгновенной скоростью, так как она одинакова в любой момент времени и в любой точке траектории.

При криволинейном движении мгновенная скорость в любой точке траектории направлена по касательной к кривой в этой точке (см. рис. 1.13, б). Примером могут служить искры, возникающие при заточке ножа на вращающемся наждачном круге. Они летят с такой же скоростью, какую каждая из них имела в последний момент времени движения вместе с точильным камнем. Направление движения искр (раскаленных частиц) совпадает с касательной к окружности в той точке, где стальной предмет (нож) касался камня.

При прямолинейном движении касательная совпадает с траекторией (прямой линией).

**Ускорение.** При переменном движении в одних случаях скорость может изменяться очень быстро, в других — медленно. Например, поезд приобретает скорость 20 км/ч в течение 45...50 с, а ракета при запуске за несколько минут получает скорость 2 000...5 000 м/с. Для характеристики быстроты изменения скорости тела вводят понятие ускорения.

**Векторная величина, характеризующая быстроту изменения скорости и равная отношению изменения скорости  $\Delta \vec{v}$  к промежутку времени  $\Delta t$ , за которое произошло это изменение, называется *средним ускорением***

$$\vec{a}_{\text{ср}} = \frac{\vec{v}_2 - \vec{v}_1}{t_2 - t_1} = \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t}. \quad (1.5)$$

Среднее ускорение представляет собой вектор, направленный вдоль  $\Delta \vec{v}$ , и характеризует быстроту изменения скорости за *определенный конечный* промежуток времени. Неограниченно уменьшая этот промежуток ( $\Delta t \rightarrow 0$ ), приходим к другой физической величине.

**Величина, характеризующая быстроту изменения скорости в данный момент времени, называется *ускорением***

$$\vec{a} = \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t}. \quad (1.6)$$

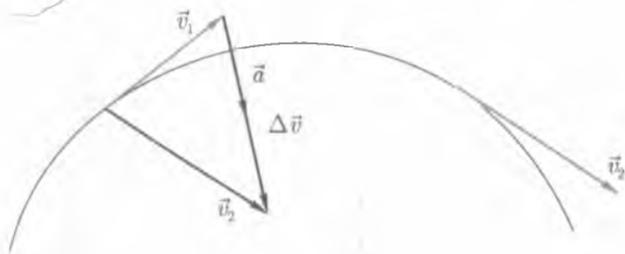


Рис. 1.14

Если обозначить через  $v_2 = v$  скорость в момент времени  $t_2 = t$ , через  $v_1 = v_0$  скорость в начальный момент времени ( $t_1 = 0$ ), а промежуток времени  $\Delta t$  через  $t$  ( $t_2 - t_1 = t - 0 = t$ ), то, учитывая (1.5) и (1.6), получим

$$\vec{a} = \frac{\vec{v} - \vec{v}_0}{t}. \quad (1.7)$$

Единица измерения ускорения в СИ —  $1 \text{ м/с}^2$ .

В отличие от вектора скорости, который всегда направлен по касательной к траектории, вектор ускорения может иметь составляющие, направленные как по касательной, так и по нормали к траектории. При прямолинейном неравномерном движении направление вектора  $\vec{a}$  совпадает с направлением изменения скорости  $\Delta \vec{v}$ , причем  $\vec{a} > 0$ , если  $\Delta \vec{v} > 0$  и  $\vec{a} < 0$ , если  $\Delta \vec{v} < 0$ . При равномерном движении по окружности ( $|\vec{v}| = \text{const}$ ) направление вектора  $\vec{v}$  постоянно меняется. В этом случае вектор  $\vec{a}$  перпендикулярен вектору скорости  $\vec{v}$ .

При движении по криволинейной траектории вектор  $\Delta \vec{v}$ , а следовательно, и вектор ускорения  $\vec{a}$  направлены в сторону вогнутости траектории (рис. 1.14).

Таким образом, ускорение всегда имеет такое же направление, как и изменение скорости.

**Скорость и путь в случае равноускоренного прямолинейного движения.** Движение тела, при котором его скорость за любые равные промежутки времени изменяется одинаково, называют *равноускоренным*, или *равнопеременным*. При равноускоренном прямолинейном движении ускорение есть величина постоянная ( $\vec{a} = \text{const}$ ). Из формулы (1.7) можно получить выражение для мгновенной скорости равноускоренного движения:

$$\vec{v} = \vec{v}_0 + \vec{a}t. \quad (1.8)$$



Рис. 1.15

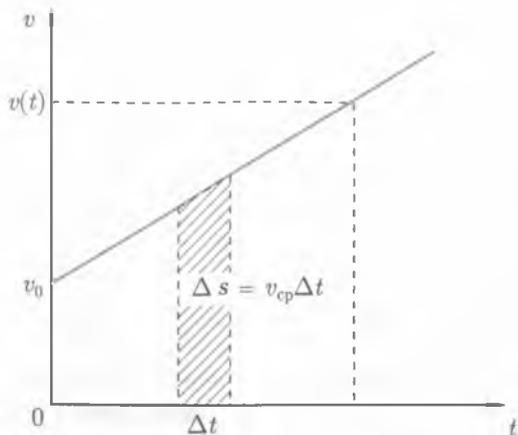


Рис. 1.16

Таким образом, если известны начальная скорость тела (в момент времени  $t = 0$ ) и ускорение, то мы можем найти скорость равноускоренного движения тела в любой момент времени. График скорости при  $a = \text{const}$  и начальной скорости  $v_0$  представлен на рис. 1.15.

Путь, пройденный телом при любом переменном движении, в том числе и равноускоренном, можно вычислить по формуле  $s = v_{\text{cp}} t$ .

Формулу для вычисления пути при равноускоренном движении можно легко получить, воспользовавшись графическим методом (рис. 1.16). Рассмотрим малый промежуток времени  $\Delta t$ . На основе определения средней скорости путь, пройденный за промежуток времени  $\Delta t$ , можно записать в виде  $\Delta s = v_{\text{cp}} \Delta t$ . Площадь  $\Delta s$  численно равна площади полоски, мало отличающейся от прямоугольника, которая имеет ширину  $\Delta t$  и высоту  $v_{\text{cp}}$ . Если промежуток времени  $\Delta t$  выбрать достаточно малым, то значение средней скорости  $v_{\text{cp}}$  на интервале  $\Delta t$  можно заменить на значение мгновенной скорости  $v$  в любой точке этого интервала:

$$\Delta s = v \Delta t.$$

Это соотношение выполняется тем точнее, чем меньше промежуток времени  $\Delta t$ . Полный путь  $s$  определяется площадью трапеции (см. рис. 1.16), ограниченной осями  $t$  и  $v$ , графиком скорости и вертикальным отрезком, проходящим через точку текущего

времени на оси  $t$ . Так как площадь трапеции равна произведению полу- суммы оснований на высоту, то

$$s(t) = \frac{1}{2}(v_0 + v(t))t.$$

Подставляя сюда значение  $v(t)$  из формулы (1.8), получаем выражение, аналогичное (1.9):

$$s(t) = v_0 t + \frac{at^2}{2}.$$

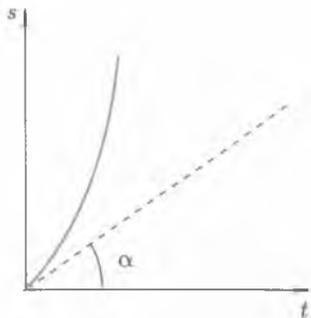


Рис. 1.17

График движения, описываемый формулой (1.9) при  $v_0 = 0$ , представляет собой отрезок параболы (рис. 1.17). Тангенс угла наклона  $\alpha$  касательной к графику движения определяет изменение скорости.

Формулы мгновенной скорости (1.8) и пути (1.9) называют *уравнениями равнопеременного прямолинейного движения*. С их помощью можно решить любую задачу на равнопеременное движение. Однако если в условии задачи не дано время движения, то ее можно решить, пользуясь соотношением между пройденным путем и конечной скоростью движения. Получим его. В формулу пути  $s = v_{cp} t$  подставим значение средней скорости и время движения  $t = \frac{v - v_0}{a}$ , найденное из уравнения скорости:

$$s = \frac{v_0 + v}{2} \frac{v - v_0}{a} = \frac{v^2 - v_0^2}{2a}, \quad \text{или} \quad v^2 - v_0^2 = 2as. \quad (1.10)$$

Если начальная скорость  $v_0$  равна нулю, то формулы (1.8) — (1.10) упрощаются:

$$v = at; \quad s = \frac{at^2}{2}; \quad v^2 = 2as. \quad (1.11)$$

Поскольку при равнопеременном движении ускорение постоянно ( $\bar{a} = \text{const}$ ), то графиком ускорения будет прямая, параллельная оси времени (рис. 1.18). Зависимость скорости от времени представляет собой линейную функцию (см. формулу (1.8)), а из курса математики известно, что график такой функции — прямая линия (рис. 1.19), отсекающая на оси ординат отрезок длиной  $0v_0$ . Очевидно, что если начальная скорость равна нулю, то график скорости проходит через начало координат.

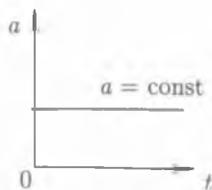


Рис. 1.18

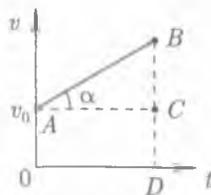


Рис. 1.19

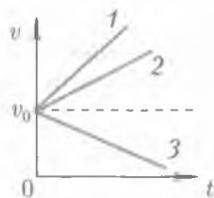


Рис. 1.20

По графику скорости можно определить ускорение. В самом деле тангенс угла  $\alpha$  наклона графика к прямой, параллельной оси абсцисс, равен отношению отрезка  $BC$ , численно равного приращению скорости  $v - v_0 = at$ , к отрезку  $AC$ , численно равному промежутку времени  $t$  после начала движения (см. рис. 1.19):

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{BC}{AC} = \frac{at}{t} = a.$$

Значит, чем больше ускорение, тем круче идет график. Таким образом, если зависимости скорости от времени для нескольких тел заданы в виде графиков (рис. 1.20), то можно легко определить, какое из них движется с большим ускорением: тело 1 движется с большим ускорением, чем тело 2, а тело 3 движется равнозамедленно.

Графическое представление зависимости скорости от времени дает возможность сравнительно быстро качественно и количественно оценить движение. Например, по графику скорости (рис. 1.21) проследим за движением электропоезда: он начал движение из состояния покоя и до момента времени  $t_1$  двигался равноускоренно, затем до момента времени  $t_2$  поезд шел равномерно со скоростью  $v_1$ , в промежутке времени  $t_3 - t_2$  он двигался равнозамедленно до полной остановки и в течение времени  $t_4 - t_3$  стоял, потом снова начал двигаться равноускоренно и т. д.

**Свободное падение тел.** Важным случаем равнопеременного движения является *свободное падение тел*, которое впервые подробно изучал Г. Галилей. Он установил, что при таком движении скорость возрастает пропорционально времени движения. При этом скорость для всех тел менялась одинаковым образом. В этом можно убедиться на опыте с прозрачной толстостенной трубкой, один конец которой запаян, а другой снабжен краном.

Поместим в трубку три разных предмета, например дробишку, пробку и птичье перо. Затем, быстро перевернув трубку, увидим,

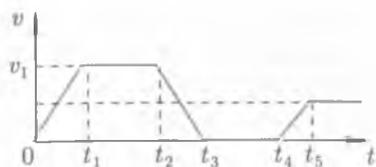


Рис. 1.21

что все тела упадут на дно трубки в разное время: сначала дробишка, потом пробка и, наконец, перо. С помощью насоса удалим воздух из трубки и повторим опыт. В этом случае все предметы упадут одновременно, т. е.

**ускорение свободного падения для всех тел одинаково ( $g = 9,8 \text{ м/с}^2$ ).**

Поскольку свободное падение тел обычно происходит без начальной скорости, для него справедливы формулы (1.11). В системе отсчета, связанной с поверхностью Земли, когда ось координат направлена вертикально вниз, эти формулы записываются так:

$$a = g; \quad v = gt; \quad h = gt^2 / 2; \quad v^2 = 2gh. \quad (1.12)$$

Если падающему телу сообщена начальная скорость, направленная вниз, то уравнения его движения в той же системе отсчета принимают вид

$$v = v_0 + gt; \quad h = v_0 t + gt^2 / 2; \quad v^2 - v_0^2 = 2gh. \quad (1.13)$$

Очевидно, что если тело бросить вертикально вверх, то оно будет двигаться с начальной скоростью  $v_0$ , направленной вверх, и ускорением  $g$ , направленным вниз. В системе отсчета, связанной с поверхностью Земли (если ось координат направлена вертикально вверх), получим

$$a = -g; \quad v = v_0 - gt; \quad h = v_0 t - gt^2 / 2. \quad (1.14)$$

### 1.3. Криволинейное движение

**Особенность криволинейного движения.** При криволинейном движении скорость направлена по касательной к траектории, т. е. направление скорости изменяется от точки к точке. Если мо-

дуль скорости не меняется, то еще нельзя считать такую скорость постоянной. Ведь скорость — величина векторная, а для векторных величин модуль и направление — одинаково важные характеристики. Поэтому *криволинейное движение — всегда движение с ускорением*.

**Равномерное движение тела по окружности.** Это простейший вид криволинейного движения, при котором в различные моменты времени векторы мгновенной скорости равны по модулю, но различны по направлению (рис. 1.22).

Равномерное движение по окружности обладает особенностью — оно периодически: через определенные промежутки времени положение материальной точки, а также ее кинематические характеристики (перемещение, скорость, ускорение) повторяются. Поэтому кроме уже известных величин, описывающих любое движение, здесь используются специфические величины, характеризующие повторяемость движения, — период  $T$  и частота  $\nu$ .

**Период** — промежуток времени, за который тело совершает один полный оборот.

Период обращения измеряется в тех же единицах, что и время, — в секундах (с) в СИ.

**Частота** — физическая величина, определяющая число оборотов, которое тело совершает за единицу времени, двигаясь по окружности.

Единица частоты в СИ — Герц ( $1 \text{ Гц} = 1 \text{ с}^{-1}$ ). Если материальная точка за время  $t$  совершает  $N$  оборотов по окружности, то согласно определению периода  $T = t/N$ , а по определению частоты  $\nu = N/t$ . За время, равное периоду  $T$ , материальная точка совершит один оборот. Следовательно,

$$\nu = \frac{1}{T}. \quad (1.15)$$

Таким образом, частота и период — взаимно обратные величины.

**Связь линейной скорости с периодом и частотой.** Движение тела по окружности ( $s$  — длина дуги) характеризуется линейной скоростью.

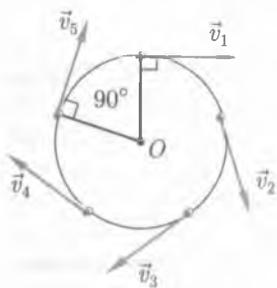


Рис. 1.22

Скорость тела, определяемая отношением длины пройденного пути  $s$  по окружности к соответствующему промежутку времени  $t$ , называется *линейной (окружной) скоростью*:

$$v = \frac{s}{t}. \quad (1.16)$$

За время, равное периоду  $T$ , материальная точка, двигаясь по окружности, пройдет путь, равный длине окружности:  $s = 2\pi R$ . Следовательно,

$$v = \frac{2\pi R}{T}, \quad (1.17)$$

где  $R$  — радиус окружности, по которой движется тело (материальная точка).

Учитывая формулу (1.15), можно получить связь линейной скорости с частотой:

$$v = 2\pi R\nu. \quad (1.18)$$

**Угловая скорость.** Связь между угловой и линейной скоростями. Быстроту движения тела по окружности наряду с линейной скоростью принято характеризовать также *угловой скоростью*.

**Угловая скорость** — векторная величина, характеризующая быстроту вращательного движения твердого тела.

При равномерном движении тела по окружности модуль угловой скорости определяется отношением угла поворота  $\Delta\varphi$  радиуса  $R$ , проведенного от центра окружности тела, к промежутку времени  $\Delta t$ :

$$\omega = \frac{\Delta\varphi}{\Delta t}. \quad (1.19)$$

Вектор угловой скорости направлен вдоль оси вращения в ту сторону, откуда поворот тела виден происходящим против часовой стрелки (рис. 1.23). Единица угловой скорости в СИ — радиан в секунду (рад/с).

За время  $\Delta t = T$  тело обойдет всю окружность, а радиус повернется на угол  $\Delta\varphi = 2\pi$  рад. Поэтому

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi\nu. \quad (1.20)$$

Между угловой и линейной скоростями существует простая связь. Если в выражение (1.16) подставить вместо длины дуги известное из курса математики соотношение  $s = R\varphi$ , то получим

$$v = \frac{\varphi R}{t}, \text{ или } v = \omega R. \quad (1.21)$$

**Центростремительное ускорение.** В случае криволинейного движения (как и в случае прямолинейного) ускорение определяется отношением приращения скорости  $\Delta\vec{v}$  за интервал времени  $\Delta t$  к этому интервалу, т. е.  $\vec{a} = \Delta\vec{v}/\Delta t$ . Вспомним, как определяется ускорение в случае равномерного движения тела по окружности, когда модуль скорости остается постоянным, а изменяется лишь направление.

Пусть материальная точка равномерно движется по окружности радиусом  $R$  со скоростью  $\vec{v}$  (рис. 1.24). Найдем модуль и направление ускорения для произвольной точки  $A$  траектории. За малый промежуток времени  $\Delta t$  она переместится на расстояние  $\Delta s$  и окажется в точке  $B$ . Векторы линейной скорости  $\vec{v}_A$  и  $\vec{v}_B$  в точках  $A$  и  $B$  равны по модулю и несколько отличаются по направлению. Чтобы найти приращение скорости  $\Delta\vec{v}$  за время  $\Delta t$ , перенесем вектор  $\vec{v}_A$  в точку  $B$ , сохранив направление, и воспользуемся правилом треугольника (параллелограмма). Треугольники  $AOB$  и  $BCD$  подобны, так как оба равнобедренные, и  $\angle AOB = \angle DBC$  как углы с взаимно-перпендикулярными сторонами. Поэтому можно записать

$$\frac{DC}{AB} = \frac{BD}{OA}; \quad \frac{\Delta v}{\Delta s} = \frac{v}{R}.$$

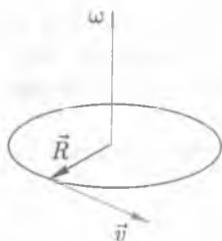


Рис. 1.23

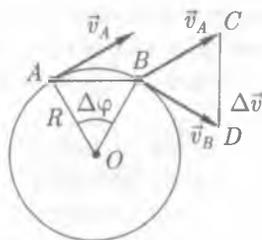


Рис. 1.24

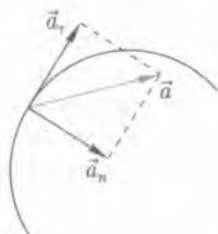


Рис. 1.25

Но  $\Delta s = v\Delta t$ , поэтому  $\frac{\Delta v}{v\Delta t} = \frac{v}{R}$ , откуда

$$a = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{v^2}{R}. \quad (1.22)$$

Мы нашли модуль ускорения тела в произвольно выбранной точке  $A$  окружности. Найдем теперь его направление. Мы брали очень малый промежуток времени  $\Delta t$ , поэтому очень мало и перемещение  $\Delta s$ . Это значит, что угол  $\Delta\varphi$  очень мал и каждый из рассмотренных треугольников ( $AOB$  и  $BCD$ ) содержит по два почти прямых угла. Отсюда следует, что вектор  $\Delta\vec{v}$  (а значит, и вектор  $\vec{a}$ ) направлен перпендикулярно вектору  $\vec{v}$ , т. е. к центру окружности вдоль радиуса. Поэтому ускорение, определяемое соотношением (1.22), называют центростремительным ускорением.

Точки  $A$  и  $B$  выбирались на окружности произвольно, поэтому очевидно, что в любой точке окружности модуль вектора центростремительного ускорения одинаков.

**Вектор  $\vec{a}$  всегда направлен по радиусу к центру окружности.**

Воспользовавшись соотношениями (1.18) и (1.21), можно выразить центростремительное ускорение через частоту и угловую скорость  $\omega$ :

$$a = 4\pi^2 v^2 R; \quad a = \omega^2 R. \quad (1.23)$$

Следует обратить внимание, что формула (1.23) справедлива только при постоянных по модулю  $v$ ,  $\omega$  и  $R$  при заданном  $R$ .

**Полное ускорение.** Вектор ускорения  $\vec{a}$  при криволинейном движении тела обычно представляют в виде суммы двух составляющих (рис. 1.25): одна направлена по касательной к траектории — это так называемое тангенциальное (касательное) ускорение  $\vec{a}_\tau$ ; вторая направлена по нормали к касательной — это нормальное (центростремительное) ускорение  $\vec{a}_n$ .

Из рис. 1.25 следует, что модуль полного ускорения определяется по формуле

$$a = \sqrt{a_\tau^2 + a_n^2}, \quad (1.24)$$

где  $a_\tau = \Delta v / \Delta t$ ,  $a_n = v^2 / R$ .

При движении материальной точки по прямолинейной траектории ее нормальное ускорение, очевидно, равно нулю. В этом случае, как видно из формулы (1.24), модуль полного ускорения равен модулю тангенциального ускорения.

Тангенциальное ускорение характеризует только изменение модуля скорости, а нормальное ускорение — изменение скорости по направлению.

**Произвольное криволинейное движение.** При произвольном криволинейном движении материальной точки выражения  $a_t = \Delta v / \Delta t$ ;  $a_n = v^2 / R$  для определения тангенциального и нормального ускорений остаются справедливыми. Следует лишь учитывать, что  $R$  в последнем выражении — это не радиус окружности, а радиус кривизны траектории в этой точке.

**Угловое ускорение — векторная величина, характеризующая быстроту изменения угловой скорости вращающегося тела.**

При равнопеременном вращательном движении твердого тела вокруг неподвижной оси модуль  $\epsilon$  его углового ускорения определяется равенством

$$\epsilon = \frac{\Delta \omega}{\Delta t},$$

где  $\Delta \omega$  — изменение угловой скорости тела за промежуток времени  $\Delta t$ .

Вектор углового ускорения направлен вдоль оси вращения: в ту же сторону, что и угловая скорость, при ускоренном движении

$$\vec{\epsilon} \uparrow \vec{\omega}$$

и в противоположную — при замедленном

$$\vec{\epsilon} \downarrow \vec{\omega}.$$

Единица углового ускорения в СИ — радиан в секунду в квадрате ( $\text{рад}/\text{с}^2$ ).



## ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ВЫВОДЫ

1. **Механика** — наука о механическом движении материальных тел и происходящих при этом взаимодействиях между ними.

**Кинематика** — раздел механики, изучающий способы описания механического движения без рассмотрения причин, вызывающих это движение. Механическим движением называется изменение положения тел в пространстве с течением времени. Механическое движение тела рассматривается относительно выбранной системы отсчета — совокупности тела отсчета, системы координат и часов, отсчитывающих промежутки времени от произвольно выбираемого на-

чального момента времени. Во многих задачах механики используют понятие материальной точки. Тело, размерами которого в условиях данной задачи можно пренебречь, называется материальной точкой.

К основным физическим величинам механики, описывающим движение тела, относятся перемещение  $\vec{s}$ , скорость  $\vec{v}$  и ускорение  $\vec{a}$ .

Наиболее простой вид движения — *прямолинейное равномерное движение*, определяемое уравнением

$$s = vt.$$

2. Для характеристики *неравномерного движения* пользуются понятием средней скорости перемещения на данном участке пути:

$$\vec{v}_{\text{ср}} = \frac{\Delta \vec{s}}{\Delta t}.$$

При *прямолинейном переменном движении* мгновенная скорость тела постоянно меняется, поэтому для ее нахождения в любой момент времени необходимо знать быстроту перемещения тела, т. е. ускорение

$$\vec{a} = \frac{\vec{v} - \vec{v}_0}{t}.$$

Проекцию скорости тела на данном участке пути на выбранную координатную ось, направленную вдоль траектории движения тела, в любой момент времени можно вычислить по формуле

$$\vec{v} = \vec{v}_0 + \vec{a}t,$$

а проекцию перемещения — по формуле

$$s = v_0t + \frac{at^2}{2}.$$

Проекцию перемещения при *равнопеременном движении* можно определить также по формуле

$$s = \frac{v^2 - v_0^2}{2a}.$$

Падение тел в вакууме называется свободным падением. Ускорение свободного падения  $g = 9,8 \text{ м/с}^2$ .

3. Простейшим видом *криволинейного движения* является движение материальной точки по окружности. При движении материальной точки по окружности мгновенная скорость в любой

точке траектории направлена по касательной к окружности. Поэтому даже равномерное движение по криволинейной траектории (окружности), при котором модуль скорости не изменяется, является движением ускоренным.

Движение тела по окружности характеризуется линейной  $v$  и угловой  $\omega$  скоростями, периодом обращения  $T$  и частотой обращения  $\nu$ . Модуль линейной скорости связан с этими величинами такими соотношениями:

$$v = \omega R = \frac{2\pi R}{T} = 2\pi\nu R,$$

где  $R$  — радиус окружности.

При равномерном движении по окружности вектор ускорения в любой точке траектории направлен перпендикулярно вектору скорости (к центру окружности). Поэтому это ускорение называют центростремительным. Модуль центростремительного ускорения связан с величинами  $v$ ,  $\omega$ ,  $T$  и  $\nu$  такими соотношениями:

$$a = \frac{v^2}{R} = \omega^2 R = \frac{4\pi^2 R}{T^2} = 4\pi^2 \nu^2 R.$$



## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ

1. Что называется механическим движением?
  2. Что такое система отсчета? Какие бывают системы отсчета?
  3. Что такое траектория, пройденный путь, перемещение? В чем заключается их различие?
  4. Как различают движения: а) по форме траектории; б) по характеру изменения скорости? Каков характер движения свободно падающего тела?
  5. Перечислите признаки криволинейного движения.
  6. Какова траектория движения точек винта самолета: а) по отношению к летчику; б) по отношению к Земле?
  7. Какую скорость переменного движения показывает спидометр автомобиля?
  8. Пешеход перебежал шоссе под углом  $30^\circ$  к направлению дороги со скоростью  $18 \text{ км/ч}$  за  $12 \text{ с}$ . Какова ширина шоссе?
- Ответ:  $b = 30 \text{ м}$ .
9. Одну треть пути автомобиль движется со скоростью  $60 \text{ км/ч}$ , а оставшуюся часть — со скоростью  $80 \text{ км/ч}$ . Какова средняя скорость движения автомобиля?

Ответ:  $v_{\text{ср}} = 72 \text{ км/ч}$ .

10. Человек идет по эскалатору метрополитена вверх. Если эскалатор неподвижен, то человек поднимается за 100 с. Если при этом эскалатор движется, то человек поднимается за 25 с. Длина эскалатора 50 м. Какова скорость движения ленты эскалатора?

*Ответ:*  $v = 1,5 \text{ м/с}$ .

11. Тело падает с высоты 2 000 м. За какое время оно пройдет последние 100 м?

*Ответ:*  $t = 0,5 \text{ с}$ .

12. Самолет летит горизонтально со скоростью 360 км/ч на высоте 490 м. Когда он пролетает над пунктом А, с него сбрасывают пакет. На каком расстоянии от пункта А пакет упадет на землю?

*Ответ:*  $s = 1\,000 \text{ м}$ .

13. Мяч брошен под углом к горизонту с начальной скоростью 8 м/с. Найдите скорость мяча в момент, когда он находился на высоте 3 м.

*Ответ:*  $v = 2 \text{ м/с}$ .

14. Мяч брошен под углом  $30^\circ$  к горизонту с начальной скоростью 10 м/с. На какую максимальную высоту поднимется мяч?

*Ответ:*  $h_{\text{max}} = 1,25 \text{ м}$ .

15. Определите скорость и центростремительное ускорение вращательного движения точки на экваторе, обусловленного суточным вращением Земли.

*Ответ:*  $v = 475 \text{ м/с}$ ;  $a = 0,035 \text{ м/с}^2$ .

16. Найдите центростремительное ускорение и скорость (угловую и линейную) для орбитального спутника Земли, если его период обращения 105 мин, а высота полета над Землей 1 200 км.

*Ответ:*  $a = 7,6 \text{ м/с}^2$ ;  $\omega = 10^{-3} \text{ рад/с}$ ;  $v = 7,6 \cdot 10^3 \text{ м/с}$ .

17. Точка движется по окружности с постоянной скоростью 20 м/с. Вектор скорости изменяет направление на угол  $15^\circ$  за время, равное 3 с. Чему равно нормальное ускорение точки?

*Ответ:*  $a_n = 1,7 \text{ м/с}^2$ .

18. Тело, двигаясь прямолинейно с постоянным ускорением  $a$ , потеряло  $\frac{2}{3}$  своей начальной скорости  $v_0$ . Какой путь прошло тело и сколько времени оно двигалось?

*Ответ:*  $t = \frac{2v_0}{3a}$ ;  $s = \frac{4v_0^2}{9a}$ .

## ГЛАВА 2 ОСНОВЫ ДИНАМИКИ

### 2.1. Законы динамики

**Основная задача динамики.** В предыдущей главе мы рассмотрели различные виды механического движения, ввели ряд кинематических понятий (перемещение, скорость, ускорение и др.) и установили связь между ними для некоторых случаев. Однако в кинематике производится только математическое описание механического движения без выяснения причин того, почему движение происходит так, а не иначе. В динамике вскрываются причины, которые вызывают или изменяют определенный вид движения. Объяснение причин механического движения в динамике основывается на использовании представлений о *взаимодействии тел* — воздействии тел или частиц друг на друга, которое приводит к изменению состояния их движения. Взаимодействие тел — основная причина изменения скорости их движения, т. е. причина возникновения ускорения. Ускорение в отличие от положения тела и его скорости не может быть задано произвольно, поскольку оно определяется положением и движением окружающих тел.

**Основная задача динамики (механики) состоит в определении положения тела с известными массой и скоростью в любой момент времени по силам, действующим на тело, и по известным начальным условиям.**

В основе динамики лежат три закона, открытые английским физиком И. Ньютоном. Эти законы образуют фундамент классической механики, которая, как показывает опыт, справедлива для очень широкого круга явлений.

**Первый закон Ньютона. Инерциальные системы отсчета.** Из кинематики известно, что характер движения тела зависит от выбора системы отсчета.

**Первый закон Ньютона:** существуют такие системы отсчета, относительно которых поступательно движущиеся тела сохраняют свою скорость постоянной, если на них не действуют другие тела (или действие других тел компенсируется).

Такие системы отсчета принято называть *инерциальными* (в них тело, не испытывающее влияния других тел, движется по инерции). В связи с этим *первый закон Ньютона часто называют законом инерции*.

Свойство сохранения телом, не подверженным нескомпенсированным внешним воздействиям, своей скорости постоянной (в том числе равной нулю, если тело покоится), называют *инерцией*. В соответствии с понятием инерции существует другая формулировка первого закона Ньютона: **тело сохраняет состояние покоя или равномерного прямолинейного движения до тех пор, пока не подвергнется нескомпенсированному воздействию со стороны других тел.**

С большой степенью точности можно считать инерциальной систему отсчета, связанную с Землей. Но строго инерциальной она не является. Если надо рассчитать, например, движение баллистической ракеты, то приходится учитывать вращение Земли и возникающие при этом изменения в движении ракеты. В дальнейшем мы в основном будем пользоваться инерциальными системами отсчета.

Системы отсчета, в которых изменение скорости тела может быть вызвано не только взаимодействием, но и ускоренным движением самой системы (в них не выполняется закон инерции), называют *неинерциальными*. Примером служит система, связанная с вагоном: при ускорении или замедлении хода поезда, а также на поворотах незакрепленные, легкоподвижные предметы приходят в движение относительно вагона, хотя действие на них других тел при этом не изменяется.

Непосредственно на опыте проверить первый закон Ньютона нельзя, поскольку полностью изолировать данное тело от влияния других не удастся. Обычно наблюдаемое нами состояние покоя или равномерного прямолинейного движения тела обусловлено тем, что воздействия окружающих его тел взаимно компенсируют друг друга. Например, самолет при установившемся горизонтальном полете движется равномерно и прямолинейно, потому

что сила тяги уравнивает силу сопротивления воздуха, а подъемная сила крыла — силу тяжести.

Любая система отсчета, движущаяся относительно инерциальной системы отсчета (ИСО) с постоянной скоростью, также является ИСО.

**Механический принцип относительности.** Понятие ИСО является фундаментальным в физике вообще и в механике в частности. Галилей сформулировал принцип равноправия всех инерциальных систем отсчета.

**Принцип относительности Галилея: все инерциальные системы отсчета равноправны, т. е. все механические явления в них протекают одинаково.**

В подтверждение этого принципа можно привести такие примеры.

1. Камень, выпущенный из руки, падает одинаково как для наблюдателя, находящегося на берегу, так и для наблюдателя, находящегося на палубе корабля, движущегося равномерно и прямолинейно относительно Земли.

2. Одинаково движется мяч от одного игрока к другому при игре в волейбол на палубе корабля и на берегу.

Таким образом, можно сказать, что никакими механическими опытами внутри данной ИСО нельзя установить, движется ли она равномерно и прямолинейно или покоится. Иными словами, все инерциальные системы отсчета для любых механических явлений равноправны, т. е. не существует какой-либо особой, главной ИСО, движение относительно которой можно было бы рассматривать как «абсолютное движение», а вот время, по мнению Галилея, не зависит от ИСО, т. е. оно абсолютно.

**Масса тела.** Известно, что при взаимодействии тел изменяется скорость каждого из взаимодействующих тел, т. е. каждое из них получает ускорение.

Рассмотрим опыт по взаимодействию двух легкоподвижных тележек на гладком горизонтальном столе (рис. 2.1). Если пережечь нить, стягивающую пружину, то тележки в результате взаимодей-

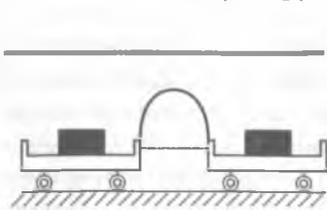


Рис. 2.1

ствия получают определенные ускорения. Тщательными измерениями можно установить, что независимо от модулей этих ускорений они всегда противоположно направлены, а их отношение постоянно. Если взять другую пару тележек (или чем-то нагрузить одну из них), то отношение приобре-

таемых ими ускорений будет иным, но снова постоянным для данной пары тележек.

Установлено, что получаемые телами в результате взаимодействия ускорения зависят от их инертных свойств: чем меньшее ускорение приобретает тело, тем оно инертнее.

*Свойство тела противиться изменению скорости, от которого зависит значение приобретаемого им ускорения при взаимодействии с другими телами, называется инертностью.* Инертность, как и многие другие свойства тел, характеризуют физической величиной, которую можно измерять и выражать числом.

**Масса тела — физическая величина, являющаяся количественной мерой его инертности.**

Масса тела обозначается буквой  $m$  и в СИ измеряется в килограммах (кг).

Если в рассмотренном опыте обозначить массы взаимодействующих тел  $m_1$  и  $m_2$ , а полученные ими ускорения  $a_1$  и  $a_2$ , то получим

$$\frac{a_1}{a_2} = \frac{m_2}{m_1}. \quad (2.1)$$

Это соотношение справедливо для взаимодействия всех тел, действующих любым способом друг на друга. Из-за инертности тело не может мгновенно изменить свое состояние покоя или движения, для этого требуется время.

Таким образом, чем больше масса тела, тем труднее изменить его скорость: остановить (если тело двигалось), вывести из состояния покоя, изменить направление движения. В этом мы убеждаемся на каждом шагу в повседневной жизни. Токарь легко перемещает суппорт настольного токарного станка, но ему значительно труднее передвинуть массивный суппорт большого станка. Слесарные работы (рубка металла, клепка, правка и т. д.) производят на массивной плите или наковальне, так как под действием ударов молотка плита или наковальня остается практически неподвижной (приобретает незначительное ускорение).

В рамках классической механики

**масса является аддитивной величиной,**

т.е. масса  $m$  тела, состоящего из нескольких частей, равна сумме масс этих частей. Кроме того, выполняется закон сохранения массы: при любых процессах, происходящих в системе тел, полная масса системы остается постоянной. Масса тела не зависит ни от состояния его движения, ни от взаимодействия с другими телами.

*Масса* — величина скалярная, а это значит, что инертные свойства тела одинаковы во всех направлениях.

**Сила. Второй закон Ньютона.** В инерциальной системе отсчета изменение скорости тела может быть обусловлено только его взаимодействием с другими телами. Для описания взаимодействия между телами вводится физическая величина — сила, дающая количественную меру этого взаимодействия. Природа сил может быть различной, однако для любых сил характерны два основных свойства:

- сила — физическая величина, она может быть охарактеризована не только с качественной стороны, отличающей ее от других физических величин, но и определенным количественным образом;
- сила — векторная величина, так как результат ее действия зависит не только от числового значения, но и от направления и точки приложения. Изменяя направление действия силы, мы изменяем направление ускорения.

Таким образом,

**сила** — векторная физическая величина, являющаяся количественной мерой действия одного тела на другое и указывающая направление этого действия.

Более кратко иногда говорят, что *сила* — это мера взаимодействия двух материальных тел. Это взаимодействие может происходить либо путем непосредственного контакта (удар, трение), либо посредством полей, создаваемых телами (гравитационное поле, электромагнитное поле, поле ядерных сил). Предполагается, что взаимодействие осуществляется действием одного тела на другое, при этом оба взаимодействующих тела приобретают ускорение. Нас, как правило, интересует одно из взаимодействующих тел. Действие же второго тела на него мы заменяем физической величиной, называемой силой. Когда мы говорим, что подействовала сила, мы имеем в виду, что подействовало другое тело и можно указать это тело (или поле).

Сила обозначается буквой  $F$ , единица силы в СИ — ньютон (Н).

Количественную связь между действующей на тело силой и ускорением этого тела устанавливает

**второй закон Ньютона: ускорение, которое приобретает тело под действием силы, пропорционально этой силе, а его направление совпадает с направлением силы:**

$$\vec{a} \sim \vec{F}.$$

Пропорциональность между ускорением и силой справедлива для сил любой физической природы, причем коэффициент пропорциональности — постоянная для данного тела величина, в качестве которой выступает масса тела.

Используя понятие массы тела  $m$ , можно дать математическое выражение второго закона Ньютона:

$$\vec{F} = m\vec{a}. \quad (2.2)$$

Это уравнение движения часто называют *основным уравнением динамики*.

Выражаемая вторым законом Ньютона связь между ускорением и силой имеет универсальный характер. Закон справедлив при любом направлении действующей силы. Когда эта сила направлена вдоль скорости тела, она изменяет только модуль скорости (например, при ускоренном движении автомобиля по прямолинейному участку дороги). Когда сила направлена перпендикулярно скорости, то сообщаемое телу ускорение будет центростремительным. Например, при почти круговом движении Международной космической станции вокруг Земли действующая перпендикулярно орбитальной скорости сила притяжения к Земле сообщает космической станции центростремительное ускорение. Когда все действующие на тело силы уравновешены, тело либо покоится, либо движется равномерно и прямолинейно, поскольку в этом случае  $\vec{a} = 0$ .

**Принцип независимости действия сил. Равнодействующая сила.** Обычно на тело действует не одна, а несколько сил, т. е. оно взаимодействует сразу с несколькими телами. Каждая сила создает свое ускорение. В этом случае справедлив

**принцип независимости действия сил: если на тело одновременно действуют несколько сил, каждая из которых вызывает свое собственное ускорение, то действие каждой из сил не зависит от действия остальных.**

Поэтому результирующее ускорение равно геометрической сумме ускорений, сообщаемых телу каждой из действующих сил, а результирующее движение представляет собой суперпозицию движений, возникающих под действием каждой из этих сил.

Масса тела не зависит от действующих на него сил, поэтому результирующее ускорение тела пропорционально геометрической сумме всех этих сил, т. е.

$$m\vec{a} = \sum_{i=1}^n \vec{F}_i. \quad (2.3)$$

Одновременное действие нескольких сил можно заменить действием одной силы — *равнодействующей*.

**Равнодействующая сила равна векторной сумме всех сил, приложенных к телу:**

$$\vec{F}_r = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \dots + \vec{F}_n.$$

Справедливо и обратное утверждение: *любую силу, действующую на тело, можно представить в виде суммы двух или большего числа сил*. Это важно знать для успешного решения задач по динамике.

В случае действия на тело двух сил их равнодействующая находится по правилу параллелограмма. *Направление ускорения тела совпадает с направлением равнодействующей силы.*

Поскольку именно равнодействующая сила определяет ускорение, с которым движется тело, то второй закон Ньютона следует формулировать следующим образом: *ускорение тела прямо пропорционально равнодействующей всех сил, приложенных к телу, и обратно пропорционально массе тела:*

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

Второй закон Ньютона выполняется только в инерциальных системах отсчета. В частности, если сумма сил, действующих на тело, равна нулю, то ускорение тела равно нулю. Именно в этом заключается суть *компенсации действия других тел*, фигурирующей в определении первого закона Ньютона.

**Центр масс тела.** Изучая и описывая движение тела при действии на него сил, мы считаем тело материальной точкой или рассматриваем его поступательное движение, при котором все его точки движутся одинаково и, следовательно, достаточно изучить движение только одной точки. Но ведь силы, действующие на протяженное тело, приложены к разным его точкам. Как же в этом случае мы должны рассматривать движение любого тела?

Оказывается, в каждом теле есть одна особая точка, называемая *центром масс*. Она замечательна тем, что при самом сложном движении тела центр масс его движется так, как если бы вся масса тела была сосредоточена в этой точке; кроме того, к этой точке приложена равнодействующая всех сил, действующих на разные участки тела. При этом движение центра масс можно рассчитывать, пользуясь основным законом динамики, так же как и для материальной точки. Например, по дороге движется грузовой

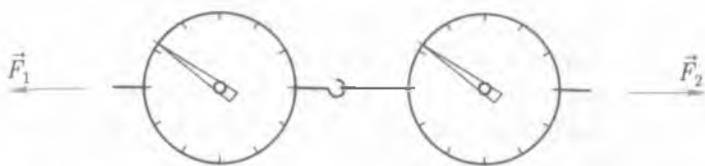


Рис. 2.2

автомобиль. У него вращаются колеса, он качается на рессорах, в кузове находится груз, а центр масс грузовика движется как материальная точка, в которой сосредоточена вся масса грузового автомобиля с грузом и людьми, находящимися в нем. Сила тяги движения грузового автомобиля и все силы сопротивления приложены именно в этой точке.

Центр масс однородного тела, например куба, бруска, шара, находится в его геометрическом центре.

**Третий закон Ньютона.** Мы уже неоднократно говорили о том, что при взаимодействии тела действуют друг на друга. Установить же, как тела действуют друг на друга, можно на простом опыте с двумя динамометрами (рис. 2.2). Как бы мы ни растягивали соединенные динамометры, их показания оказываются одинаковыми. Это значит, что сила, с которой один динамометр действует на другой, равна силе, с которой второй динамометр действует на первый. Кроме того, из рис. 2.2 видно, что эти силы направлены вдоль одной прямой в противоположные стороны. Количественно это взаимодействие характеризует

**третий закон Ньютона: силы, с которыми два тела действуют друг на друга, расположены на одной прямой, равны по величине и противоположны по направлению:**

$$\vec{F}_1 = -\vec{F}_2. \quad (2.4)$$

Силы, возникающие при взаимодействии тел, никогда не уравновешивают друг друга, поскольку приложены к разным телам.



Рис. 2.3

Так, находящийся в лодке человек (рис. 2.3) отталкивает веслом другую лодку, действуя на нее с силой  $\vec{F}_1$ ; в свою очередь, лодка действует на весло и человека с равной по модулю, но противоположно направленной силой  $\vec{F}_2$ ; под действием этих сил лодки расходятся в разные стороны.

При изучении третьего закона Ньютона часто возникает вопрос такого рода. Согласно третьему закону Ньютона сила, с которой человек тянет санки, равна по модулю и противоположна по направлению силе, с которой санки должны «тянуть» человека в обратном направлении. Однако санки и человек движутся вперед. Почему это происходит?

Это происходит потому, что санки и человек не только взаимодействуют между собой, но каждый из них еще взаимодействует с Землей. Человек, двигаясь по Земле, подошвой обуви «толкает» Землю в одну сторону, а Земля «толкает» его в противоположную сторону. Если эта сила по модулю больше силы, с которой санки действуют на человека, то человек сможет везти санки, а если меньше, то человек не сможет их даже сдвинуть с места.

## 2.2. Силы в природе

**Виды взаимодействий.** В классической механике природа сил, входящих в основные уравнения, несущественна. Второй закон Ньютона определяет ускорение тела независимо от природы сил, сообщающих это ускорение.

Все многообразие встречающихся в природе взаимодействий в современной науке удается свести всего к четырем различным видам: *гравитационному, сильному (ядерному), электромагнитному и слабому*. Слабое взаимодействие, как и сильное, свойственно лишь элементарным частицам и проявляется на столь малых расстояниях, когда законы Ньютона уже неприменимы. В мире макроскопических явлений электромагнитное взаимодействие проявляется независимо от слабого и описывается законами классической электродинамики. Гравитационное взаимодействие в классической физике описывается законом всемирного тяготения Ньютона.

Гравитационное и электромагнитное взаимодействия, в отличие от коротких ядерного и слабого, — дальнodelствующиe, т. е. их действие распространяется на очень большие расстояния. Поэтому именно электромагнитное и гравитационное взаимодействия

определяют все множество механических явлений, начиная от явлений на молекулярном уровне и заканчивая движением небесных тел. Только для этих видов взаимодействий можно использовать понятие силы в смысле механики Ньютона.

Итак, всевозможные взаимодействия в природе можно свести всего к четырем видам взаимодействий. В этом проявляется единство природы.

Механика не занимается выяснением происхождения сил. Однако для изучения механического движения нам необходимо познакомиться с теми силами, которые проявляются в механике. Их всего три: сила упругости, сила тяготения и сила трения.

**Сила упругости.** Если к телу массой  $m$  (рис. 2.4), лежащему на гладкой поверхности, прикрепить пружину (случай I) и начать растягивать ее с силой  $\vec{F}$ , то тело придет в движение (случай II). Приложенная сила сообщит ему ускорение  $\vec{a}$  и несколько удлинит пружину — деформирует ее. Вследствие деформации пружины в ней возникают внутренние силы, действующие между отдельными ее частями, — силы упругости, направленные в сторону, противоположную деформирующей силе  $\vec{F}$ . В тот момент, когда силы упругости достигнут значения  $\vec{F}$ , они уравновесят деформирующую силу и растяжение пружины прекратится. Сила  $\vec{F}$  сообщает ускорение именно пружине, так как приложена непосредственно к ней. Тело же получает ускорение под действием силы упругости, приложенной к нему со стороны другого конца деформированной пружины.

Итак, *сила упругости возникает при деформации тел*, т. е. при изменении взаимного расположения частиц, из которых состоит тело. Деформация тел происходит под действием внешних сил, приводящих к изменению формы или размеров тела.

*Силы упругости имеют электромагнитную природу* и, по сути, являются результирующими огромного количества сил, возникающих между соседними частицами (атомами или молекулами) при отклонении их от своих равновесных значений. Следовательно, силы упругости действуют между соприкасающимися слоями деформируемого тела, а также в месте контакта этого тела с телом, вызывающим деформацию. Например, при

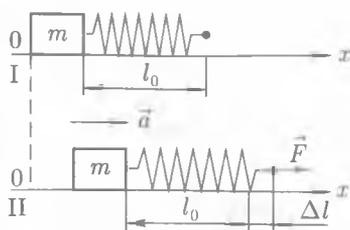


Рис. 2.4

растяжении стержня увеличиваются расстояния между частицами (слоями), а при сжатии — уменьшаются.

Различают несколько видов деформации, среди которых наиболее важными являются *упругие* и *пластические*.

**Деформация называется упругой, если после снятия нагрузки форма тела восстанавливается полностью. Деформация называется пластической, если после снятия нагрузки форма тела восстанавливается частично или вообще не восстанавливается.**

Опыт показывает, что вид деформации зависит не только от упругих свойств тела, но и от степени деформации. При очень больших смещениях упругая деформация переходит в пластическую.

Приведем примеры проявления различных видов деформации:

- деформацию *растяжения* и *сжатия* испытывают опорные колонны зданий и мостов, сваи, цепи, на которых висят мосты, пружины, к которым подвешены грузы, и т. д.;
- деформацию *сдвига* испытывают лыжи, детали при шлифовке на станке, доска, обрабатываемая рубанком, и т. д.;
- деформацию *кручения* испытывают отвертка и винт, закручиваемый ею, сверла, валы двигателей и т. д.;

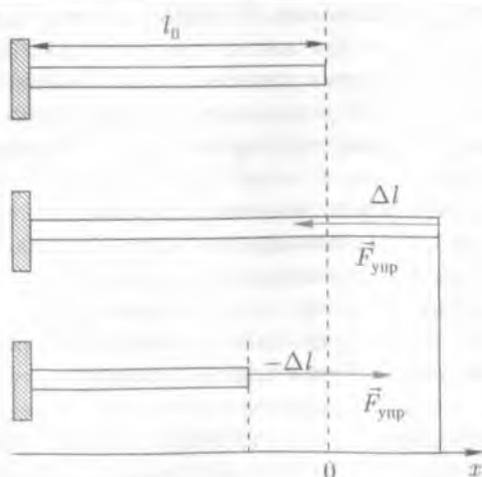


Рис. 2.5

- деформацию *изгиба* испытывают потолочные балки, крышка стола, мост, рельсы и т. д.

**Закон Гука.** При выяснении связи между силой упругости и вызывающей ее деформацией (в опытах со стержнем, рис. 2.5) оказалось, что при достаточно малых (по сравнению с длиной самого стержня) удлинениях  $\Delta l$  модуль силы упругости пропорционален модулю перемещения свободного конца стержня. Это позволило английскому физика Гуку сформулировать закон.

**Закон Гука: сила упругости, возникающая при упругих деформациях тела, пропорциональна удлинению тела и направлена в сторону, противоположную смещению частиц тела при деформации:**

$$F_{\text{упр}} = -k\vec{x}, \quad (2.5)$$

где  $k$  — коэффициент пропорциональности, называемый *жесткостью* тела (пружины, стержня). Жесткость зависит от размеров тела и материала, из которого оно изготовлено.

Если тело растягивается ( $\Delta l > 0$ ), то упругая сила направлена в сторону, противоположную смещению частиц при растяжении ( $F_{\text{упр}} < 0$ ).

Если тело сжимается ( $\Delta l < 0$ ), то упругая сила также направлена в сторону, противоположную смещению частиц при сжатии ( $F_{\text{упр}} > 0$ ).

Закон Гука используется при расчетах мостов, подъемных кранов, балок, сооружений. Для обеспечения длительной сохранности и надежности конструкций важно, чтобы при действии сил в них происходили незначительные (упругие) деформации. Деформации являются упругими только тогда, когда они относительно малы. Однако величина абсолютного удлинения  $\Delta l$  меры этой относительности не содержит. Поэтому на практике вместо  $\Delta l$  чаще используется понятие относительного удлинения

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0}, \quad (2.6)$$

где  $l_0$  — первоначальная длина тела. В этом случае малость деформации означает, что  $\varepsilon \ll 1$ .

Опыт показывает, что тела, изготовленные из одного и того же материала, но имеющие разные поперечные сечения  $S$ , имеют разную жесткость. Для характеристики этого свойства вводят физическую величину — *механическое напряжение*  $\sigma$ , численно

равное отношению модуля силы упругости к площади поперечного сечения тела:

$$\sigma = \frac{F_{\text{упр}}}{S} \quad (2.7)$$

Разделив обе части равенства (2.5) на  $l_0$ , с учетом (2.6) и (2.7) закон Гука можно представить в виде

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E}, \quad (2.8)$$

где  $E = \frac{kl_0}{S}$  — модуль Юнга.

Представление закона Гука в форме (2.8) имеет преимущество, поскольку модуль Юнга является характеристикой только материала, из которого образовано тело, и не зависит от размеров и формы тела. Физический смысл модуля Юнга состоит в том, что если положить  $\Delta l/l_0 = 1$ , то действующая на тело сила увеличит его длину вдвое. Конечно, это требование условно, поскольку для упругой деформации должно выполняться ограничение  $\Delta l/l_0 \ll 1$ .

Еще раз подчеркнем, что сила, вызывающая деформацию рассматриваемого тела  $A$ , приложена к этому телу со стороны некоторого другого тела  $B$ , а сила упругости в точке соприкосновения тел  $A$  и  $B$  действует со стороны тела  $A$ , но приложена она к телу  $B$ .

**Силы тяготения.** Падение тел на землю, движение спутников вокруг Земли, обращение планет вокруг Солнца происходят под действием сил тяготения. Силы тяготения, с которыми взаимодействуют тела, определяются законом всемирного тяготения.

**Закон всемирного тяготения: все тела притягиваются друг к другу с силой, модуль которой прямо пропорционален произведению их масс и обратно пропорционален квадрату расстояния между ними:**

$$F_t = G \frac{m_1 m_2}{r^2}, \quad (2.9)$$

где  $F_t$  — сила тяготения;  $m_1$  и  $m_2$  — массы взаимодействующих тел;  $r$  — расстояние между телами;  $G$  — гравитационная постоянная.

Гравитационная постоянная  $G$  имеет определенный физический смысл. Если массы взаимодействующих тел равны единице ( $m_1 = m_2 = 1 \text{ кг}$ ) и расстояние между ними также равно единице ( $r = 1 \text{ м}$ ), то сила всемирного тяготения численно равна гравитационной постоянной. Так как гравитационная постоянная очень мала ( $G = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ (Н} \cdot \text{м}^2)/\text{кг}^2$ ), мы обычно не замечаем притяжения окружающих нас тел.

Следует обратить внимание на то, что формулировка закона всемирного тяготения справедлива только для тел, размеры которых малы по сравнению с расстоянием между ними, т. е. для точечных тел. Тела, падение которых на Землю мы обычно рассматриваем, имеют размеры много меньшие, чем радиус Земли ( $R_3 \approx 6400 \text{ км}$ ); поэтому их можно считать точечными и определять силу притяжения к Земле с помощью закона всемирного тяготения, понимая под  $r$  расстояние от данного тела до центра Земли.

Силы тяготения действуют как при непосредственном контакте тел (например, предмет лежит на Земле), так и без него (например, взаимодействие Солнца и планет). Осуществляется взаимодействие через поле тяготения, или *гравитационное поле*.

Силы всемирного тяготения называются *гравитационными силами*, поэтому коэффициент пропорциональности  $G$  в законе всемирного тяготения называют *гравитационной постоянной*.

Одно из проявлений сил всемирного тяготения — *сила тяжести*. Эта сила, приложенная к телам у поверхности Земли, сообщает им ускорение свободного падения  $\vec{g}$ . Согласно второму закону Ньютона модуль  $F_T$  силы тяжести можно выразить через массу тела и ускорение свободного падения:

$$F_T = mg. \quad (2.10)$$

По закону всемирного тяготения модуль  $F_T$  силы тяжести, действующей на тело массой  $m$ , равен

$$F_3 = G \frac{mM_3}{R_3^2}, \quad (2.11)$$

где  $M_3$  и  $R_3$  — соответственно масса и радиус Земли. Из сравнения равенств (2.10) и (2.11) получим

$$g = \frac{GM_3}{R_3^2}.$$

Из этого выражения видно, что ускорение свободного падения не зависит от массы тела, а зависит от высоты над поверхностью

Земли. При высотах в десятки и сотни метров над Землей ускорение свободного падения можно считать постоянным, не зависящим от высоты. Поэтому свободное падение тел вблизи Земли считают равноускоренным движением.

Силы тяжести действуют на каждую часть тела, и все они направлены параллельно. Равнодействующая этих сил равна по значению их сумме и представляет собой силу тяжести, которую испытывает тело со стороны Земли. *Точка приложения равнодействующей силы тяжести называется центром тяжести тела.*

Введение понятия центра тяжести тела означает, что при рассмотрении движения тела в гравитационном поле реальное тело формально можно заменить точечным, расположенным в его центре тяжести.

Сравнение понятий центра масс и центра тяжести показывает, что *понятие центра масс имеет смысл для любых тел (или их систем), а центра тяжести — только для тел, находящихся в гравитационном поле, и в случае однородного поля данные понятия совпадают.*

Соотношение (2.10) позволяет использовать простую методику определения массы тела — взвешивание. Для этого достаточно измерить действующую на тело силу тяжести (например, с помощью пружинных весов — динамометра) и найти отношение значений этой силы и ускорения свободного падения, т. е.

$$m = \frac{F_T}{g}$$

Следует также отметить важнейшую особенность гравитационного взаимодействия — его универсальность. Оно присуще всем

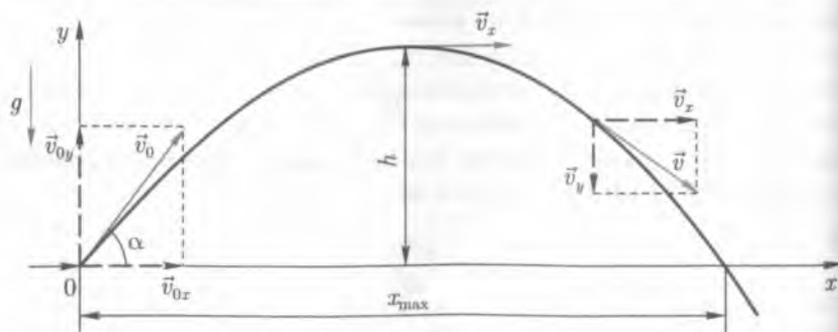


Рис. 2.6

материальным объектам — от элементарных частиц до галактик, его невозможно устранить или ослабить с помощью какой-либо преграды.

**Движение тел под действием силы тяжести.** Простейшим случаем движения тел под действием силы тяжести является свободное падение тел с начальной скоростью, равной нулю. В этом случае тела движутся прямолинейно с ускорением свободного падения по направлению к центру Земли. Если начальная скорость тела не равна нулю и ее вектор направлен не по вертикали, то тело под действием силы тяжести движется с ускорением свободного падения по кривой траектории.

Пусть, например, тело брошено со скоростью  $\vec{v}_0$  под углом  $\alpha$  к горизонту (рис. 2.6). Вдоль оси  $Ox$  тело движется равномерно со скоростью  $v_x = v_{0x} = v_0 \cos \alpha$ . Поэтому его координата  $x$  меняется со временем согласно формуле

$$x = v_0 t \cos \alpha.$$

В вертикальном направлении тело движется с постоянным ускорением  $a = -g$  (ускорение направлено вниз), начальная скорость тела в этом направлении  $v_{0y} = v_0 \sin \alpha$ . Координату  $y$  тела в момент времени  $t$  можно найти по формуле

$$y = v_{0y} t - \frac{1}{2} g t^2 = v_0 t \sin \alpha - \frac{1}{2} g t^2.$$

Воспользовавшись этими формулами, можно определить время и дальность полета тела, максимальную высоту его подъема над горизонтом.

Найдем время полета тела. В момент  $t_0$  падения тела на Землю  $y = 0$ . Следовательно, можно записать

$$0 = v_0 t_0 \sin \alpha - \frac{1}{2} g t_0^2, \quad \text{откуда} \quad t_0 = \frac{2v_0 \sin \alpha}{g}.$$

Подставляя теперь это выражение для времени полета тела в уравнение для координаты  $x$ , найдем дальность его полета:

$$x_{\max} = v_0 t_0 \cos \alpha = \frac{2v_0^2 \sin \alpha \cos \alpha}{g} = \frac{v_0^2 \sin 2\alpha}{g}.$$

Дальность будет максимальной, когда  $\sin 2\alpha = 1$ , т. е.  $2\alpha = 90^\circ$ ,  $\alpha = 45^\circ$ .

Рассмотрим движение искусственных спутников Земли. При некотором значении начальной скорости тело, брошенное по касательной к поверхности Земли, под действием силы тяжести при отсутствии сопротивления атмосферы может двигаться вокруг Земли по окружности, не падая на Землю и не удаляясь от нее. Найдем эту скорость.

Если тело под действием силы тяжести движется вокруг Земли равномерно по окружности радиусом  $R + h$ , где  $h$  — высота полета тела над поверхностью Земли, то ускорение свободного падения тела является его центростремительным ускорением:

$$\frac{v_1^2}{R + h} = g_1.$$

Отсюда найдем *первую космическую скорость*:

$$v_1 = \sqrt{g_1(R + h)}.$$

Здесь под  $g_1$  понимается значение ускорения свободного падения на высоте  $h + R$  (естественно,  $g_1 < 9,8 \text{ м/с}^2$ ). Поскольку спутники запускаются обычно вблизи поверхности Земли и  $h \ll R_3$ , то можно считать, что  $h \approx 0$  и  $g = 9,8 \text{ м/с}^2$ . Подставив в выражение для  $v_1$  значения радиуса Земли  $R_3 = 6,38 \cdot 10^6 \text{ м}$  и ускорения свободного падения  $g = 9,8 \text{ м/с}^2$ , получим значение первой космической скорости для Земли:

$$v_1 \approx 7,9 \cdot 10^3 \text{ м/с} = 7,9 \text{ км/с}.$$

**Вес тела. Невесомость.** На любое тело, находящееся у поверхности Земли, действует сила тяжести. Под действием силы тяжес-

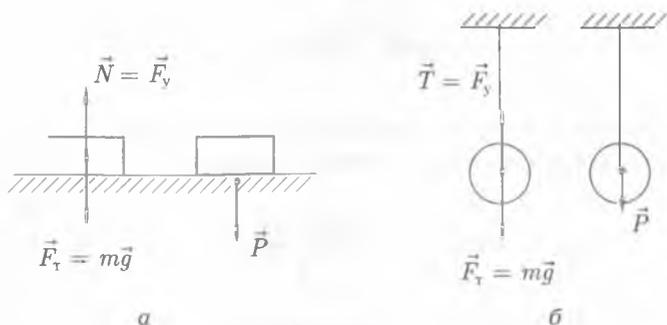


Рис. 2.7

ти  $\vec{F}_T$  тело падает с ускорением  $\vec{g}$ . Если опора (другое тело) мешает телу свободно падать, значит, она противодействует с упругой силой, называемой силой реакции опоры  $\vec{N}$ . Сила, с которой тело действует на опору, мешающую ему свободно падать, называется *весом*. Вес тела  $\vec{P}$  обычно определяют по формуле

$$\vec{P} = m\vec{g}. \quad (2.12)$$

Эта формула справедлива только при условии, что тело неподвижно или движется равномерно и прямолинейно.

Рассмотрим примеры тел, лежащих на опоре и подвешенных на нити (рис. 2.7). Обратите внимание, что вес приложен к опоре или подвесу, равен по модулю силе реакции опоры или подвеса и противоположен им по направлению:  $\vec{P} = -\vec{N}$ ;  $\vec{P} = -\vec{T}$ .

Следует различать силу тяжести, действующую на тело, и вес тела. Сила тяжести — это гравитационная сила, приложенная к телу. Вес тела — это сила упругости, приложенная к опоре или подвесу. Таким образом,

**сила, с которой тело вследствие притяжения к Земле действует на горизонтальную опору или подвес, называется *весом* тела.**

Если опора неподвижна относительно Земли (например, пол лифта в состоянии покоя), то модули силы тяжести и веса равны. Если же тело вместе с лифтом падает свободно, т. е. пол лифта не мешает телу свободно падать ( $\vec{N} = 0$ ), то вес тела становится равным нулю:  $\vec{P} = 0$ . В этом случае говорят, что тело находится в состоянии *невесомости*.

Обратим внимание, что тело может не иметь веса, но сила тяжести на него действует всегда.

Тело, падающее вместе с опорой или подвесом с ускорением  $a < g$ , легче неподвижного или опускающегося без ускорения тела:  $P = m(g - a) < mg$ .

Свободно летящее тело, на которое действует единственная сила — сила тяжести вблизи поверхности Земли или сила всемирного тяготения в далеком космическом пространстве, — находится в состоянии невесомости:  $P = 0$ , если  $a = g$ .

Поднимающееся с ускорением вместе с опорой или подвесом тело тяжелее неподвижного или поднимающегося без ускорения. Такое тело находится в состоянии перегрузки:  $P = m(g + a) > mg$ .

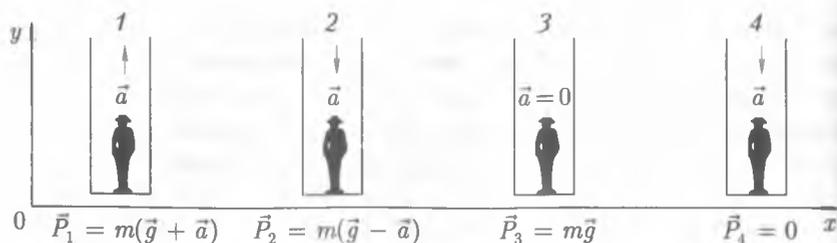


Рис. 2.8

**Пример.** Пусть в лифте находится человек массой  $m$  (рис. 2.8). На него действуют направленная вертикально вниз сила тяжести  $m\vec{g}$  и направленная вертикально вверх сила реакции опоры (на рис. 2.8 не показаны). Если лифт поднимается с ускорением  $\vec{a}$  (случай 1), то уравнение движения человека в проекции на ось  $Oy$  запишется так:

$$N_1 - mg = ma, \quad \text{откуда} \quad N_1 = m(g + a).$$

По третьему закону Ньютона с такой же по модулю силой  $P_1 = N_1$  человек давит на пол лифта. Иными словами, вес человека в системе отсчета «лифт» равен:  $P_1 = m(g + a)$ , т. е. больше силы тяжести.

Если лифт опускается с ускорением  $\vec{a}$  (случай 2), то уравнение движения человека будет следующее:

$$N_2 - mg = -ma, \quad \text{откуда} \quad N_2 = m(g - a).$$

Человек давит на пол лифта с силой  $P_2 = N_2$ , т. е. его вес в системе отсчета «лифт» меньше силы тяжести.

При равномерном движении лифта (случай 3:  $a = 0$ ) уравнение движения человека будет иметь вид

$$N_3 = mg,$$

т. е. вес человека  $P_3 = mg$ .

При свободном падении лифта (случай 4) вес человека равен нулю, т. е. относительно лифта он находится в состоянии невесомости. Действующая же на человека сила тяжести во всех случаях определяется как

$$F = mg.$$

**Силы трения.** При непосредственном соприкосновении тел возникает сила трения, направленная всегда вдоль поверхности соприкосновения. Трение между поверхностями двух твердых тел при отсутствии какой-либо прослойки между ними называется

**сухим трением.** Различают три вида сухого трения: 1) трение покоя — трение при отсутствии относительного движения соприкасающихся тел; 2) трение скольжения — трение при относительном скольжении соприкасающихся тел; 3) трение качения — трение между опорой и катящимся по ней телом. Силы трения направлены в сторону, противоположную реальному или возможному перемещению одного из этих тел относительно другого.

**Сила трения покоя** возникает тогда, когда на тело начинает действовать сила, стремящаяся вывести его из состояния покоя. Сила трения покоя — неоднозначная величина. С увеличением внешней силы  $\vec{F}$ , стремящейся придать покоящимся телам относительное перемещение, сила трения покоя возрастает от нуля до некоторого значения  $\vec{F}_{\text{тр макс}}$ , такого, что при выполнении условия  $\vec{F} > \vec{F}_{\text{тр макс}}$  тела будут двигаться. Силу  $\vec{F}_{\text{тр макс}}$  называют максимальной силой трения покоя. Эта сила пропорциональна силе реакции опоры (или равной ей силе нормального давления тела на опору):

$$\vec{F}_{\text{тр макс}} = \mu_{\text{п}} \vec{N},$$

где  $\mu_{\text{п}}$  — коэффициент трения покоя, зависящий от качества поверхностей соприкосновения.

Силу реакции опоры не всегда создает лишь сила тяжести, даже когда тело находится на горизонтальной плоскости (рис. 2.9). Когда ящик перемещается под действием горизонтальной силы  $\vec{F}$ , то он прижимается к поверхности лишь силой тяжести и сила реакции опоры равна  $m\vec{g}$  (рис. 2.9, а). Если ящик толкают с силой  $\vec{F}$ , направленной под некоторым углом к горизонту, то сила реакции опоры  $\vec{N}$  равна сумме силы тяжести  $m\vec{g}$  и вертикальной составляющей  $\vec{F}_v$  (рис. 2.9, б). Но если тот же ящик

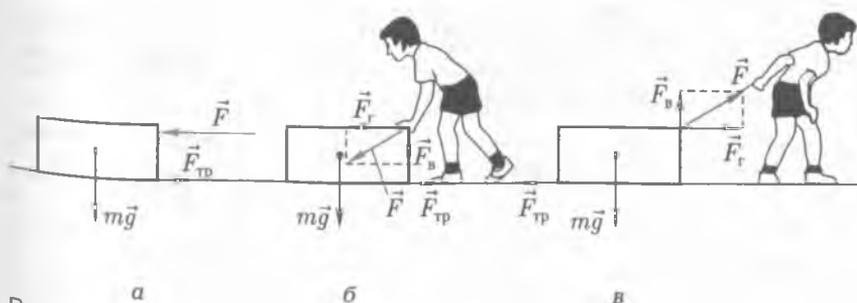


Рис. 2.9

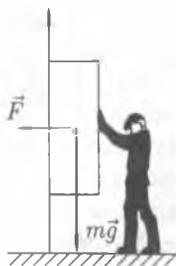


Рис. 2.10

тянут под углом к горизонту, то сила реакции опоры  $\vec{N}$  равна разности силы тяжести  $m\vec{g}$  и вертикальной составляющей  $\vec{F}_v$  (рис. 2.9, в).

Если брусок прижимают к вертикальной стене (рис. 2.10), то в этом случае силой  $\vec{N}$ , действующей по нормали к трущимся поверхностям, является только сила  $\vec{F}$ .

Обычно считают, что сила трения  $\vec{F}_{\text{тр}}$  покоя препятствует движущей силе  $\vec{F}$  привести тело в движение. Однако очень часто именно сила трения покоя позволяет телам двигаться. Например, при движении человека между подошвой его обуви и поверхностью Земли возникает сила трения покоя, которая и позволяет ему перемещаться. Из практики известно, как трудно передвигаться в гололед, когда эта сила трения становится очень малой.

**Сила трения скольжения** начинает действовать на тело после того, как оно приходит в движение и начинает скользить по поверхности другого тела под действием силы тяги. Она направлена в сторону, противоположную относительной скорости движения тела по поверхности другого тела. Убедиться в ее наличии нетрудно: если прекратить действие силы тяги, то за счет действия силы трения скольжения тело быстро остановится.

Сила трения скольжения пропорциональна силе реакции опоры (равной силе нормального давления) и зависит от качества поверхностей соприкасающихся тел:

$$F_{\text{тр ск}} = \mu_{\text{ск}} N,$$

где  $\mu_{\text{ск}}$  — коэффициент трения скольжения;  $N$  — модуль силы нормального давления, прижимающей скользящие поверхности одну к другой.

В общем случае коэффициент трения скольжения меньше коэффициента трения покоя ( $\mu_{\text{ск}} < \mu_{\text{п}}$ ). В таблице приведены значения  $\mu_{\text{п}}$  и  $\mu_{\text{ск}}$  для некоторых пар тел.

Поверхности соприкосновения	$\mu_{\text{п}}$	$\mu_{\text{ск}}$
Дерево по дереву	0,4	0,25
Дерево по льду	0,1	0,03
Резина по твердому телу	1,0 ... 4,0	1,00

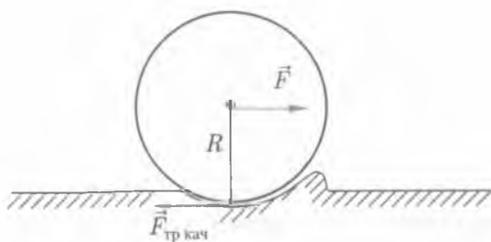


Рис. 2.11

Следует обратить внимание на то, что силы трения покоя и скольжения не зависят от площади поверхности соприкосновения трущихся тел.

Для уменьшения силы трения скольжения при перемещении какого-либо тела его обычно помещают на платформу с колесами (тележку, деревянные катки и т. п.).

**Сила трения качения** возникает в том случае, когда одно тело катится по поверхности другого. Опыты показывают, что при одинаковых условиях сила трения качения в десятки раз меньше силы трения скольжения. Катить тело намного легче, чем волоком передвигать его по поверхности другого тела.

При качении колеса перед ним образуется валик, а под ним впадина (рис. 2.11). Это и приводит к появлению сил, препятствующих движению колеса и зависящих от свойств материала колеса и дороги. Кроме того, сила трения качения зависит от силы нормального давления, прижимающей колесо к дороге, и от радиуса колеса. При увеличении радиуса колеса сила трения качения уменьшается, так как при этом уменьшается глубина лунки под колесом. Для замены трения скольжения на трение качения используют шариковые и роликовые подшипники.

**Движение тела под действием силы трения.** Из повседневного опыта каждый человек знает, что при внезапном торможении любое транспортное средство остановить невозможно. Для его остановки необходимо некоторое время, за которое он проходит так называемый тормозной путь.

Рассчитаем время  $t$ , необходимое для остановки транспортного средства, и тормозной путь  $l$  исходя из известных начальных условий: массы автомобиля  $m$  и его скорости  $v_0$ .

При торможении на автомобиль будет действовать только сила трения  $F_{\text{тр}} = -ma$ , где  $a = (v - v_0)/t$ . По условию задачи конечная скорость движения автомобиля  $v = 0$ , следовательно:

$$F_{\text{тр}} = -m \frac{0 - v_0}{t}$$

Откуда

$$t = \frac{mv_0}{F_{\text{тр}}}$$

Из формулы следует, что время торможения любого транспортного средства зависит от скорости его движения и силы трения, т. е. от состояния поверхности дороги (мокрая или сухая). Очевидно, при одинаковой начальной скорости  $v_0$  движения транспортного средства по скользкой и по сухой дороге в первом случае требуется большее время на его торможение, так как  $\mu_{\text{ск}} < \mu_{\text{н}}$ .

Для определения тормозного пути  $l$  воспользуемся формулой для равнозамедленного движения:

$$l = v_0 t - \frac{at^2}{2}$$

С учетом ранее полученных выражений

$$a = \frac{F_{\text{тр}}}{m}; \quad t = \frac{mv_0}{F_{\text{тр}}}$$

находим:

$$l = \frac{mv_0^2}{2F_{\text{тр}}}$$

Таким образом, пройденный путь до остановки пропорционален квадрату начальной скорости и массе движущегося транспортного средства. Отсюда следует простой вывод: каждый из нас должен строго выполнять правила дорожной безопасности, т. е. при переходе проезжей части внимательно смотреть на приближающийся транспорт.

### 2.3. Применение законов динамики

Законы динамики дают возможность по известной действующей на тело силе  $\vec{F}$  найти сообщаемое этой силой ускорение  $\vec{a} = \frac{\vec{F}}{m}$ , а с помощью формул кинематики рассчитать его движение при известном положении и скорости тела в начальный момент времени (прямая задача динамики).

Справедливо и обратное утверждение: если известно, как движется тело, то можно найти ускорение  $\vec{a}$  и с помощью второго закона Ньютона  $\vec{F} = m\vec{a}$  рассчитать действующую на него силу  $\vec{F}$  (обратная задача динамики).

Рассмотрим применение законов динамики на примере конкретных задач. Для разбираемых примеров систему отсчета, связанную с Землей, можно с достаточной степенью точности считать инерциальной.

**Пример 1.** Груз массой  $m$  равноускоренно поднимается с помощью каната вертикально вверх за время  $t$  на высоту  $h$ . Определить силу натяжения каната  $\vec{T}$ . Решить эту задачу для случая, когда груз поднимается вверх равномерно и опускается вниз с ускорением  $\vec{a}_1$ .

**Решение.** 1. На груз действуют сила тяжести  $\vec{P} = m\vec{g}$  и сила натяжения каната  $\vec{T}$  (рис. 2.12). Так как груз движется равноускоренно вверх, то вектор ускорения  $\vec{a}$  также направлен вверх. Запишем для груза уравнение второго закона Ньютона в векторной форме:

$$\vec{T} + m\vec{g} = m\vec{a}. \quad (I)$$

Проведем ось  $y$  в направлении движения груза и, найдя проекции сил на ось, напишем уравнение (I) в скалярной форме:

$$T - mg = ma, \text{ или } T = mg + ma = m(g + a).$$

Так как движение равноускоренное и начальная скорость равна нулю, то

$$h = \frac{at^2}{2},$$

откуда

$$a = \frac{2h}{t^2}.$$

Тогда

$$T = m \left( g + \frac{2h}{t^2} \right).$$

2. Если груз равномерно движется вверх ( $\vec{a} = 0$ ), то  $\vec{T} = \vec{P}$ , т.е. сила натяжения равна силе тяжести.

3. Если груз опускается вертикально вниз с ускорением  $\vec{a}_1$ , то уравнение (I) в проекциях на ось  $y$  запишется в виде

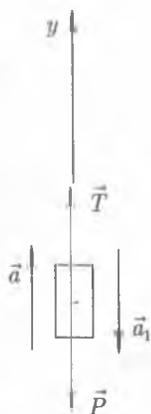


Рис. 2.12

$$-ma_1 = T - mg, \text{ или } T = m(g - a_1).$$

Если груз будет опускаться с ускорением  $a_1 = g$ , то  $T = 0$ . Это есть состояние невесомости, испытываемое телом при свободном падении.

Таким образом, решая обратную задачу динамики, мы обнаружили следующее:

- при равноускоренном движении груза вертикально вверх сила натяжения больше силы тяжести;
- при равномерном движении  $\vec{P} = \vec{T}$ ;
- при ускоренном движении вниз сила натяжения меньше силы тяжести;
- при свободном падении груза  $\vec{T} = 0$ .

**Пример 2.** Автомобиль массой  $m$  поднимается по шоссе, имеющему угол уклона  $\alpha$ , под действием силы тяги  $\vec{F}$ . Коэффициент трения между шинами автомобиля и поверхностью шоссе  $\mu$ . Найти ускорение автомобиля.

Решение. На автомобиль действуют:  $\vec{P}$  — сила тяжести,  $\vec{N}$  — сила нормальной реакции шоссе,  $\vec{F}_{\text{тр}}$  — сила трения,  $\vec{F}$  — сила тяги. Вектор  $\vec{a}$  по условию задачи направлен вдоль наклонной плоскости (рис. 2.13). Запишем для автомобиля уравнение второго закона Ньютона в векторной форме:

$$\vec{F} + \vec{P} + \vec{N} + \vec{F}_{\text{тр}} = m\vec{a}.$$

Спроецируем обе части этого уравнения на выбранные направления осей  $x$  и  $y$ :

$$F - mg \sin \alpha - F_{\text{тр}} = ma; \quad (I)$$

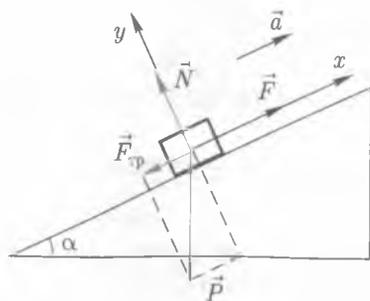


Рис. 2.13

$$-mg \cos \alpha + N = 0. \quad (\text{II})$$

Из уравнения (II) находим, что  $N = mg \cos \alpha$ .  
Учитывая, что  $F_{\text{тр}} = \mu N = \mu mg \cos \alpha$ , запишем уравнение (I) в виде

$$F - mg \sin \alpha - \mu mg \cos \alpha = ma.$$

Откуда

$$a = \frac{F - mg(\sin \alpha + \mu \cos \alpha)}{2}.$$

При решении данной задачи мы показали пример реализации прямой задачи динамики.

**Пример 3.** Определить силу давления автомобиля массой  $m$ , проезжающего со скоростью  $v$  через середину горизонтального, выпуклого и вогнутого мостов. Радиус кривизны равен  $R$ .

**Решение.** При движении автомобиля по мосту на него действуют сила тяжести  $\vec{P}$ , направленная вниз, и сила реакции моста  $\vec{N}$ , направленная вверх (сила трения не учитывается). Рассмотрим три случая движения автомобиля по мосту.

1. На горизонтальном мосту согласно третьему закону Ньютона эти силы равны по величине, противоположно направлены и приложены к разным телам. Мост оказывает давление на автомобиль с такой силой, с какой автомобиль давит на него:  $\vec{N}_1 = -\vec{P}$  (рис. 2.14, а).

2. При движении автомобиля по выпуклому мосту (рис. 2.14, б) на него также действуют сила тяжести  $\vec{P}$ , направленная вниз, и сила реакции моста  $\vec{N}_2$ , направленная вверх. Так как автомобиль при движении не отрывается от моста вследствие инерции, то это значит, что сила трения больше силы реакции моста. Равнодействующая этих сил является центростремительной силой, совпадающей с направлением силы тяжести автомобиля. Следовательно,  $F_{\text{цс}} = P - N_2$ . Откуда

$$N_2 = P - F_{\text{цс}} \quad \text{или} \quad N_2 = m \left( g - \frac{v^2}{R} \right).$$

К этому же результату можно прийти при непосредственном использовании второго закона Ньютона применительно к движению автомобиля по выпуклому мосту. В этом случае направляем ось  $y$  вертикально вниз по радиусу моста и записываем для автомобиля уравнение второго закона Ньютона в векторной форме:

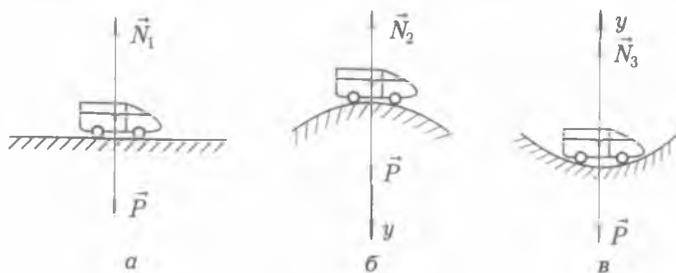


Рис. 2.14

$$\vec{P} + \vec{N}_2 = m\vec{a},$$

где  $a = \frac{v^2}{R}$ .

Проецируя это уравнение на ось  $y$ , получаем

$$mg - N_2 = m \frac{v^2}{R},$$

откуда

$$N_2 = m \left( g - \frac{v^2}{R} \right).$$

3. При движении автомобиля по вогнутому мосту (рис. 2.14, в) сила реакции моста не только уравновешивает силу тяжести автомобиля, но и придает ему центростремительное ускорение. Равнодействующая силы реакции моста  $N_3$  и силы тяжести автомобиля  $P$  является центростремительной силой, совпадающей с направлением силы реакции моста. Следовательно,  $F_{\text{цс}} = N_3 - P$ . Откуда

$$N_3 = P + F_{\text{цс}}$$

или

$$N_3 = mg + \frac{mv^2}{R} = m \left( g + \frac{v^2}{R} \right).$$

Этот же результат можно получить более просто, используя непосредственно второй закон Ньютона применительно к движе-

нию автомобиля по вогнутому мосту. Направляя ось  $y$  вертикально вверх к центру окружности и проецируя на нее векторное уравнение второго закона Ньютона ( $\vec{P} + \vec{N}_3 = m\vec{a}$ ), получим

$$-mg + N_3 = \frac{mv^2}{R},$$

откуда

$$N_3 = m \left( g + \frac{v^2}{R} \right).$$

При движении тела по любой кривой на него действует центростремительная сила, направленная по радиусу кривизны. На связь, удерживающую тело на криволинейной траектории, действует центробежная сила, равная по модулю центростремительной (на основании третьего закона Ньютона). Они противоположны по направлению и не уравниваются друг друга, так как приложены к разным телам.



## ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ВЫВОДЫ

1. Опыты показывают, что изменение скорости данного тела (т.е. ускорение) вызывается действием на тело каких-то других тел (или полей). Мера взаимодействия материальных тел характеризуется векторной величиной — силой. Если на тело действует одновременно несколько сил, то их действие заменяется действием одной силы — равнодействующей сил.

Каждое тело обладает массой. Масса — одна из основных количественных характеристик материи, характеризующая инертные свойства тела. Сравнить массы тел можно по ускорениям, приобретаемым телами при их взаимодействии.

Раздел механики, изучающий закономерности движения тел (частиц) под действием приложенных к ним сил, называется динамикой. В основе динамики лежат три закона Ньютона.

Первый закон Ньютона утверждает, что существуют системы отсчета, называемые инерциальными, относительно которых тела, не подверженные внешним воздействиям, движутся равномерно и прямолинейно или находятся в состоянии покоя.

Второй закон Ньютона устанавливает связь между силой, массой и ускорением и дает количественную характеристику дей-

ствию одного тела на другое: ускорение, сообщенное телу другим телом (или телами), прямо пропорционально действующей силе и обратно пропорционально массе тела:

$$\vec{a} = \frac{\vec{F}}{m} \quad \text{или} \quad \vec{a} = \frac{\sum \vec{F}_i}{m}.$$

Третий закон Ньютона описывает взаимодействие тел: тела действуют друг на друга с силами, равными по величине и противоположными по направлению. Эти силы приложены к разным телам.

Законы Ньютона справедливы во всех инерциальных системах отсчета. С помощью этих законов можно вычислить положение и скорость тела в любой момент времени по известным силам и начальным условиям (прямая задача механики) или найти силы по заданному движению (обратная задача).

2. В механике рассматривают преимущественно три вида сил: *силы упругости*, *силы трения* и *силы тяжести*, которые являются проявлением двух типов взаимодействий — электромагнитных и гравитационных.

Сила всемирного тяготения зависит от масс взаимодействующих тел и расстояния между ними и определяется **законом всемирного тяготения**

$$F = G \frac{m_1 m_2}{R^2},$$

где  $G = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ (Н}\cdot\text{м}^2\text{)/кг}^2$  — **гравитационная постоянная**.

Этот закон определяет ускорение свободного падения вблизи поверхности Земли:

$$g = \frac{GM_3}{R_3^2} \approx 9,8 \text{ м/с}^2,$$

где  $M_3$  — масса Земли;  $R_3$  — радиус Земли.

Силу всемирного тяготения, действующую на тело со стороны Земли, называют *силой тяжести*. Вблизи поверхности Земли она равна  $mg$  и может считаться постоянной, если расстояние  $h$  до Земли удовлетворяет условию  $h \ll R_3$ .

Силу тяжести следует отличать от веса. Весом называют силу, с которой тело вследствие притяжения его к Земле действует на

опору или подвес. Вес зависит от ускорения, с которым движется тело, и может быть определен по формуле

$$P = m(g \pm a).$$

При свободном падении тела ( $a = g$ ) наступает состояние невесомости ( $P = 0$ ), а при ускоренном движении по вертикали вверх — состояние перегрузки.

Сила упругости возникает при деформации тела. В соответствии с законом Гука для упругих деформаций сила упругости пропорциональна удлинению (сжатию):

$$F_{\text{упр}} = -kx.$$

Сила трения возникает между телами, соприкасающимися друг с другом и находящимися в состоянии покоя (трение покоя) или в состоянии движения (трение скольжения). Сила трения скольжения действует в направлении, противоположном скорости движения одного из этих тел относительно другого. Сила трения скольжения примерно равна максимальной силе трения покоя, модуль которой определяется по формуле

$$F_{\text{тр max}} = \mu N,$$

где  $\mu$  — коэффициент трения;  $N$  — модуль силы нормальной реакции опоры.



## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ

1. Каковы задачи динамики (прямая и обратная)?
2. Каков физический смысл массы тела? Каким свойством она обладает?
3. Каков физический смысл силы? По какому признаку можно судить о том, что к телу приложена сила?
4. Сформулируйте три закона динамики и объясните их физический смысл.
5. Если электровоз резко двигается с места, то может произойти разрыв сцепления вагонов. Почему?
6. На полке в вагоне поезда лежат книга и мяч. Почему, когда поезд тронулся с места, мяч скатился, а книга осталась в покое? В какую сторону покотился мяч?
7. Поезд массой 10 кг за 1 мин увеличил скорость с 54 до 72 км/ч. Найдите силу тяги, если коэффициент сопротивления движению равен 0,003.

Ответ:  $F_T = 80$  кН.

8. Груз массой 45 кг движется по горизонтальной поверхности под действием силы 294 Н, направленной под углом  $30^\circ$  к горизонту. Коэффициент трения равен 0,1. Определите ускорение груза. При какой силе тело будет двигаться равномерно?  
*Ответ:*  $a = 5,9 \text{ м/с}^2$ ;  $F = 50 \text{ Н}$ .
9. Лыжник массой 60 кг, имеющий в конце спуска скорость 10 м/с, остановился через 40 с после окончания спуска. Определите значение силы сопротивления.  
*Ответ:*  $F = 15 \text{ Н}$ .
10. На сколько удлинится резиновый шнур под действием силы 5 Н, если его жесткость 25 Н/м?  
*Ответ:*  $\Delta l = 0,2 \text{ м}$ .
11. Мальчик массой 50 кг, скатившись на санках с горки, проехал по горизонтальной дороге до остановки путь 20 м за 10 с. Найдите силу трения и коэффициент трения.  
*Ответ:*  $F = 20 \text{ Н}$ ;  $k_{\text{тр}} = 0,04$ .
12. Определите, с какой силой давит летчик на сиденье кресла самолета в верхней и нижней точках петли Нестерова. Масса летчика 80 кг, радиус петли 250 м, скорость самолета 540 км/ч.  
*Ответ:*  $N_{\text{в}} = 6\,400 \text{ Н}$ ;  $N_{\text{н}} = 8\,000 \text{ Н}$ .
13. Ракета поднимается вертикально вверх с ускорением  $a = 3g$ . Каков будет в ней вес тела массой 10 кг? Какая сила тяги действует на него?  
*Ответ:*  $P = 400 \text{ Н}$ ;  $F_{\text{т}} = 100 \text{ Н}$ .
14. На какую высоту над поверхностью Земли нужно поднять тело, чтобы его вес уменьшился в два раза?  
*Ответ:*  $h = 2,6 \cdot 10^6 \text{ м}$ .
15. Определите модуль Юнга алюминия, если груз массой 210 кг, подвешенный к алюминиевому стержню поперечного сечения  $150 \text{ мм}^2$ , дает относительную деформацию 0,02%.  
*Ответ:*  $E = 6,9 \cdot 10^{10} \text{ Н/м}^2$ .
16. Какую скорость необходимо сообщить спутнику, чтобы вывести его на круговую орбиту на расстоянии 400 км от поверхности Земли?  
*Ответ:*  $v = 7\,700 \text{ м/с}$ .
17. Автомобиль движется со скоростью 72 км/ч. Каков наименьший радиус поворота автомобиля, если коэффициент трения скольжения колес по поверхности дороги равен 0,5?  
*Ответ:*  $r = 80 \text{ м}$ .

### 3.1. Импульс тела. Закон сохранения импульса

**Общая характеристика законов сохранения.** В этой главе мы рассмотрим два закона сохранения — закон сохранения импульса и закон сохранения энергии. Эти законы занимают особое место среди всех законов механики, поскольку являются общими и универсальными законами не только механики, но и физики в целом. Использование законов сохранения позволяет взглянуть на изучаемые явления с более общих позиций. Например, можно ответить на вопросы о взаимодействиях и взаимных превращениях элементарных частиц, хотя конкретные законы их взаимодействия неизвестны.

Справедливость фундаментальных законов сохранения обычно подтверждается опытным путем, но иногда они могут быть получены из законов, изучаемых в определенном разделе курса физики, например в механике. Так, для механических явлений законы сохранения импульса и энергии являются прямым следствием законов Ньютона.

**Импульс тела** — это одна из фундаментальных характеристик физической системы. Импульс замкнутой системы сохраняется при любых происходящих в ней физических процессах.

Для знакомства с понятием импульса представим второй закон Ньютона в виде

$$\vec{F} = m \left( \frac{\vec{v} - \vec{v}_0}{t} \right) = \frac{m\vec{v} - m\vec{v}_0}{t}, \quad (3.1)$$

где  $\frac{\vec{v} - \vec{v}_0}{t} = \vec{a}$ .

Величина  $\vec{p} = m\vec{v}$  и есть импульс тела.

**Импульс тела (импульс)** — векторная физическая величина характеризующая движущееся тело, равная произведению массы тела на его скорость.

Направление импульса тела совпадает с направлением скорости его движения. Единица измерения импульса в СИ — (кг·м)/с.

Из определения импульса следует, что при действии на тело силы  $\vec{F}$  изменяется его скорость, а значит, и импульс тела  $\Delta\vec{p} = m\Delta\vec{v}$ . Разделив это равенство на  $\Delta t$  и учитывая, что

$$\frac{\Delta\vec{v}}{\Delta t} = \vec{a}; \vec{F} = m\vec{a}, \text{ получим}$$

$$\frac{\Delta\vec{p}}{\Delta t} = \vec{F}. \quad (3.2)$$

*Скорость изменения импульса тела (материальной точки) равна равнодействующей всех действующих на него сил.*

**Импульс силы.** Представим формулу (3.1) в виде

$$\vec{F}t = m\vec{v} - m\vec{v}_0. \quad (3.3)$$

*Величина, равная произведению силы на время ее действия, называется импульсом силы. Тогда выражение (3.3) можно сформулировать следующим образом: импульс силы, действующей на тело, равен изменению импульса тела. (Формулировка второго закона Ньютона в импульсной форме.)*

Анализируя закон действия силы в формуле (3.3), можно сделать следующие выводы:

- одно и то же изменение импульса тела можно получить действуя малой силой длительное время или большой силой кратковременно;
- если импульсы сил, действующих на разные тела, одинаковы, то у тел с большей массой скорость изменится на меньшее значение.

**Закон сохранения импульса.** Допустим, что на данное тело массой  $m_1$  действует только тело массой  $m_2$ . Если сила, испытываемая телом  $m_1$ , равна  $\vec{F}_1$ , то и на второе тело со стороны первого будет действовать сила  $\vec{F}_2$ . По третьему закону Ньютона  $\vec{F}_1 = -\vec{F}_2$ . Поскольку продолжительность взаимодействия  $\Delta t$  одинакова для обоих тел, то  $\vec{F}_1\Delta t = -\vec{F}_2\Delta t$ . Но  $\vec{F}_1\Delta t$  равно изменению им-

пульса  $m_1(\vec{v}_1 - \vec{v}'_1)$  первого тела, а  $\vec{F}_2\Delta t$  — изменению импульса  $m_2(\vec{v}_2 - \vec{v}'_2)$  второго тела, поэтому

$$m_1(\vec{v}_1 - \vec{v}'_1) = -m_2(\vec{v}_2 - \vec{v}'_2).$$

Таким образом, в процессе взаимодействия импульсы тел изменяются на одинаковую величину, но направления приращений импульсов противоположны друг другу. Последнее равенство можно переписать так:

$$m_1\vec{v}_1 + m_2\vec{v}_2 = m_1\vec{v}'_1 + m_2\vec{v}'_2.$$

Отсюда следует важный вывод.

**Закон сохранения импульса: при взаимодействии двух тел сумма импульсов, или общий импульс, не изменяется с течением времени.**

В справедливости этого закона легко убедиться на опытах с легкоподвижными тележками (рис. 3.1). Если пережечь нить, удерживающую пружину в сжатом состоянии, то тележки придут в равномерное движение, и мы убедимся, что

$$m_1s_1 = m_2s_2, \text{ или } m_1v_1\Delta t = m_2v_2\Delta t.$$

В векторной форме последнее равенство запишется так:

$$m_1\vec{v}_1 = -m_2\vec{v}_2, \text{ или } m_1\vec{v}_1 + m_2\vec{v}_2 = 0.$$

Мы установили закон сохранения импульса в случае взаимодействия только двух тел.

Любые два и более взаимодействующих тела всегда можно рассматривать как систему. Силы, с которыми взаимодействуют между собой тела системы, называют *внутренними*, а силы, создаваемые телами, не принадлежащими к данной системе, — *внешними*. Систему, на которую не действуют внешние силы, называют *замкнутой*, или *изолированной*.

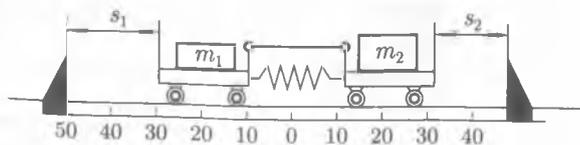


Рис. 3.1



Рис. 3.2

Закон сохранения импульса (применительно к изолированным системам): импульс изолированной системы не изменяется со временем:

$$\vec{p} = \vec{p}_1 + \vec{p}_2 + \dots + \vec{p}_n = \text{const.}$$

В изолированной системе тела могут только обмениваться импульсами, суммарное же значение импульса не изменяется.

Примерами проявления закона сохранения импульса служат:

- отдача при стрельбе — при выстреле снаряд и пушка получают равные и противоположные по направлению импульсы;
- реактивное движение — при сгорании топлива в камере сгорания ракеты образуются газы. Нагретые до высокой температуры, эти газы выбрасываются из ракеты. На основании закона сохранения импульса ракета и горячие газы получают в результате взаимодействия равные и противоположно направленные импульсы (рис. 3.2).

### 3.2. Работа и энергия. Закон сохранения механической энергии

**Механическая работа.** В повседневной жизни очень часто пользуются терминами «работа» и «энергия». Первый термин обозначает всякий вид деятельности, а второй подразумевает возможность выполнения этой деятельности, поскольку без наличия энергии невозможно выполнить какую-либо работу — физическую или умственную.

Однако в физике понятие работы используется в более узком смысле, чем в быту. О механической работе говорят только в том

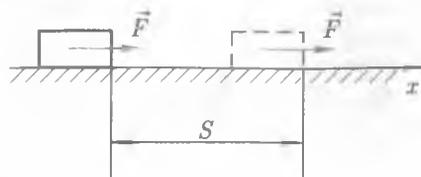


Рис. 3.3

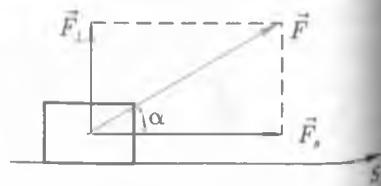


Рис. 3.4

случае, если тело перемещается под действием приложенной к нему силы.

Пусть на тело (рис. 3.3) действует в горизонтальном направлении сила  $\vec{F}$ , и тело совершает в направлении действия силы перемещение  $S$ .

**Работой  $A$  силы в этом случае называют произведение модулей силы и перемещения:**

$$A = FS.$$

В общем случае (рис. 3.4), когда между направлением постоянной силы и перемещением имеется какой-то угол, работа постоянной силы равна произведению модулей силы и перемещения и косинуса угла между этими векторами:

$$A = F_s S = FS \cos \alpha, \quad (3.4)$$

где  $F_s = F \cos \alpha$  — составляющая действующей силы  $\vec{F}$ , которая и совершает работу перемещения.

Если на движущееся тело действует несколько сил, то работа их равнодействующей вычисляется по формуле (3.4).

Проанализируем формулу (3.4).

1. Работа положительна, когда направления силы и перемещения совпадают:  $\alpha = 0$ ;  $\cos \alpha = 1$ ;  $A = FS > 0$ . Работа также положительна, когда угол между ними острый:  $\alpha < 90^\circ$ ;  $\cos \alpha > 0$ ;  $A > 0$ .

2. Работа отрицательна, когда направление силы и перемещения противоположны:  $\alpha = 180^\circ$ ;  $\cos \alpha = -1$ ;  $A = -FS < 0$ . Работа также отрицательна, если угол между ними тупой:  $\alpha > 90^\circ$ ;  $\cos \alpha < 0$ ;  $A < 0$ .

3. Работа равна нулю, если: а)  $\vec{F} \neq 0$ , но тело не перемещается ( $S = 0$ ); б)  $\vec{F} = 0$ , а перемещение  $S \neq 0$ ; в) если сила действует ( $\vec{F} \neq 0$ ) и тело перемещается ( $S \neq 0$ ), но сила перпендикулярна перемещению ( $\vec{F} \perp \vec{S}$ ;  $\alpha = 90^\circ$ ). Такая сила изменяет только направление скорости, но не ее значение (модуль). Примером может служить спутник, движущийся по круговой орбите вокруг Земли. В этом случае сила всемирного тяготения, действующая на спутник, не совершает работы.

Работа — скалярная величина, сила и перемещение — векторные величины. О работе нельзя сказать, что она куда-то направлена. За единицу работы в СИ принимается джоуль (Дж).

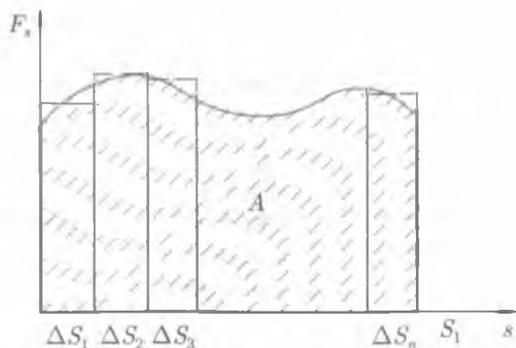


Рис. 3.5

**Работа переменной силы.** Если при перемещении тела действующая на него сила меняется, то для вычисления ее работы траекторию нужно разбить на малые части, в пределах которых силу можно считать постоянной. Затем следует определить работу на каждом таком участке и сложить все полученные результаты. Это и будет работа силы на интересующем нас перемещении. Для нахождения работы можно воспользоваться графиком проекции силы на направление перемещения (рис. 3.5). Здесь произведенная силой работа на перемещении  $S_1$  будет численно равна площади заштрихованной области под графиком.

Действительно, если разбить все перемещение на очень малые перемещения  $\Delta S_1, \Delta S_2, \dots, \Delta S_n$ , такие, чтобы в пределах этих перемещений проекцию силы можно было считать постоянной, то работу  $A$  приближенно можно вычислить по сумме площадей прямоугольников, составляющих площадь под графиком проекции силы.

**Мощность.** Часто в практической деятельности мы сталкиваемся с необходимостью оценить быстроту совершения работы. Величина, характеризующая быстроту совершения работы, называется мощностью.

**Мощность** — физическая величина, равная отношению совершенной работы  $A$  за некоторое время  $t$  к этому времени:

$$N = \frac{A}{t}$$

(3.5)

Мощность показывает, какая работа совершается за единицу времени. В СИ мощность измеряется в ваттах (Вт).

Мощность — это основная характеристика любой машины, двигателя или устройства, используемого для совершения работы. Чтобы определить мощность, развиваемую силами, приводящими тело в движение, т. е. силами, направленными в ту же сторону, что и вектор перемещения тела, подставим (3.4) в (3.5). Тогда, считая скорость постоянной ( $v = \text{const}$ ), получим

$$N = \frac{A}{t} = \frac{FS \cos \alpha}{t} = F \frac{S}{t} \cos \alpha = \bar{F}v \cos \alpha. \quad (3.6)$$

Если направления векторов перемещения и равнодействующей этих сил совпадают, то  $\cos \alpha = 1$  и

$$N = Fv.$$

Таким образом, развиваемая мощность определяется скоростью установившегося движения тела, а при постоянной мощности, например двигателя автомобиля, можно увеличивать скорость автомобиля, уменьшая его силу тяги. Это явление широко используется в современной технике: водитель и тракторист, машинист электровоза, токарь и фрезеровщик часто используют коробку передач для регулирования необходимой скорости при соответствующей силе тяги.

**Механическая энергия.** С понятием работы тесно связано фундаментальное физическое понятие — энергия. В общем случае

**энергия** — это скалярная физическая величина, являющаяся общей количественной мерой движения и взаимодействия всех видов материи.

Энергия не возникает из ничего и не исчезает, она только может переходить из одной формы в другую. В соответствии с различными формами движения материи различают разные формы энергии: механическую (кинетическую и потенциальную), электромагнитную, внутреннюю, ядерную и др. Единица измерения энергии в СИ — джоуль (Дж).

Поскольку в механике изучается движение тел и взаимодействие тел между собой, то принято различать два вида механической энергии: кинетическую энергию, обусловленную движением тела, и потенциальную энергию, обусловленную взаимодействием тела со своим окружением. Кинетическая энергия, очевидно,

должна зависеть от скорости движения тела  $v$ , а потенциальная — от взаимного расположения взаимодействующих тел или их отдельных частей.

**Кинетическая энергия.** Кинетической энергией обладает движущееся тело.

**Кинетической энергией  $E_k$  тела массой  $m$ , движущегося со скоростью  $v$ , называется скалярная величина, пропорциональная массе тела и квадрату скорости его перемещения:**

$$E_k = \frac{mv^2}{2}. \quad (3.7)$$

Покажем справедливость этой формулы для простейшего случая, когда на тело, находящееся в покое, начинает действовать постоянная сила  $\vec{F}$ . Тело будет двигаться в направлении действующей силы с постоянным ускорением  $\vec{a} = \frac{\vec{F}}{m}$ . Поэтому для работы на основе выражения (3.4) с учетом определений ускорения, средней скорости при  $v_0 = 0$  и предположения о совпадении направлений действия силы и перемещения ( $\cos \alpha = 1$ ) получим

$$A = FS \cos \alpha = ma\Delta S = m \frac{v}{t} \frac{v}{2} t = \frac{mv^2}{2}. \quad (3.8)$$

Так как кинетическая энергия покоящегося тела равна нулю то совершенная при разгоне работа равна изменению кинетической энергии тела.

Если в начальный момент тело уже имеет скорость  $v_0$ , а направление действующей на него с этого момента постоянной силы  $\vec{F}$  является произвольным и не совпадает с направлением скорости, то на основе второго закона Ньютона имеем

$$A = F\Delta S = ma\Delta S = m \frac{v - v_0}{t} \frac{v + v_0}{2} t = \frac{mv^2}{2} - \frac{mv_0^2}{2}. \quad (3.9)$$

Как видно из выражения (3.9), в этом случае изменение кинетической энергии тела также равно работе действующей на него силы. Иначе говоря, для движущегося тела работа любой силы (или равнодействующей всех сил) определяется изменением его кинетической энергии:

$$A = \Delta E_k = E_{k2} - E_{k1} = \frac{mv^2}{2} - \frac{mv_0^2}{2}. \quad (3.10)$$

Если сила направлена в сторону перемещения, то она совершает положительную работу и увеличивает кинетическую энергию тела; если же она тормозит движение тела, т. е. сила направлена противоположно перемещению и совершает отрицательную работу, то кинетическая энергия тела уменьшается.

**Потенциальная энергия.** Наряду с кинетической энергией, которой обладает движущееся тело, существует потенциальная энергия тела, обусловленная его взаимодействием с другими телами. Потенциальной энергией, например, обладает тело, поднятое относительно поверхности Земли, поскольку оно взаимодействует с Землей. При этом поднятое тело может совершить под действием силы тяжести  $\vec{F}_T$  работу, определяемую равенством

$$A = F_T h, \quad (3.11)$$

где  $F_T$  и  $h$  — модули векторов силы и перемещения.

Используя второй закон Ньютона ( $\vec{F}_T = m\vec{g}$ ), можно переписать равенство (3.11) в виде

$$A = mgh.$$

**Работа, равная  $mgh$ , называется потенциальной энергией  $E_n$  тела, поднятого на высоту  $h$  над поверхностью Земли:**

$$E_n = mgh. \quad (3.12)$$

Из формулы (3.12) видно, что чем выше тело поднято над Землей, тем большей потенциальной энергией оно обладает.

При падении тела с высоты  $h_1$  до высоты  $h_2$  (рис. 3.6) над Землей сила тяжести совершает работу

$$A = mgh = mg(h_1 - h_2) = mgh_1 - mgh_2.$$

Учитывая, что  $E_{n1} = mgh_1$  и  $E_{n2} = mgh_2$ , получим

$$A = E_{n1} - E_{n2} = -(E_{n2} - E_{n1}) = -\Delta E_n. \quad (3.13)$$

Знак «-» означает, что потенциальная энергия падающего тела уменьшается. Из уравнения (3.13) следует, что работа силы тяжести равна изменению потенциальной энергии тела, взятому с противоположным знаком. Очевидно, что только изменение потенциальной энергии определяет работу, совершаемую силой тяжести.

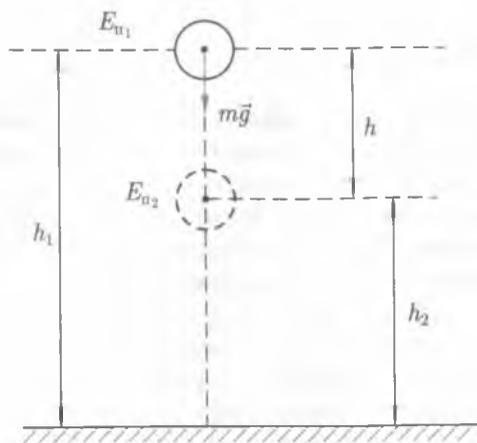


Рис. 3.6

Работу могут производить и силы упругости, возникающие при упругой деформации тел. Эти силы пропорциональны деформации:  $F = k\Delta l$ . Поэтому потенциальная энергия упругой деформации зависит от величины деформации.

Например, при растяжении или сжатии на  $\Delta l$  упругой пружины потенциальная энергия

$$E_{\text{п}} = \frac{1}{2} k (\Delta l)^2. \quad (3.14)$$

Здесь принято, что в положении равновесия потенциальная энергия равна нулю.

Действительно, если тело прикреплено к растянутой или сжатой пружине (рис. 3.7), то на него действует сила упругости, равная по закону Гука  $F_{\text{упр}} = k\Delta l$ . Тогда потенциальная энергия тела будет равна работе, совершаемой этой силой при перемещении тела из данного положения в нулевое. В процессе этого перемещения сила упругости меняется от  $k\Delta l$  до 0, следовательно, ее среднее значение будет равно  $F_{\text{ср}} = (k\Delta l)/2$ . Тогда работу этой силы можно определить из условия

$$A = F_{\text{ср}} \Delta l = \frac{k\Delta l}{2} \Delta l = \frac{k(\Delta l)^2}{2}.$$

Выражение (3.14) можно переписать в виде

$$E_{\text{п}} = \frac{1}{2} kx^2,$$

где  $x$  — координата тела, отсчитываемая от нулевого положения и равная удлинению пружины ( $x = \Delta l$ ).

В общем случае при переходе тела из начального положения с координатой  $x_1$  в конечное положение с координатой  $x_2$  изменение потенциальной энергии будет  $\Delta E_{\text{п}} = \frac{k}{2}(x_2^2 - x_1^2)$ , а работа

силы упругости  $A = \frac{k}{2}(x_2^2 - x_1^2)$ , т. е. между работой силы упругости и изменением потенциальной энергии существует связь:

$$A_{\text{упр}} = -\Delta E_{\text{п}}. \quad (3.15)$$

**Потенциальная энергия упруго деформированного тела есть энергия взаимодействия частиц, из которых состоит тело.**

Поэтому эта энергия зависит только от состояния тела или системы тел (в частности, от расположения отдельных составных частей тела) и не зависит от того, каким образом тело (система) в этом состоянии оказалось. Следовательно, и работа, совершаемая при переходе системы из одного состояния в другое, не зависит от того, каким путем совершается этот переход.

**Силы, работа которых не зависит от формы траектории, а определяется только начальным и конечным положением тела, называются консервативными (например, силы тяжести и силы упругости).**

Силы трения, часто встречающиеся в механике, не являются консервативными, так как работа этих сил зависит не от переме-

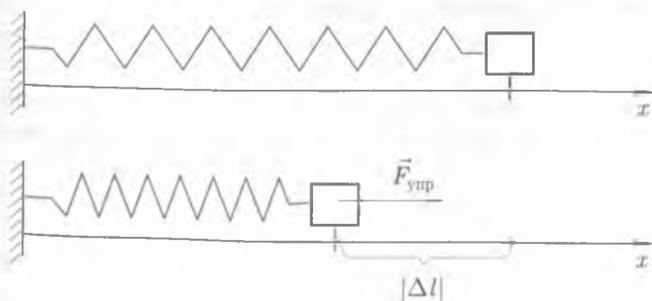


Рис. 3.7

щения, а от пути (формы траектории), на котором тела взаимодействуют.

Сопоставляя выражения (3.13) и (3.15), приходим к выводу, что

**работа любых консервативных сил равна изменению потенциальной энергии, взятому с противоположным знаком:**

$$A_{\text{конс}} = -\Delta E_{\text{п}}.$$

**Полная механическая энергия.** Система взаимодействующих тел может обладать как кинетической, так и потенциальной энергией. Кинетической, поскольку тела могут двигаться, и потенциальной, потому что одновременно они могут взаимодействовать между собой посредством консервативных сил. В связи с этим

**полная механическая энергия представляет собой сумму кинетической и потенциальной энергий:**

$$E = E_{\text{к}} + E_{\text{п}}.$$

**Закон сохранения полной механической энергии.** Если тела взаимодействуют только между собой и на них не действуют внешние силы, то такую совокупность тел называют замкнутой системой.

Рассмотрим падение мяча на землю. В этом случае, пренебрегая сопротивлением воздуха, систему тел «Земля — мяч» можно считать замкнутой. При падении мяча его потенциальная энергия уменьшается, а кинетическая увеличивается, так как скорость мяча возрастает. Ранее было установлено (см. формулу (3.13)), что работа силы тяжести

$$A = -(E_{\text{п}2} - E_{\text{п}1}) = -\Delta E_{\text{п}}.$$

С другой стороны, по формуле (3.10) работа этих же сил равна изменению кинетической энергии системы тел:

$$A = E_{\text{к}2} - E_{\text{к}1} = \Delta E_{\text{к}}.$$

В левой части этих равенств стоит одна и та же величина — работа силы тяжести  $A$ . Следовательно, и правые части должны быть равны:

$$E_{\text{к}2} - E_{\text{к}1} = -(E_{\text{п}2} - E_{\text{п}1}).$$

Откуда

$$E_{\text{к}2} + E_{\text{п}2} = E_{\text{к}1} + E_{\text{п}1},$$

или

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

(3.16)

Полученное выражение (3.16) представляет собой

**закон сохранения полной механической энергии: полная механическая энергия замкнутой системы тел, взаимодействующих между собой посредством консервативных сил, остается неизменной при любом движении этих тел.**

Вернемся к примеру падения мяча на землю. Полная механическая энергия падающего мяча в начальный момент времени  $E = E_n = mgh$ , так как кинетическая энергия в этот момент равна нулю, а при соприкосновении мяча с Землей  $E = E_k = \frac{mv^2}{2}$ , поскольку его потенциальная энергия в этот момент равна нулю. Тогда

$$mgh = \frac{mv^2}{2}.$$

Отсюда следует, что *при механическом движении замкнутых систем полная энергия не изменяется по величине, а лишь переходит из одного вида в другой — из потенциальной в кинетическую и обратно.*

### 3.3. Применение законов сохранения в механике

Законы сохранения импульса и энергии позволяют решать широкий круг задач без использования основных уравнений динамики (уравнений Ньютона). Согласно этим законам некоторая физическая величина в определенных условиях всегда остается постоянной. Любой закон сохранения представляет собой некоторое соотношение между величинами, характеризующими начальное и конечное состояния системы. Остановимся на некоторых примерах.

**Пример 1.** Рассмотрим абсолютно упругий (А) и неупругий (Б) центральные удары двух шаров, массы которых  $m_1$  и  $m_2$ , а скорости  $v_1$  и  $v_2$ . Необходимо найти скорость шаров после удара.

**Решение.** 1. Чтобы решить эту задачу для упругого соударения шаров, необходимо использовать два закона сохранения — импульса и энергии. Пусть шары движутся навстречу друг другу (рис. 3.8, а). Обозначим скорости шаров после удара через  $u_1$  и  $u_2$

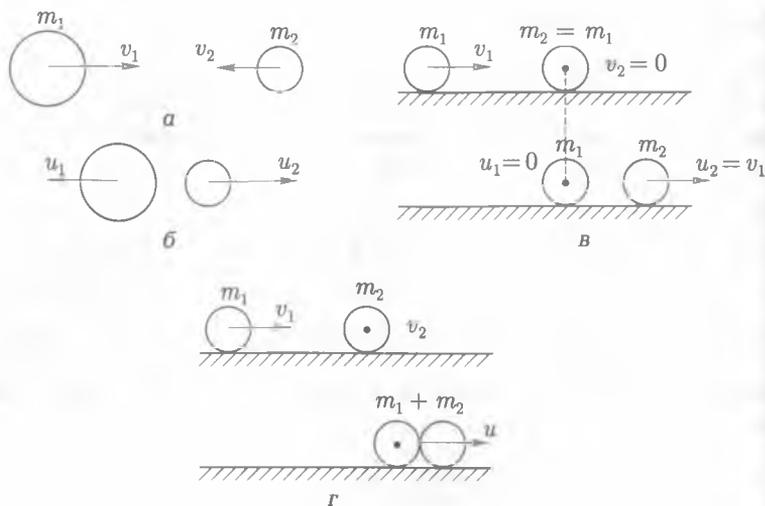


Рис. 3.8

(рис. 3.8, б). Тогда на основании закона сохранения импульса составим следующее уравнение:

$$m_1 \vec{v}_1 + m_2 \vec{v}_2 = m_1 \vec{u}_1 + m_2 \vec{u}_2.$$

Проецируя импульсы на ось  $x$ , получим

$$m_1 v_1 + m_2 v_2 = m_1 u_1 + m_2 u_2. \quad (1)$$

Второе уравнение составим согласно закону сохранения энергии

$$\frac{m_1 v_1^2}{2} + \frac{m_2 v_2^2}{2} = \frac{m_1 u_1^2}{2} + \frac{m_2 u_2^2}{2}. \quad (2)$$

Итак, имеем систему двух уравнений (1) и (2) с двумя неизвестными  $u_1$  и  $u_2$ . Чтобы найти  $u_1$  и  $u_2$ , перепишем систему в виде

$$m_1(v_1 - u_1) = m_2(u_2 - v_2); \quad (3)$$

$$m_1(v_1^2 - u_1^2) = m_2(u_2^2 - v_2^2). \quad (4)$$

Разделив почленно уравнение (4) на уравнение (3), получим

$$v_1 + u_1 = u_2 + v_2. \quad (5)$$

Умножим левую и правую части уравнения (5) на  $m_2$  и из полученного уравнения вычтем почленно равенство (3). В результате имеем

$$v_1(m_2 - m_1) + u_1(m_2 + m_1) = 2m_2 v_2.$$

Откуда

$$u_1 = \frac{2m_2v_2 + (m_1 - m_2)v_1}{m_1 + m_2}. \quad (6)$$

Для нахождения  $u_2$  умножим обе части уравнения (5) на  $m_1$ , а затем сложим почленно с равенством (3). Получим

$$2m_1v_1 = u_2(m_1 + m_2) + v_2(m_1 - m_2),$$

откуда

$$u_2 = \frac{2m_1v_1 + (m_2 - m_1)v_2}{m_1 + m_2}. \quad (7)$$

Мы решили задачу в общем виде, из которого вытекает интересный частный случай: если массы шаров одинаковы (рис. 3.8, в), то из формул (6) и (7) получим:  $u_1 = v_2$ ;  $u_2 = v_1$ , т.е. шары в результате упругого удара обмениваются скоростями. В частности, если  $v_2 = 0$ , т.е. второй шар до удара покоился, то после удара  $u_1 = 0$ ;  $u_2 = v_1$ , т.е. первый шар после удара остановится, а второй начнет двигаться с такой же скоростью, какую до соударения имел первый.

2. Для центрального неупругого удара (рис. 3.8, г) достаточно использовать закон сохранения импульса, который будет иметь вид

$$m_1v_1 + m_2v_2 = (m_1 + m_2)u_2, \quad (8)$$

где  $v_1$  и  $v_2$  — скорости тел с массами  $m_1$  и  $m_2$  до взаимодействия.

Из равенства (8) следует, что после взаимодействия тела будут двигаться как единое целое со скоростью

$$u = \frac{m_1v_1 + m_2v_2}{m_1 + m_2}. \quad (9)$$

**Пример 2.** Из пушки стреляют под углом  $\alpha$  к горизонту. Масса пушки  $M$ , масса снаряда  $m$ , скорость снаряда  $v$ . Найти скорость пушки  $v_1$  после выстрела. Пушка может свободно перемещаться вдоль горизонтальной поверхности.

**Решение.** В качестве системы тел, для которой будем применять закон сохранения импульса, естественно выбрать снаряд и пушку (рис. 3.9). Согласно условию задачи силы, действующие на систему вдоль горизонтальной плоскости, в частности, вдоль оси  $x$ , лежащей в плоскости полета снаряда, отсутствуют. Поэтому импульс системы в проекции на ось  $x$  не меняется. В качестве начального выбираем состояние системы до выстрела. Очевидно, начальный импульс системы равен нулю:  $p_0 = 0$ .

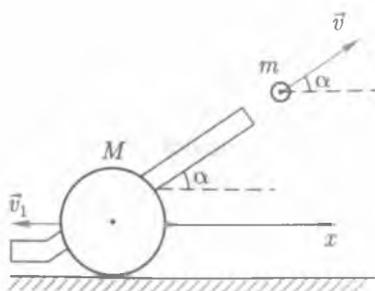


Рис. 3.9

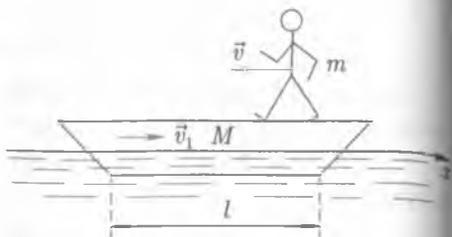


Рис. 3.10

В конечном состоянии системы (сразу после выстрела) проекция импульса пушки на ось  $x$  равна  $p_{\text{пр}} = -Mv_1$ , а проекция импульса снаряда  $p_{\text{ср}} = mv \cos \alpha$ .

Итак, проекция импульса системы на ось  $x$  в конечном состоянии записывается следующим образом:

$$p = -Mv_1 + mv \cos \alpha.$$

Согласно закону сохранения импульса  $p_0 = p$  имеем

$$0 = -Mv_1 + mv \cos \alpha.$$

Тогда искомая скорость

$$v_1 = \frac{mv \cos \alpha}{M}.$$

**Пример 3.** Человек, имеющий массу  $m$ , переходит с одного конца лодки массой  $M$  на другой (рис. 3.10). Длина лодки  $l$ . На какое расстояние при этом переместится лодка? Сопротивлением воды при движении лодки можно пренебречь.

**Решение.** Пусть скорость человека относительно Земли постоянна и равна  $v$ , а скорость лодки  $v_1$ . Запишем закон сохранения импульса в проекции на ось  $x$ , вдоль которой по условию задачи на систему «человек — лодка» внешние силы не действуют:

$$0 = mv - Mv_1. \quad (1)$$

Левая часть уравнения (1) равна нулю, поскольку в начальный момент человек и лодка покоились.

Обозначим через  $t$  время, через которое человек окажется на другом конце лодки. За это время лодка пройдет путь  $v_1 t$ , а чело-

век —  $vt$ . В начальный момент времени человек находился от другого конца лодки на расстоянии  $l$ , следовательно:

$$l = vt + v_1 t = (v + v_1)t. \quad (2)$$

Из (1) и (2) находим путь, который прошла лодка:

$$x_{\lambda} = v_1 t = \frac{m}{M} v \frac{l}{v + v_1} = \frac{m}{M} v \frac{l}{v \left(1 + \frac{m}{M}\right)} = \frac{m}{m + M} l.$$

Ответ:  $x_{\lambda} = \frac{m}{m + M} l.$

**Пример 4.** Вертикально вверх брошен камень со скоростью  $v_0$ . Пренебрегая сопротивлением воздуха, определить максимальную высоту  $h_{\max}$ , на которую поднимется камень, и высоту, на которой потенциальная энергия камня будет равна кинетической.

**Решение.** Брошенный вверх со скоростью  $v_0$  камень приобретает кинетическую энергию  $E_k = \frac{1}{2} m v_0^2$ . Но под действием силы тяжести его скорость уменьшается до нуля. При этом камень достигает высоты  $h_{\max}$ .

На основе закона сохранения полной механической энергии можно записать

$$E_k = E_{\text{п}}; \quad \frac{m v_0^2}{2} = m g h_{\max}.$$

Откуда

$$h_{\max} = \frac{v_0^2}{2g}.$$

Для ответа на второй вопрос, пользуясь законом сохранения полной механической энергии, запишем

$$E_k + E_{\text{п}} = \frac{m v^2}{2} + m g h = \text{const.}$$

По условию задачи

$$\frac{m v^2}{2} = m g h.$$

Тогда

$$\frac{m v_0^2}{2} = \frac{m v^2}{2} + m g h = 2 m g h.$$

Откуда

$$h = \frac{v_0^2}{4g}$$

**Пример 5.** Стальная болванка массой  $m$ , падающая с высоты  $H$  с начальной скоростью  $v_0$ , углубилась в грунт на расстояние  $h$ . Найдите силу сопротивления  $F_c$  грунта, считая ее постоянной. Сопротивлением воздуха можно пренебречь.

**Решение.** На рис. 3.11 показаны начальное (I) и конечное (II) положения тела, а также силы, действующие на него во время движения, и скорости тела в этих положениях. Нулевой уровень выбираем из условия  $v_k = 0$ .

Сила тяжести, действующая на стальную болванку, является консервативной силой, не изменяющей механическую энергию тела. Сила сопротивления грунта не является консервативной силой. Она совершает отрицательную работу, не изменяя механическую энергию тела:

$$A = E_2 - E_1, \quad (1)$$

где  $A = -F_c h$ ;  $E_1 = mg(H + h) + \frac{mv_0^2}{2}$ ;  $E_2 = 0$  (так как в положении II тело покоится).

Подставляя полученные значения для  $A$ ,  $E_1$  и  $E_2$  в формулу (1), получим

$$-F_c h = 0 - mg(H + h) - \frac{mv_0^2}{2}.$$

Откуда находим силу сопротивления грунта

$$F_c = \frac{m}{h} \left| \frac{v_0^2}{2} + g(H + h) \right|.$$

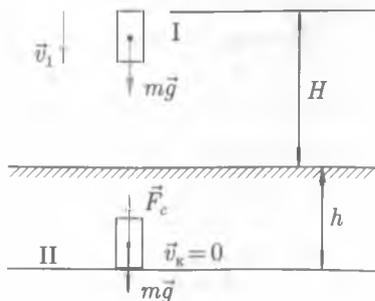


Рис. 3.11



## ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ВЫВОДЫ

1. Одной из наиболее важных характеристик механического движения является импульс тела — векторная величина, равная произведению массы тела  $m$  на его скорость  $v$ :

$$\vec{p} = m\vec{v}.$$

Направление импульса тела совпадает с направлением скорости его движения.

Векторная величина, равная произведению силы, действующей на тело, на время  $t$  действия силы, называется импульсом силы. Вектор импульса силы направлен так же, как и вектор силы.

Пользуясь понятиями импульса тела и импульса силы, можно по-другому сформулировать второй закон Ньютона: изменение импульса тела равно импульсу силы:

$$\Delta\vec{p} = \vec{F}\Delta t.$$

Замкнутой (или изолированной) системой называют систему тел, взаимодействующих только между собой и не взаимодействующих с телами, не входящими в эту систему.

Закон сохранения импульса (для замкнутой системы): векторная сумма импульсов тел, составляющих замкнутую систему, остается постоянной при любых движениях и взаимодействиях тел системы:

$$m_1\vec{v}_1 + m_2\vec{v}_2 + \dots = \text{const}.$$

2. Механическое состояние системы тел определяется их взаимным расположением и скоростями, которыми они обладают в определенный момент времени. Изменение состояния системы возможно в результате проведения механической работы (работы силы).

Работа силы — это скалярная величина, равная произведению модуля силы, модуля перемещения тела и косинуса угла между направлениями векторов силы и перемещения:

$$A = F\Delta S \cos \alpha.$$

Скорость выполнения работы определяется скалярной физической величиной, называемой мощностью:

$$P = \frac{A}{\Delta t} = F \frac{\Delta S}{\Delta t} \cos \alpha = Fv \cos \alpha.$$

Энергия — физическая величина, показывающая, какую работу может совершить тело. При совершении работы энергии тела изменяется. Совершенная работа равна изменению энергии тела.

Энергию, которой обладает тело вследствие своего движения, называют кинетической энергией. Работа силы, действующей на тело, равна изменению кинетической энергии:

$$A = \Delta E_k = \frac{mv^2}{2} - \frac{mv_0^2}{2}.$$

Потенциальная энергия относится не к одному отдельно взятому телу, а к системе тел. Тело, поднятое над Землей, обладает потенциальной энергией, которая определяется по формуле

$$E_n = mgh,$$

где  $h$  — высота тела над поверхностью Земли.

Потенциальная энергия упруго деформированного тела

$$E_n = \frac{1}{2}k(\Delta l)^2,$$

где  $k$  — коэффициент упругости;  $\Delta l$  — деформация.

Изменение потенциальной энергии, взятое с противоположным знаком, равно работе, совершенной силой тяжести или силой упругости.

Одним из фундаментальных законов природы, согласно которому энергия в замкнутой системе сохраняется, является закон сохранения энергии.

Если на тело действует сила тяжести (сила всемирного тяготения) или упругости, то изменение кинетической энергии сопровождается равным по модулю и противоположным по знаку изменением потенциальной энергии системы. Поэтому в замкнутой системе взаимодействующих тел полная механическая энергия остается постоянной:

$$E_k + E_n = E = \text{const}.$$

Если кроме сил тяжести и сил упругости на тела системы действуют и силы трения, то полная механическая энергия системы изменяется (обычно уменьшается).

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ

1. Сформулируйте закон изменения импульса. Куда направлен импульс тела, импульс силы?
2. Какую систему можно считать замкнутой? Существуют ли такие системы в природе?
3. В чем сущность закона сохранения импульса?
4. Каков физический смысл механической энергии, мощности?
5. Каков физический смысл потенциальной и кинетической энергии?
6. Сформулируйте закон сохранения энергии в механике. Для какой системы взаимодействующих тел он справедлив?
7. Почему трудно прыгнуть на берег с лодки, а такой же прыжок с теплохода осуществить легко?
8. Чему равно изменение импульса автомобиля за 10 с, если действующая на него сила равна 2 800 Н?

*Ответ:*  $\Delta p = 28 \text{ кН} \cdot \text{с}$ .

9. Тело массой 0,2 кг падает с высоты 1 м с ускорением  $8 \text{ м/с}^2$ . Найдите изменение импульса тела.

*Ответ:*  $\Delta p = 0,8 \text{ кг} \cdot \text{м/с}$ .

10. Молекула массой  $5 \cdot 10^{-26}$  кг, летящая со скоростью 500 м/с, упруго ударяется о стенку под углом  $60^\circ$  к поверхности. Найдите импульс силы, полученный стенкой при ударе.

*Ответ:*  $F\Delta t = 4,35 \cdot 10^{-23} \text{ Н} \cdot \text{с}$ .

11. Снаряд массой 100 кг, летящий горизонтально вдоль железнодорожного пути со скоростью 500 м/с, попадает в вагон с песком массой 10 т и застревает в нем. Найдите скорость вагона после попадания в него снаряда. Первоначально вагон двигался со скоростью 36 км/ч навстречу снаряду.

*Ответ:*  $u = -5 \text{ м/с}$ .

12. Санки съезжают с горки, имеющей высоту 14,5 м и угол наклона  $14^\circ$ , и двигаются дальше по горизонтальному участку. Определите расстояние, которое пройдут санки по горизонтальному участку пути до полной остановки, если коэффициент трения на всем участке пути равен 0,14.

*Ответ:*  $s = 43,5 \text{ м}$ .

13. Камень массой 0,5 кг, падая с высоты 10 м, имеет у поверхности Земли в момент падения скорость 12 м/с. Определите силу сопротивления воздуха, считая ее постоянной.

*Ответ:*  $F_c = 1,3 \text{ Н}$ .

14. Какова средняя мощность автомобиля, если за 10 с разгона по ровной дороге из состояния покоя его кинетическая энергия становится равной 450 кДж?

Ответ:  $N = 45$  кВт

15. Вагон массой 20 т, двигаясь со скоростью 0,5 м/с, ударяется в два неподвижных пружинных буфера. Найдите максимальное сжатие буферов, если известно, что при действии на каждый буфер силы 50 кН он сжимается на 1 см.

Ответ:  $\Delta l = 2,2$  см



Раздел II

**ОСНОВЫ  
МОЛЕКУЛЯРНОЙ ФИЗИКИ  
И ТЕРМОДИНАМИКИ**

**4.1. Основные положения  
и экспериментальное  
обоснование молекулярно-кинетической теории**

**Три постулата молекулярно-кинетической теории.** «Как прекрасен этот мир — посмотри!» — поется в песне. Да, действительно, мир прекрасен! Он поражает многообразием, беспредельностью, гармонией. Но есть ли в окружающих нас предметах и явлениях общая сущность, скрытое единство? Не лежат ли в основе всего сущего какие-то простые элементы?

Давным-давно, за шесть веков до нашей эры, в Древней Греции существовало философское направление — Милетская школа. Представитель этой школы Фалес утверждал, что в основе всех вещей лежит вода, «на которой покоится Земля и которая дала начало всему, что есть».

Через сто лет другой древнегреческий мыслитель Эмпедокл считал, что одной воды, пожалуй, мало. К воде он добавил еще три элемента: землю, огонь и воздух.

Прошло еще сто лет, и знаменитый древнегреческий ученый Аристотель к четырем «элементам» присоединил пятую сущность — квинтэссенцию, из которой, как он полагал, состоят небесные тела.

В наше время представления древних греков о материальном мире кажутся наивными. Но для той эпохи их учение явилось величайшим достижением человечества. Это был революционный переход от первобытно-чувственного восприятия природы к попытке научного объяснения происходящих в ней явлений.

Многие идеи, высказанные античными учеными, сыграли большую роль в развитии представлений о строении материи. Не случайно ряд физических терминов, которые прочно вошли в современную науку, имеют древнегреческое происхождение. К ним, в

частности, относится слово *атом*, что в переводе означает «неделимый». Древнегреческий мыслитель Демокрит (V в. до н. э.) утверждал: «Ничего не существует кроме атомов и пустого пространства; все прочее — мнение» и «различие всех предметов зависит от различия их атомов в числе, величине, форме и порядке...».

Однако в эпоху Средневековья многие достижения античной науки, в том числе учение об атомах, отвергались. Вопрос о строении вещества оставался открытым: состоит ли вещество из отдельных частиц или оно бесконечно делимо, т. е. является сплошной средой?

Решительными сторонниками дискретности (прерывистости) материи были такие великие ученые, как Г. Галилей, Р. Декарт, И. Ньютон, М. В. Ломоносов. Они считали, что материя состоит из мельчайших неделимых частиц-корпускул, т. е. атомов.

Если для античного и средневекового этапов истории науки характерно умозрительное познание природы, то начиная с XVII в. все большее значение в естествознании приобретает экспериментальный метод исследований. Замечательные опыты по изучению свойств газа осуществили Э. Торричелли, Б. Паскаль, Р. Бойль, Ж. Гей-Люссак и другие ученые XVII, XVIII и начала XIX вв.

Большой вклад в развитие атомистических представлений внесли выдающиеся химики XIX в. Особое значение в этой области знания имели работы великого русского ученого Д. И. Менделеева, создавшего периодическую систему химических элементов. Д. И. Менделеевым было получено уравнение состояния газа, сыгравшее важную роль в развитии молекулярно-кинетической теории. Окончательно эта теория сложилась к началу XX в. в результате исследований Р. Клаузиуса, Дж. Максвелла, Л. Больцмана, У. Кельвина и других выдающихся ученых.

В основе молекулярно-кинетической теории лежат три постулата (положения), принимаемые как результат наблюдений и опытов:

- любое вещество состоит из мельчайших частиц — молекул;
- молекулы находятся в непрерывном движении;
- молекулы способны взаимодействовать между собой — притягиваться и отталкиваться.

**Молекулы и атомы.** Существует огромное множество веществ как естественного, так и искусственного происхождения. Возьмем какое-нибудь из них, например сахар. Представим себе возмож-

ность деления кусочка сахара на все более и более мелкие части. В конце концов мы получим одну молекулу сахара. Если бы нам удалось разделить и ее, то полученные в результате такого деления частицы уже не были бы частицами сахара. Следовательно,

**молекула — это мельчайшая частица данного вещества, сохраняющая все его химические свойства и способная к самостоятельному существованию.**

Исследования показали, что молекулы состоят из атомов простых химических элементов. Молекулы различных веществ отличаются друг от друга числом и составом атомов. Однако молекулы одного и того же вещества, как и атомы одного и того же элемента, неразличимы.

Размеры молекул можно оценить следующим образом. Если на спокойную поверхность воды выдавить каплю нерастворимой в воде жидкости, например керосина, то капля растекается не беспредельно. Опыт показывает, что площадь поверхности образующейся пленки зависит только от объема капли. Если объем капли керосина равен  $1 \text{ мм}^3$ , то получается пленка площадью  $2,5 \text{ м}^2$ . Тогда толщина пленки

$$d = \frac{10 \cdot 10^{-10} \text{ м}^3}{2,5 \text{ м}^2} = 4 \cdot 10^{-10} \text{ м}. \quad (4.1)$$

Поскольку пленка не может быть тоньше диаметра одной молекулы, то, очевидно, размер молекулы керосина не превышает  $4 \cdot 10^{-10} \text{ м}$ , или  $0,4 \text{ нм}$ . Примерно такой же результат дают опыты при оценке размеров молекул самых разнообразных веществ. Рассматривая рис. 4.1, можно сказать, что диаметр молекулы во столько раз меньше длины карандаша, во сколько раз длина карандаша меньше расстояния от Земли до Луны.

При изучении молекулярных явлений большое значение имеет определение массы молекул различных веществ. Так как молекула состоит из атомов, то массу молекул удобно выражать в *относительных атомных единицах массы* (*а.е.м.*). В качестве

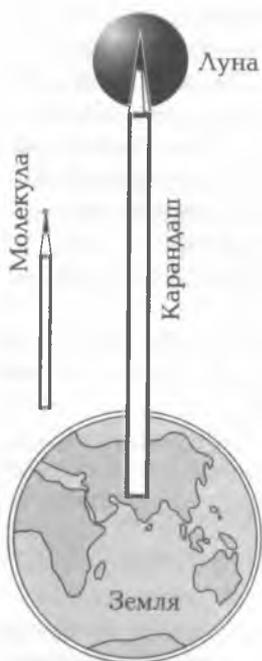


Рис. 4.1

такой единицы выбрана  $\frac{1}{12}$  часть массы изотопа углерода. Таким образом, масса атома углерода равна 12 а.е.м. Усредненные атомные массы других атомов указаны в Периодической системе элементов Д.И. Менделеева. В дальнейшем будем пользоваться округленными целочисленными значениями этих величин, считая, например, массу атома водорода равной 1 а.е.м., атома азота — 14 а.е.м., атома кислорода — 16 а.е.м. и т.д.

*Относительную молекулярную массу* вещества принято обозначать  $M_r$  (индекс  $r$  взят по начальной букве французского слова *relative*, что означает «относительный»). Например, относительная молекулярная масса воды ( $H_2O$ ) равна  $1 \text{ а.е.м.} \cdot 2 + 16 \text{ а.е.м.} \cdot 1 = 18 \text{ а.е.м.}$ ; серной кислоты ( $H_2SO_4$ ) —  $1 \text{ а.е.м.} \cdot 2 + 32 \text{ а.е.м.} \cdot 1 + 16 \text{ а.е.м.} \cdot 4 = 98 \text{ а.е.м.}$  и т.д.

**Постоянная Авогадро.** В решении ряда практических задач бывает важно учитывать количество вещества, т.е. число молекул или атомов, содержащихся в данном теле. В приведенном выше расчете относительные молекулярные массы показывают, что в 18 кг воды и 98 кг серной кислоты число молекул должно быть одинаковым, и в обоих случаях мы имеем одно и то же количество вещества.

За единицу количества вещества принимают 1 моль.

**Число молекул, содержащихся в одном моле любого вещества, есть величина постоянная и составляет  $6,02 \cdot 10^{23}$  моль $^{-1}$ .**

Оно было найдено в 1811 г. итальянским физиком и химиком А.Авогадро и в его честь названо *постоянной Авогадро*  $N_A$ . Именно такое количество атомов содержится в 0,012 кг углерода.

**Молярная масса.** Таким образом, наряду с относительной молекулярной массой вводится понятие *молярной массы*  $M$ , под которой понимают массу вещества, взятого в количестве 1 моль.

**Молярная масса равна произведению массы одной молекулы данного вещества на постоянную Авогадро:**

$$M = m_0 N_A. \quad (4.2)$$

Если обозначить через  $m$  массу вещества, то количество вещества, выраженного в молях, составит

$$\nu = m/M. \quad (4.3)$$

В частности, молярные массы воды и серной кислоты соответственно равны  $18 \cdot 10^{-3}$  и  $98 \cdot 10^{-3}$  кг/моль.

**Броуновское движение.** Следствием хаотического движения молекул является броуновское движение, названное так в честь

английского ботаника Р. Броуна, который наблюдал его в 1827 г. Следя в микроскоп за капелькой воды, Р. Броун заметил беспорядочное движение плавающих в ней спор растений. В отличие от движения микроорганизмов, которое совершалось значительно медленнее по криволинейным траекториям, движение спор происходило скачкообразно по прямым, составляющим ломаную линию (рис. 4.2).

Броуновское движение объясняется следующим образом. Хаотично двигаясь, молекулы воды непрерывно соударяются со спорой. В какой-то момент число ударов в одном направлении окажется больше, чем в других. Спора получит нескомпенсированный импульс и переместится в соответствующем направлении. В следующий момент передаваемые споре импульсы могут оказаться скомпенсированными, и тогда спора на некоторое время остановится, но в дальнейшем она получит избыточный импульс и скачкообразно переместится в новом направлении и т.д.

**Диффузия.** Другим следствием молекулярного движения служит явление диффузии. С этим явлением вы знакомились в начальном курсе физики. Напомним, что распространение запахов в воздухе, перемешивание жидкостей, получение растворов, склеивание твердых тел — все это объясняется диффузией.

В процессе диффузии молекулы одного вещества проникают в промежутки между молекулами другого вещества. Если опустить в стакан с кипятком несколько кусочков сахара, то постепенно концентрация сахара в растворе станет равномерной, а объем содержимого в стакане практически не изменится.



Рис. 4.2

Вследствие диффузии химический состав атмосфер планет оказывается неоднородным. Атмосфера Земли почти на всем своем протяжении до высоты 300 км на 78% состоит из азота и на 21% из кислорода. Всего 1% составляют другие компоненты, среди которых аргон, углекислый газ, гелий, водород и совсем незначительное количество других газов. Лишь водяной пар, процентное содержание которого не превышает 0,2%, концентрируется в приземном слое воздуха. Молярная масса воздуха  $28 \cdot 10^{-3}$  кг/моль.

Атмосферы Венеры и Марса на 95% состоят из углекислого газа. Второе место в составе этих атмосфер занимает азот в количестве 3,5% на Венере и 2,5% на Марсе. Остальные компоненты атмосфер Венеры и Марса существенно различаются. Однако молярные массы их одинаковы и составляют  $43,5 \cdot 10^{-3}$  кг/моль.

Интенсивность диффузии зависит от плотности вещества и скорости хаотического движения молекул.

**Распределение молекул по скоростям.** В середине XIX в. английский ученый Дж. Максвелл пришел к выводу, что молекулы не могут двигаться с одинаковыми скоростями даже при постоянной плотности и температуре. На основании теоретических исследований он вывел закон распределения молекул по скоростям. Этот закон описывается функцией распределения  $f(u)$ , график которой называется *кривой распределения* (рис. 4.3).

Площадь, ограниченная кривой распределения, соответствует общему числу  $N$  содержащихся в газе молекул. Относительное число  $\Delta N/N$  молекул, скорости которых лежат в интервале  $u_1 - u_2 = \Delta u$ , соответствует площади заштрихованной полоски. Функция рас-

пределения  $f(u) = \frac{\Delta N}{N \Delta u}$  имеет максимум при некотором значении

скорости  $u_n$ . Следовательно, наибольшая доля молекул газа движется со скоростями, близкими к  $u_n$ . Поэтому Максвелл назвал эту скорость *наивероятнейшей*. Из рис. 4.3 также видно, что относительное число молекул, имеющих очень малые и очень большие скорости, постепенно стремится к нулю.

**Опыт Штерна.** В 1920 г. немецким физиком О. Штерном была проведена экспериментальная проверка закона распределения молекул по скоростям. Созданная им установка (рис. 4.4) состояла из двух цилиндров  $A$  и  $B$ , расположенных соосно. По оси  $O$  цилиндров была натянута платиновая проволока, покрытая слоем серебра. При нагревании проволоки атомы серебра отрывались от ее поверхности и, подобно молекулам газа, могли свободно двигаться в пространстве. Большинство из них попадало на внутреннюю стенку цилиндра  $A$ , но часть атомов через узкую щель в стенке цилиндра  $A$  достигала внутренней стенки цилиндра  $B$ . При неподвижных цилиндрах напротив щели на внутренней поверхности цилиндра  $B$  образуется узкая полоска  $M$  серебра. При этом толщина слоя полоски оказывается равномерной.

Иная картина получается при вращении цилиндров с угловой скоростью  $\omega$ . Пока атом серебра за время  $t$  пролетает расстояние  $r$  между цилиндрами, цилиндр  $B$  успевает повернуться на угол  $\omega t$ .

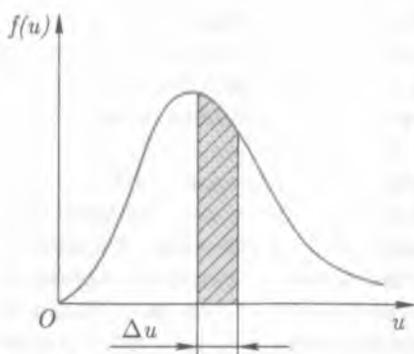


Рис. 4.3

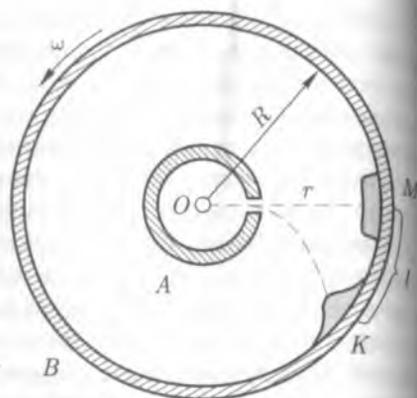


Рис. 4.4

В результате вся полоска серебра смещается относительно щели на расстояние  $l = \omega R t$ , где  $R$  — радиус большого цилиндра.

Поскольку атомы серебра движутся с разными скоростями, они, пролетая через щель, достигают внутренней поверхности цилиндра  $B$  неодновременно, и толщина слоя серебра  $K$  на цилиндре  $B$  оказывается неравномерной. Конфигурация этого слоя в разрезе повторяет форму графика функции распределения Максвелла (см. рис. 4.3). Наибольшую толщину слоя («горка» на рис. 4.4) образуют атомы, летящие с наиболее вероятной скоростью  $u_n$ .

Так как время, за которое атомы серебра со скоростью  $u_n$  пролетают промежуток  $r$  между цилиндрами, равно времени, за которое «горка» смещается на расстояние  $l = r/u_n$ , и  $t = l/(\omega R)$ , то эту скорость можно вычислить по формуле

$$u_n = r/t = Rr\omega/l. \quad (4.4)$$

Опыт Штерна явился блестящим подтверждением теоретически полученного Максвеллом закона распределения молекул по скоростям.

## 4.2. Взаимодействие молекул

**Частота столкновений и длина свободного пробега молекул.** Вычисленная по результатам опыта Штерна наиболее вероятная скорость атомов серебра оказалась равной 500 м/с. На первый

взгляд, такая скорость может показаться неправдоподобно большой, ведь распространение запахов в воздухе происходит со скоростью всего около 1 м/с. Такое «несоответствие» объясняется хаотичностью движения молекул в газе.

Согласно закону Авогадро, известного из курса химии, 1 моль газа при нормальных условиях занимает объем 22,4 л. В этом случае концентрация молекул (число молекул в единичном объеме)

$$n = \frac{6,02 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}}{22,4 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3 \text{ моль}^{-1}} = 2,7 \cdot 10^{25} \text{ м}^{-3}. \quad (4.5)$$

Беспорядочно двигаясь, молекулы соударяются друг с другом как упругие шарики. Именно поэтому траектория их движения представляет собой ломаную линию.

Пусть за некоторый промежуток времени молекула перемещается из точки  $A$  в точку  $B$ . Истинный путь молекулы есть длина ломаной линии, которая соединяет эти точки (рис. 4.5). Она во много раз превышает длину прямой  $AB$ . Каждый прямолинейный участок ломаной есть перемещение, совершаемое молекулой после очередного столкновения с другими молекулами. Расстояние, на которое перемещается молекула между двумя последовательными столкновениями, называют ее *длиной свободного пробега*  $\lambda$ .

В воздухе нормальной плотности в течение 1 с молекула испытывает  $10^9$  столкновений. В силу хаотичности движения прямолинейные участки ломаной, по которой движется молекула, могут сильно различаться по длине. Поэтому имеет смысл говорить лишь о *средней длине свободного пробега*  $\bar{\lambda}$  молекул, которая в воздухе нормальной плотности оказывается весьма малой величиной, порядка  $10^{-7}$  м.

Обозначив длину каждого прямолинейного участка ломаной  $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$ , а среднее число столкновений в секунду  $\bar{Z}$ , получим

$$\bar{\lambda} = \frac{\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \dots + \lambda_n}{\bar{Z}}. \quad (4.6)$$

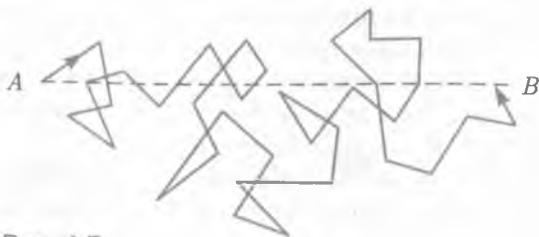


Рис. 4.5

На основе простых рассуждений можно прийти к выводу, что средняя длина свободного пробега молекул обратно пропорциональна квадрату их радиуса  $r^2$  и числу  $n$  молекул в единичном объеме:

$$\bar{\lambda} = \frac{1}{4\sqrt{2}\pi r^2 n}. \quad (4.7)$$

Если из герметически закрытого сосуда откачивать воздух, то концентрация молекул воздуха в сосуде будет уменьшаться, а их длина свободного пробега — возрастать.

Когда длина свободного пробега молекул становится сравнимой с размерами сосуда, говорят, что в сосуде создан вакуум, а сам сосуд называют вакуумным. Вакуум создается во многих технических устройствах — телевизионных трубках, некоторых типах осветительных ламп, рентгеновских установках и др.

Наиболее высокий технический вакуум, который удается получить в лабораторных условиях, соответствует давлению  $10^9$  Па. Но и при этом в  $1 \text{ см}^3$  содержится более полумиллиона молекул.

В земной атмосфере на высоте 200 км концентрация молекул в тысячу раз меньше, т.е. около 500 частиц в  $1 \text{ см}^3$ . Хотя и эта плотность огромна по сравнению с плотностью газа в межпланетном пространстве, где в  $1 \text{ см}^3$  в среднем присутствует всего одна частица.

Еще меньше плотность газа в межзвездной среде. Если описать вокруг Солнца сферу радиусом 30 световых лет, то окажется, что звезды занимают всего  $1/10^{22}$  объема, ограниченного такой сферой, т.е. совершенно ничтожную часть. Во всем остальном объеме присутствует межзвездный газ, главным образом водород, со средней концентрацией одна частица на кубический дециметр. Воспользовавшись формулой (4.7), можно подсчитать длину свободного пробега молекул водорода в межзвездном пространстве. Она равна  $2,3 \cdot 10^{14}$  м, или 230 млрд км.

**Молекулярные силы и их проявление.** Как ни мала плотность межзвездной среды, но тем не менее, пролетев огромное расстояние в космическом пространстве, молекула рано или поздно столкнется с другой молекулой, и произойдет их взаимодействие. Возникающие при этом молекулярные силы проявляются и как силы притяжения, и как силы отталкивания.

Именно наличием сил притяжения объясняется тот факт, что твердые тела не рассыпаются на отдельные молекулы. Более того, чтобы отделить одну часть твердого тела от другой, в ряде случа

ев требуется большая сила. Однако если бы между молекулами действовали только силы притяжения, то не было бы межмолекулярных промежутков и диффузия оказалась бы невозможной.

Допустим, что с увеличением расстояния между молекулами силы отталкивания убывают быстрее, чем силы притяжения. Только в этом случае молекулы могут находиться в относительно устойчивом равновесии на таком расстоянии друг от друга, на котором силы притяжения и отталкивания компенсируют друг друга.

Многочисленные опыты и наблюдения подтверждают предположение о наличии сил притяжения и отталкивания, действующих между молекулами. Например, если зачищенные от оксида свинца основания свинцовых цилиндров с небольшим усилием приложить друг к другу (рис. 4.6), то такая система из двух цилиндров выдерживает, не разрываясь, значительный груз. Молекулярные силы действуют и между разнородными телами. Опустим на поверхность воды подвешенную на мягкой пружине стальную пластинку (рис. 4.7, а). Чтобы оторвать пластинку от воды, требуется некоторое усилие, благодаря чему пружина заметно растянется (рис. 4.7, б, в).

Интересное явление наблюдали побывавшие на Луне американские астронавты. Поверхность Луны благодаря метеоритной бомбардировке покрыта слоем измельченной породы — реголита.

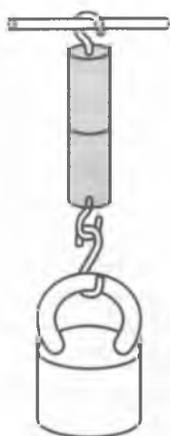


Рис. 4.6

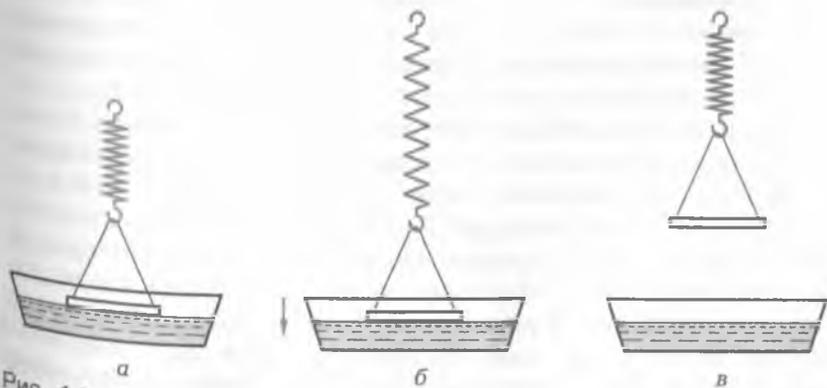


Рис. 4.7



Рис. 4.8

мольность сил взаимодействия молекул от расстояния между ними представлена на рис. 4.8. По оси абсцисс отложены расстояния между молекулами, а по оси ординат — проекции молекулярных сил. Силу отталкивания принято считать положительной, а силу притяжения — отрицательной. Графики изменения этих сил показаны штрихпунктирной линией, а график изменения результирующей силы, равной алгебраической сумме сил отталкивания и притяжения, показан цветной кривой.

Молекулярные силы являются короткодействующими, так как на расстояниях, больших  $r_n = 1,5 \cdot 10^{-9}$  м, они практически не проявляются. В точке равновесия  $B$  кривая результирующей силы пересекает ось абсцисс и меняет знак на противоположный.

Пусть по какой-либо причине две молекулы сблизилась на расстояние  $r_1$ , причем  $r_0 < r_1 < r_n$ . Одну из этих молекул будем условно считать неподвижной. Свяжем с ней систему отсчета и посмотрим, как будет вести себя в этой системе другая молекула. Поскольку в точке  $A$  (см. рис. 4.8) действующая на молекулу результирующая сила отрицательна, молекула начнет ускоренно двигаться к положению равновесия  $B$ . Пройдя его по инерции, молекула на мгновение остановится. Под действием сил отталкивания она начнет обратное движение к положению равновесия и, вновь пройдя его, остановится в точке  $A$ . Далее все повторится сначала

Астронавты заметили, что подобно подтаявшему снегу реголит легко слипался в комки, а также налипал на скафандры и инструменты. Попытки стряхнуть его со скафандров и приборов успеха не имели. При отсутствии атмосферы на Луне такое свойство реголита возникает в результате действия молекулярных сил при соприкосновении твердых поверхностей и называется *аггезией*.

Внутри кабины космического корабля при наличии воздушной среды, когда молекулы газа проникают между частицами реголита, адгезия не проявляется и реголит легко стряхивается.

#### Кинетическая и потенциальная энергия молекул. Зависи-

Нетрудно догадаться, что под действием молекулярных сил молекула совершает колебательное движение вокруг положения равновесия  $r_0$ . Напомним, что в процессе колебаний материальной точки ее потенциальная энергия периодически превращается в кинетическую, и наоборот. Следовательно, молекулы тела могут обладать как кинетической, так и потенциальной энергией взаимодействия.

**Понятие о внутренней энергии тела.** Из механики известно, что существует два вида механической энергии, причем ее значение зависит от выбора системы отсчета. Например, летящий самолет обладает относительно земной поверхности как потенциальной, так и кинетической энергией. Их сумма составляет полную механическую энергию самолета. Но после того как самолет совершил посадку, его механическая энергия в системе отсчета, связанной с земной поверхностью, становится равной нулю.

Совсем иная картина открывается перед нами, когда речь идет о потенциальной и кинетической энергии молекул тела. В силу хаотичности движения в любой системе отсчета механическая энергия молекул отлична от нуля. При взаимодействии молекул энергия каждой из них изменяется. Если уменьшается энергия одной из взаимодействующих молекул, то на столько же увеличивается энергия другой. Однако в целом при отсутствии внешних воздействий их общая энергия остается постоянной.

В молекулярно-кинетической теории

**алгебраическую сумму потенциальной и кинетической энергии молекул тела называют его внутренней энергией.**

Любое из окружающих нас тел состоит из огромного множества молекул. Поэтому понятия кинетической и потенциальной энергии молекул носят статистический характер. В связи с этим имеет смысл говорить лишь о средней кинетической и средней потенциальной энергии молекул. При нагревании тела скорость движения молекул и их средняя кинетическая энергия увеличиваются. При деформации тела изменяются взаимное положение молекул и их средняя потенциальная энергия. Следовательно, если в процессе нагревания или в каком-либо механическом процессе изменится состояние тела, то соответственно изменится и его внутренняя энергия.

Наблюдения и опыты показывают, что внутренняя энергия зависит только от состояния тела, но она не зависит от способа, которым данное состояние достигнуто.

**Особенности молекулярного движения и взаимодействия в твердых телах, жидкостях и газах.** Характером движения и взаимодействия молекул объясняется существование трех различных агрегатных состояний вещества: твердого, жидкого и газообразного.

В твердых телах силы молекулярного взаимодействия проявляются на малых расстояниях между частицами. Поэтому они достаточно велики, так что взаимное положение частиц остается постоянным. Молекулы и атомы только колеблются вокруг некоторых устойчивых положений. В тех случаях, когда частицы образуют ячейки правильной геометрической формы, твердое тело называют *кристаллическим*. При нагревании твердого тела размах колебаний частиц возрастает. Они как бы расталкивают друг друга. Поэтому в процессе нагревания тела расширяются.

В жидкостях молекулярные силы ослаблены. Молекулы жидкости помимо колебательного движения совершают также поступательное движение. Их положение друг относительно друга изменяется.

Подробнее строение твердых и жидких тел будет рассмотрено далее, а пока остановимся на изучении газообразного состояния вещества, которое является наиболее простым.

Газ можно представить себе в виде отдельных молекул, перемещающихся по всем направлениям. При столкновениях они ведут себя как упругие шарики. Среднее расстояние между молекулами газа при нормальном атмосферном давлении более чем в 10 раз превосходит диаметр самих молекул. На таких расстояниях молекулярные силы себя не проявляют. Они действуют только в момент столкновений молекул газа. Поэтому потенциальная энергия взаимодействия молекул в газе близка к нулю.

Диффузия в газах происходит очень интенсивно. Химически однородный газ в открытом сосуде не сохраняется. Его молекулы быстро перемешиваются с молекулами окружающего воздуха. Поэтому хранят газы в герметически закрытых сосудах. Поскольку сам по себе газ стремится занять весь предоставленный ему объем, за объем газа обычно принимают вместимость сосуда, в котором он содержится.

Однако газ может сохранять объем и форму, находясь и вне сосуда. В межзвездном пространстве имеются многочисленные газовые и газопылевые облака. При наблюдениях в телескоп они представляются туманностями. Их плотность в тысячи раз превосходит плотность окружающей среды. В газообразном состоянии находятся Солнце и звезды. Объем и форма большинства

этих объектов на протяжении многих миллионов лет остаются постоянными. Наша Земля имеет газовую оболочку — атмосферу, объем которой также можно считать постоянным. Атмосферами обладают и другие планеты Солнечной системы, за исключением Меркурия. Во всех этих случаях рассеянию газа препятствует сила тяготения, поскольку перечисленные тела имеют достаточно большую массу.

### 4.3. Идеальный газ

**Модель идеального газа.** Модель газа, в котором внутренняя энергия определяется только кинетической энергией его молекул, а объем самих молекул считается равным нулю, называют моделью *идеального газа*. Такая модель достаточно точно описывает состояние и свойства реального газа при невысоком давлении, не превышающем атмосферного, и в то же время значительно упрощает решение задач, связанных с изучением свойств газообразного состояния вещества.

В дальнейшем под словом «газ» будем понимать именно идеальный газ.

Опыты показывают, что состояние данной массы газа однозначно определяется тремя параметрами (величинами): объемом  $V$ , давлением  $p$  и температурой  $T$ . Переход газа из одного состояния в другое называют *процессом*. В любом процессе изменяются по крайней мере два из трех параметров, определяющих состояние данной массы газа.

**Изопроцессы. Абсолютная температура.** Процессы, в которых изменяются только два параметра, а третий остается постоянным, называют *изопроцессами*. Возможны три таких процесса: *изотермический* ( $T = \text{const}$ ), *изобарный* ( $p = \text{const}$ ), *изохорный* ( $V = \text{const}$ ). Графики изопроцессов показаны на рис. 4.9.

Законы изменения состояния данной массы газа были открыты эмпирически, т. е. на основе опытов, и носят имена ученых, впервые описавших эти законы.

В XVII в. английский ученый Р. Бойль и независимо от него французский ученый Э. Мариотт открыли закон изменения состояния данной массы газа в изотермическом процессе.

**Закон Бойля — Мариотта:** в изотермическом процессе произведение давления данной массы газа на его объем есть величина постоянная:

$$pV = \text{const}, \quad (4.8)$$

или

$$p_1 V_1 = p_2 V_2. \quad (4.8')$$

В изотермическом процессе внутренняя энергия газа сохраняется. Покажем это, применяя метод размерностей:  $\text{Н/м}^2$  (давление)  $\cdot \text{м}^3$  (объем) =  $1 \text{ Н} \cdot \text{м} = 1 \text{ Дж}$  (энергия).

В 1802 г. французский ученый Ж. Гей-Люссак сформулировал закон изменения данной массы газа в изобарном процессе.

**Закон Гей-Люссака: при изобарном нагревании газа от  $0^\circ \text{C}$  относительное изменение его объема пропорционально конечной температуре:**

$$\frac{V - V_0}{V_0} = \alpha T, \quad (4.9)$$

где  $\alpha = 1/273 \text{ К}^{-1}$  называется *коэффициентом объемного расширения газа*. При определении конечного объема газа по заданной температуре удобно пользоваться формулой

$$V = V_0(1 + \alpha T), \quad (4.9')$$

которая непосредственно вытекает из (4.9).

В 1787 г. французский ученый Ж. Шарль поставил ряд опытов, которые дали возможность сформулировать закон изменения состояния данной массы газа в изохорном процессе.

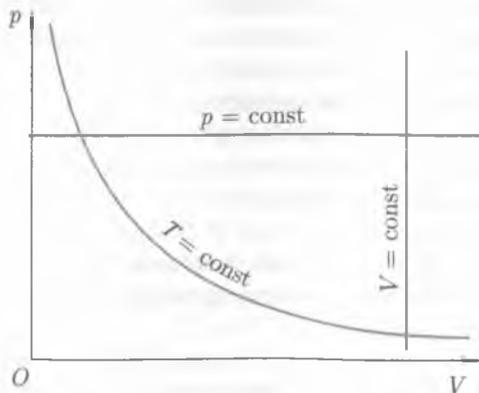


Рис. 4.9

**Закон Шарля:** при изохорном нагревании газа от  $0^\circ\text{C}$  относительное изменение его давления пропорционально конечной температуре:

$$\frac{p - p_0}{p_0} = \gamma T, \quad (4.10)$$

где  $\gamma = 1/273 \text{ K}^{-1}$  — термический коэффициент давления. Из (4.10) следует:

$$p = p_0(1 + \gamma T). \quad (4.10')$$

Построим график изобарного процесса для газа данной массы. По оси абсцисс будем откладывать температуру, а по оси ординат — объем (рис. 4.10).

Пусть при  $0^\circ\text{C}$  газ занимает объем  $V_0$ . Отметим начальное состояние газа точкой 1. Если нагреть этот газ до температуры  $+273^\circ\text{C}$ , то его объем

$$V = V_0\left(1 + \frac{1}{273} \cdot 273\right) = 2V_0.$$

Состояние нагретого газа отметим точкой 2. Так как по закону Гей-Люссака зависимость объема газа от температуры при изобарном нагревании выражается линейно, то, соединив точки 1 и 2 прямой, получим изобару. Все точки изобары удовлетворяют уравнению (4.10').

Продолжим изобару влево до пересечения с осью температур в точке 3. Очевидно, что эта точка ограничивает изобару снизу, так как ее дальнейшее продолжение в том же направлении ведет к отрицательному объему и поэтому теряет физический смысл. Из подобия заштрихованных треугольников легко определить

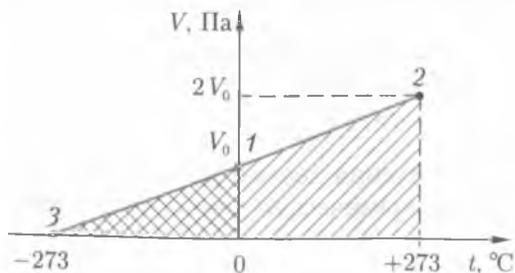


Рис. 4.10

температуру газа в точке 3. Она равна  $-273^{\circ}\text{C}$  и называется абсолютным нулем. Английский физик У. Кельвин построил в 1848 г. шкалу абсолютной (термодинамической) температуры, позже названную шкалой Кельвина. Соотношение между значениями температур по шкале Цельсия ( $t$ ) и шкале Кельвина ( $T$ ) выражается формулой

$$t = T - T_0, \quad (4.11)$$

где  $T_0 \approx 273 \text{ К}$ .

Шкала Кельвина, раскрывая физический смысл температуры, упрощает формулы, выражающие законы Гей-Люссака и Шарля:

$$V = V_0(1 + \alpha t) = V_0 \left| 1 + \frac{1}{273}(T - 273) \right| = \alpha V_0 T; \quad (4.12)$$

аналогично

$$p = \gamma p_0 T. \quad (4.13)$$

**Уравнение Клапейрона — Менделеева.** Возьмем две одинаковые массы газа в двух различных состояниях  $V_1; p_1; T_1$  и  $V_2; p_2; T_2$ . Переведем газ в новое состояние таким образом, чтобы в обоих случаях температура оказалась равной  $273 \text{ К}$ . При этом можно использовать либо изобарный, либо изохорный процесс. Выберем первый:

$$\frac{V_1}{\alpha T_1}; p_1; 273 \text{ К} \quad \text{и} \quad \frac{V_2}{\alpha T_2}; p_2; 273 \text{ К}.$$

Так как конечная температура в обоих случаях одна и та же, можно воспользоваться законом Бойля — Мариотта:

$$\frac{p_1 V_1}{\alpha T_1} = \frac{p_2 V_2}{\alpha T_2}, \quad \text{или} \quad \frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2}, \quad (4.14)$$

т. е.

$$\boxed{\frac{pV}{T} = \text{const.}} \quad (4.14')$$

**Произведение давления данной массы газа на его объем, деленное на термодинамическую температуру, есть величина постоянная.**

Впервые связать единой формулой все три закона, описывающие изопроцессы, удалось французскому ученому Б. Клапейрону

ну в 1834 г. Поэтому выражение (4.14) принято называть *уравнением Клапейрона*.

Уравнение Клапейрона явилось важным шагом на пути изучения газообразного состояния. Однако оно содержало существенную трудность. Если брать произвольную массу газа, например 1 кг, то константа в формуле (4.14') для разных по своей химической природе газов оказывается различной. Эту трудность устранил Д. И. Менделеев в 1874 г. Он показал, что если массу газа выражать в молях, то константа для всех газов принимает одно и то же значение, т. е. становится универсальной величиной (*молярная газовая постоянная*). Ее обозначают буквой  $R$ . В самом деле для одного моля любого газа при нормальных условиях имеем:  $p_0 = 1 \text{ атм} = 1,013 \cdot 10^5 \text{ Па}$ ;  $V_0 = 22,4 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$ ;  $T_0 = 273 \text{ К}$ . Подставляя эти значения в уравнение Клапейрона, получаем

$$R = \frac{1,013 \cdot 10^5 \text{ Па} \cdot 22,4 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3}{273 \text{ К}} = 8,31 \text{ Дж}/(\text{моль} \cdot \text{К}). \quad (4.15)$$

Выражая произвольную массу газа в молях ( $m/M$ ), Д. И. Менделеев получил

$$\frac{pV}{T} = \frac{m}{M} R, \quad (4.16)$$

или

$$pV = \frac{m}{M} RT. \quad (4.16')$$

Это уравнение называют *уравнением Клапейрона — Менделеева*.

#### 4.4. Кинетическая теория идеального газа

**Средняя квадратичная скорость молекул.** Пусть в некотором объеме газа содержится  $N$  молекул. Средняя кинетическая энергия поступательного движения этих молекул

$$\bar{E} = \frac{\frac{1}{2} m_1 u_1^2 + \frac{1}{2} m_2 u_2^2 + \dots + \frac{1}{2} m_N u_N^2}{N}$$

Предполагая, что все молекулы имеют одинаковую массу ( $m_1 = m_2 = \dots = m_n = m$ ), запишем

$$\bar{E} = \frac{m}{2} \frac{u_1^2 + u_2^2 + \dots + u_N^2}{N}$$

Величину

$$\bar{u} = \sqrt{\frac{u_1^2 + u_2^2 + \dots + u_N^2}{N}} \quad (4.17)$$

называют *средней квадратичной скоростью молекул*.

Отметим, что квадрат этой скорости не равен квадрату средней скорости молекул, определяемой выражением

$$\tilde{u} = \frac{u_1 + u_2 + \dots + u_N}{N}$$

Выясним, какой смысл имеет понятие средней квадратичной скорости молекул. Если разложить эту скорость по осям координат на составляющие  $\tilde{u}_x, \tilde{u}_y, \tilde{u}_z$ , то по обобщенной теореме Пифагора получим

$$\bar{u}^2 = \bar{u}_x^2 + \bar{u}_y^2 + \bar{u}_z^2.$$

Поскольку направления движения молекул равновероятны, запишем

$$\bar{u}_x^2 = \bar{u}_y^2 = \bar{u}_z^2$$

и, следовательно,

$$\bar{u}^2 = 3\bar{u}_x^2 = 3\bar{u}_y^2 = 3\bar{u}_z^2. \quad (4.18)$$

Мы видим, что средняя квадратичная скорость не зависит от направления движения молекул и именно поэтому определяет значение их средней кинетической энергии.

**Основное уравнение молекулярно-кинетической теории газа.** Пусть в сосуде, имеющем форму куба с ребром  $l$ , находится газ. Свяжем с этим сосудом прямоугольную систему координат (рис. 4.11). Рассмотрим упругий удар молекулы о стенку  $A$  сосуда, которая перпендикулярна оси  $Ox$ . Если спроецировать импульсы молекулы до и после удара на оси координат, то изменение проекции импульса на ось  $Ox$  составит

$$m u_x - (-m u_x) = 2m u_x.$$

Именно такой импульс получит в момент удара стенка  $A$ . При этом проекции импульса на оси  $Oy$  и  $Oz$  останутся без изменения.

Предположим, что в сосуде находится всего одна молекула. Отразившись от стенки  $A$ , она ударится о противоположную стенку  $B$  и, отразившись от стенки  $B$ , вновь ударится о стенку  $A$ . Промежуток времени между двумя последовательными ударами молекулы о стенку  $A$  равен  $2l/u_x$ . По второму закону Ньютона

$$f \frac{2l}{u_x} = 2mu_x.$$

Это значит, что со стороны одной молекулы на стенку действует сила

$$f = \frac{2mu_x^2}{2l}.$$

Однако на самом деле в сосуде находится огромное число молекул, и они соударяются между собой. Отразившись от стенки  $A$ , молекула столкнется с другой молекулой и передаст ей импульс  $2m\bar{u}_x$ . Другая молекула столкнется еще с одной и передаст тот же импульс. Поскольку импульс должен сохраняться, в конце концов какая-то молекула передаст его противоположной стенке. Скорость, с которой происходит передача импульса, можно считать равной средней квадратичной скорости молекул.

Обозначим через  $N$  число молекул в сосуде. Тогда со стороны всех молекул на стенку действует сила

$$F = \frac{2m\bar{u}_x^2}{2l} N.$$

Разделив силу на площадь  $2l$  стенки, найдем давление на стенку.

$$p = \frac{2m\bar{u}_x^2}{2l^3} N.$$

Учитывая (4.18), можно написать

$$p = \frac{2m\bar{u}^2}{3 \cdot 2l^3} N.$$

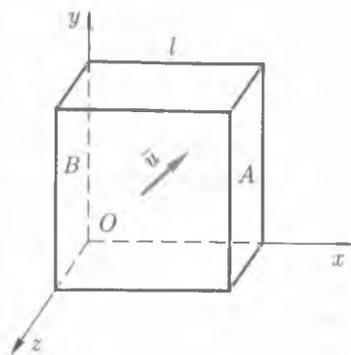


Рис. 4.11

Концентрацию молекул в сосуде, т.е. их число в единичном объеме, обозначим  $n$ . Тогда

$$N = nl^3,$$

где  $l^3$  — объем сосуда.

Сопоставляя два последних равенства, получим

$$p = \frac{2}{3} \frac{m\bar{u}^2}{2} n. \quad (4.19)$$

или

$$p = \frac{1}{3} mn\bar{u}^2. \quad (4.20)$$

Это и есть *основное уравнение молекулярно-кинетической теории газа*, которое устанавливает, что

**давление идеального газа пропорционально произведению массы молекулы, концентрации молекул и средней квадратичной скорости их движения.**

Выражение  $m\bar{u}^2/2$  — это средняя кинетическая энергия  $\bar{E}$  поступательного движения молекул. Таким образом, уравнение (4.19) можно переписать в виде

$$p = \frac{2}{3} \bar{E} n. \quad (4.21)$$

*Давление газа в сосуде пропорционально средней кинетической энергии поступательного движения его молекул и числу молекул в единичном объеме.*

Термодинамическая температура газа как мера средней кинетической энергии поступательного движения его молекул. Пусть в объеме  $V$  находится 1 моль газа. Перепишем для этого случая уравнение (4.19) в форме

$$p = \frac{2}{3} \bar{E} \frac{N_A}{V},$$

откуда

$$pV = \frac{2}{3} \bar{E} N_A. \quad (4.22)$$

Заметим, что уравнение Клапейрона — Менделеева для одного моля газа принимает вид

$$pV = RT.$$

Левые части двух последних уравнений тождественны, следовательно, можно приравнять их правые части:

$$\frac{2}{3} \bar{E} N_A = RT.$$

Тогда средняя кинетическая энергия поступательного движения молекул газа определится выражением

$$\bar{E} = \frac{3}{2} \frac{R}{N_A} T. \quad (4.23)$$

Отношение двух постоянных  $R$  и  $N_A$  есть также величина постоянная. Ее обозначают  $k$  и называют постоянной Больцмана в честь одного из основоположников молекулярно-кинетической теории — австрийского физика Л. Больцмана (1844 — 1906). Таким образом,

$$\bar{E} = \frac{3}{2} kT. \quad (4.24)$$

Из этого выражения непосредственно следует, что

термодинамическая температура газа есть мера средней кинетической энергии поступательного движения его молекул.

Определить скорость молекул лабораторным путем достаточно сложно. Однако с помощью уравнения (4.24) ее среднее квадратичное значение легко вычислить, если известны молярная масса газа и его температура. Перепишем (4.24) в виде

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

откуда

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

Так как  $m = MN_A$ , а  $N_A k = R$ , окончательно имеем

$$\bar{u} = \sqrt{\frac{3RT}{M}}.$$

Молекулярно-кинетическая теория позволила не только объяснить открытые на основе опытов и наблюдений законы идеального газа, но и определила общее направление исследований других, более сложных форм и состояний вещества.



## ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ВЫВОДЫ

1. Окружающие тела состоят из мельчайших частиц вещества — молекул, которые находятся в непрерывном движении. На малых расстояниях ( $\sim 10^{-10}$  м) проявляются молекулярные силы притяжения и отталкивания. Силы отталкивания превосходят силы притяжения, но проявляются на более коротких расстояниях. По этой причине в жидкостях и твердых телах сохраняются межмолекулярные промежутки. В процессе диффузии молекулы одного вещества проникают в промежутки между молекулами другого вещества.

Кинетическая энергия движения молекул и потенциальная энергия их взаимодействия определяют внутреннюю энергию тела.

2. В газах при невысоком давлении, близком к нормальному атмосферному, расстояния между молекулами намного больше размеров самих молекул и молекулярные силы практически не проявляются. Это позволяет пользоваться моделью идеального газа. В модели идеального газа объем самих молекул предполагается равным нулю и молекулярные силы не учитываются. Модель идеального газа значительно упрощает решение задач, связанных с изменением состояния газа.

Внутренняя энергия идеального газа характеризуется только кинетической энергией молекул.

3. Состояние данной массы газа определяется температурой  $t$ , давлением  $p$  и объемом  $V$ . Процессы, в которых изменяются только два параметра, а третий остается постоянным, называют изопроцессами. Таких процессов три: изотермический ( $t = \text{const}$ ), изобарный ( $p = \text{const}$ ), изохорный ( $V = \text{const}$ ). Анализ изопроцессов показывает, что температура  $-273^\circ\text{C}$  является самой низкой из возможных в природе. Эту температуру называют абсолютным нулем. Термодинамическая шкала (шкала абсолютной температуры) связана со шкалой Цельсия соотношением

$$T = 273 + t^\circ\text{C}.$$

Универсальным уравнением, описывающим состояние произвольной массы газа, является уравнение Клапейрона — Менделеева

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

4. Соударяясь со стенками сосуда, молекулы газа оказывают давление на внутреннюю полость сосуда. Давление газа пропор-

ционально средней кинетической энергии поступательного движения его молекул и числу молекул в единичном объеме

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

Мерой средней кинетической энергии молекул газа является его термодинамическая температура  $T$ :

$$\bar{E} = \frac{3}{2} kT.$$

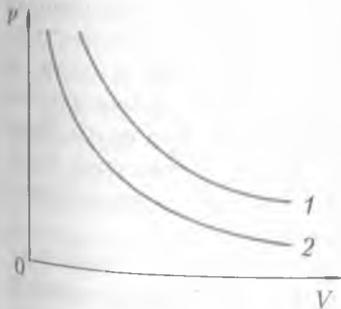


### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ

1. Сформулируйте основные положения молекулярно-кинетической теории.
2. Что следует понимать под относительной молекулярной массой вещества?
3. Чем отличается состав атмосферы Венеры от состава земного воздуха?
4. Изменится ли внутренняя энергия пружины, если ее сжать?
5. В процессе изотермического сжатия давление газа увеличилось в 3 раза, а объем уменьшился на  $2,2 \text{ м}^3$ . Каким был первоначальный объем газа?

*Ответ:*  $V_0 = 3,3 \text{ м}^3$ .

6. На рисунке показаны изотермы двух газов: азота и кислорода, имеющих одинаковые массы и взятых при одной и той же температуре. Какая из этих изотерм принадлежит азоту?



7. Оцените температуру в центральной области Солнца по следующим данным: давление  $2,2 \cdot 10^{16} \text{ Па}$ , плотность  $1,4 \cdot 10^5 \text{ кг/м}^3$ , молярная масса  $0,7 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}$ .

*Ответ:*  $T = 13 \cdot 10^6 \text{ К}$ .

8. Каково давление газа в сосуде при температуре  $+20^\circ\text{C}$ , если концентрация молекул составляет  $2,7 \cdot 10^{25} \text{ м}^{-3}$ ?

*Ответ:*  $p = 1,1 \cdot 10^5 \text{ Па}$ .

9. Вычислите среднюю квадратичную скорость молекул азота при температуре  $+7^\circ\text{C}$ .

*Ответ:*  $v_{\text{ср}} = 500 \text{ м/с}$ .

### 5.1. Теплота и работа

Что изучает термодинамика. В обиходе мы часто употребляем слово «тепло», обычно придавая ему смысл относительной температуры. «Тепло или холодно будет завтра?» — интересуемся мы, слушая прогноз погоды. Каково же научное содержание этого понятия?

Еще в середине XVIII в. не было единого мнения о сущности процессов нагревания и охлаждения тел. Многие ученые того времени, пытаясь объяснить эти процессы, развивали «теорию теплорода». Согласно этой теории при нагревании тела в него «вливается» некоторое количество особой материи — теплорода. При охлаждении теплород «вытекает» из тела. Так появился термин *теплоемкость*. Несостоятельность теории теплорода показал великий русский ученый М. В. Ломоносов. В 1756 г. он осуществил классический опыт. В запаянном сосуде без доступа воздуха он нагревал кусочки металла. При этом масса металла оставалась постоянной, тогда как по теории теплорода она должна возрасти. М. В. Ломоносов принципиально верно объяснял тепловые явления «коловоротным движением корпускул» — по современной терминологии, хаотическим движением молекул.

Исследование тепловых явлений в XIX в. связано с внедрением в промышленность тепловых машин. От слов *therme* и *dynamis*, которые в переводе с латинского означают *тепло* и *сила*, произошел сам термин *термодинамика*. Таким образом, первоначально под термодинамикой понимали науку о «тепловой силе». Но по мере развития термодинамики уточнялся и сам смысл этого понятия. В наши дни термодинамикой называют раздел физики, изучающий связи и взаимопревращения различных видов энергии.

под термином *теплота* понимают меру изменения внутренней энергии тела без совершения работы.

**Термодинамическая система.** В термодинамике мы имеем дело не с отдельными молекулами или атомами, а с макроскопическими телами, состоящими из огромного множества частиц. Поэтому свойства вещества в термодинамике описываются макроскопическими величинами. К таким величинам прежде всего относятся *давление* и *температура*. Макроскопические величины к отдельным молекулам и атомам неприменимы. Бессмысленно говорить о давлении и температуре одной молекулы.

Макроскопические тела бесконечно многообразны. Это находящийся в баллоне газ, жидкость в сосуде, любой предмет в окружающей нас обстановке. Каждое макроскопическое тело, поскольку оно состоит из множества частиц, является *термодинамической системой*. В качестве термодинамических систем можно рассматривать и небесные тела — планеты, звезды и т.д. За термодинамическую систему можно принять часть космического тела, например атмосферу планеты, солнечную корону, ядро кометы.

Общим свойством термодинамических систем является их стремление к равновесному состоянию. Такое состояние, характеризующееся постоянством макроскопических величин термодинамической системы, возможно только при отсутствии внешних воздействий. Но, строго говоря, абсолютно изолированных систем во Вселенной не существует. Поэтому, говоря о равновесном состоянии системы, мы допускаем некоторую идеализацию. Однако такая идеализация упрощает решение многих практических задач и дает результаты с удовлетворительной точностью.

**Два способа изменения внутренней энергии системы.** Пусть некоторая термодинамическая система находится в равновесном состоянии. Поскольку макроскопические величины — температура и давление — остаются постоянными, будем считать, что и внутренняя энергия системы есть величина постоянная. Обозначим ее  $U_0$ . Если система под внешним воздействием перейдет в новое состояние, ее внутренняя энергия изменится и станет равной  $U$ . Величина  $U - U_0 = \Delta U$  есть изменение внутренней энергии системы. Следовательно, изменение внутренней энергии системы означает ее переход в новое состояние.

Перевести систему в новое состояние можно различными способами, в частности в процессе *теплообмена* и в процессе совершения *работы*. Рассмотрим первый способ.

Приведем два тела, имеющие различную температуру, в непосредственный контакт так, чтобы молекулы одного из них могли взаимодействовать с молекулами другого. (Например, в сосуде с кипятком опустим кусочек льда.) В связи с взаимодействием молекул этих тел начнется перераспределение энергии между ними. Оно будет продолжаться до тех пор, пока средняя кинетическая энергия обоих тел не примет одно и то же значение. Такой процесс называют теплообменом. В результате теплообмена между телами устанавливается термодинамическое равновесие при постоянной температуре.

**Энергию, которую получает или отдает система в процессе теплообмена, называют теплотой ( $Q$ ).**

В окружающей действительности постоянно происходит изменение внутренней энергии тел посредством теплообмена. Можно привести также множество примеров изменения внутренней энергии тел в процессе совершения механической работы. Хорошо известно, как нагреваются пила, которой распиливают дрова, лезвие ножа на точильном колесе, влетающее в атмосферу метеорное тело и т. д. В этих случаях кинетическая энергия упорядоченного движения тела как целого превращается в энергию беспорядочного движения его молекул. Кроме того, механическая работа сопровождается деформацией тела. При деформации изменяется взаимное положение молекул тела, а следовательно, и их потенциальная энергия.

Нетрудно понять, чем отличается нагревание тела от сообщения ему теплоты. Нагревание — это повышение температуры тела, каким бы способом оно ни происходило. Сообщение теплоты обязательно ведет к нагреванию тела. Например, в процессе плавления вещества его температура остается постоянной, а подводимая к веществу теплота расходуется лишь на увеличение потенциальной энергии его молекул.

Состоянию системы не соответствуют какие-либо значения работы  $A$  или теплоты  $Q$ . Они являются функциями процесса, а не состояния. В этом их принципиальное отличие от внутренней энергии. Если можно говорить о запасе внутренней энергии, то говорить о запасе теплоты или работы не имеет смысла.

**Первое начало термодинамики.** Внутренняя энергия системы может изменяться как в процессе теплообмена, так и в процессе совершения работы. Очевидно, возможен и такой случай, когда оба процесса протекают одновременно. Как показывают опыты и наблюдения, в этом случае

**первое начало термодинамики:** подведенная к системе теплота расходуется на изменение внутренней энергии системы и на совершение этой системой работы:

$$Q = \Delta U + A. \quad (5.1)$$

Первое начало термодинамики выражает фундаментальный закон природы — закон сохранения и превращения энергии в применении к тепловым процессам, оно отрицает возможность создания вечного двигателя первого рода — машины, которая работала бы без затраты энергии. В самом деле из (5.1) следует, что если  $Q$  и  $\Delta U$  равны нулю, то и  $A$  не может отличаться от нуля.

Пользуясь уравнением (5.1), необходимо знать правило знаков. Сообщаемое системе количество теплоты есть величина положительная. В этом случае  $Q > 0$ . Отводимое от системы количество теплоты — величина отрицательная:  $Q < 0$ . Аналогично, работа по отношению к термодинамической системе может быть как положительной, так и отрицательной. Если система совершает работу против внешних сил и ее объем увеличивается ( $\Delta U > 0$ ), то работа положительна ( $A > 0$ ). Если же внешние силы совершают работу над системой, уменьшая ее объем ( $\Delta U < 0$ ), то работа отрицательна ( $A < 0$ ).

## 5.2. Термодинамика идеального газа

**Работа газа при изобарном изменении его объема.** В качестве термодинамической системы рассмотрим идеальный газ, находящийся в цилиндре под поршнем (рис. 5.1). Пренебрегая трением поршня о стенки цилиндра, будем считать, что сила  $F$  давления газа уравнивает вес поршня. Сообщим газу некоторое количество теплоты. В соответствии с уравнениями (4.21) и (4.24) газ нагреется и поднимет поршень на  $\Delta h$ . При этом совершится работа

$$A = F\Delta h. \quad (5.2)$$

Выразив силу поршня  $F$  через давление газа и площадь  $S$  поршня, получим

$$A = pS\Delta h. \quad (5.3)$$

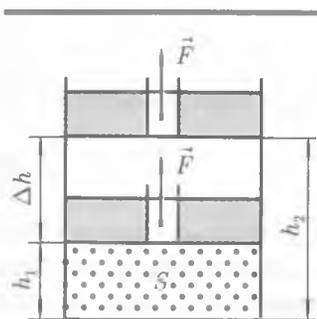


Рис. 5.1

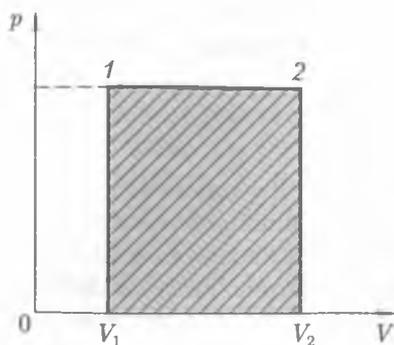


Рис. 5.2

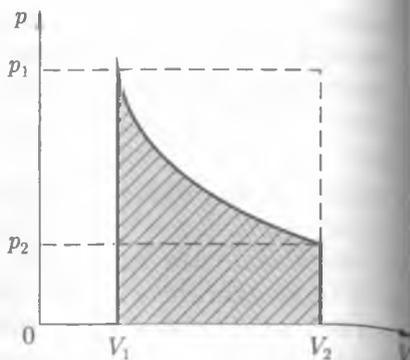


Рис. 5.3

Обозначим через  $V_1$  и  $V_2$  начальный и конечный объемы газа. Заметим, что произведение площади поршня на его перемещение равно изменению объема газа, т. е.

$$S\Delta h = V_2 - V_1 = \Delta V,$$

и, следовательно, первое начало термодинамики принимает вид

$$Q_p = \Delta U + p\Delta V. \quad (5.4)$$

Выразим работу газа при изобарном расширении графически. На диаграмме в осях  $p, V$  обозначим начальное и конечное состояние газа точками 1 и 2 (рис. 5.2). Прямая 1—2 соответствует описанному выше процессу. Работа газа выразится площадью заштрихованного прямоугольника.

**Теплоемкость газа.** Разделим почленно уравнение (5.4) на  $\Delta T$  (изменение температуры газа):

$$\frac{Q_p}{\Delta T} = \frac{\Delta U}{\Delta T} + \frac{p\Delta V}{\Delta T}.$$

Если в цилиндре под поршнем находится 1 моль газа, то

$$C_p = \frac{\Delta U}{\Delta T} + \frac{p\Delta V}{\Delta T}, \quad (5.5)$$

где  $C_p$  — молярная теплоемкость газа при постоянном давлении. В изотермическом процессе внутренняя энергия системы остается постоянной. При таком условии вся подводимая к системе теплота расходуется только на совершение работы и первое начало термодинамики принимает вид

$$Q_i = A. \quad (5.6)$$

На графике в осях  $p-V$  (рис. 5.3) работа в изотермическом процессе выразится площадью криволинейной трапеции. При одинаковом изменении объема  $\Delta V$  работа оказывается существенно меньшей, чем при изобарном расширении.

Поскольку условием изотермического процесса является  $\Delta T = 0$ , понятие теплоемкости в этом случае теряет смысл.

Если при нагревании газа в цилиндре поршень был бы закреплен, то объем газа оставался бы постоянным:  $\Delta V = 0$ . Такой процесс, как известно, называется изохорным. Поэтому в изохорном процессе работа не совершается и подводимая к системе теплота расходуется только на изменение ее внутренней энергии. Первое начало термодинамики в изохорном процессе принимает вид

$$Q_V = \Delta U. \quad (5.7)$$

Молярная теплоемкость газа при постоянном объеме выражается формулой

$$C_V = \frac{\Delta U}{\Delta T}. \quad (5.8)$$

Сравнивая формулы (5.5) и (5.8), видим, что молярная теплоемкость газа при постоянном давлении больше, чем при постоянном объеме, на величину  $p\Delta V/\Delta T$ , числовое значение которой можно найти из уравнения Клапейрона — Менделеева для 1 моля газа:

$$pV = RT.$$

При постоянном давлении изменение температуры ведет к изменению объема газа:

$$p\Delta V = R\Delta T,$$

откуда

$$\frac{p\Delta V}{\Delta T} = R \quad (5.9)$$

или с учетом уравнений (5.5) и (5.8) получим

$$C_p - C_V = R. \quad (5.10)$$

Физический смысл постоянной  $R$  становится ясным из соотношения (5.9): работа идеального газа, взятого в количестве 1 моль, при его нагревании на 1 К численно равна молярной газовой постоянной.

**Адиабатный процесс.** Итак, в изобарном процессе (5.4) все три величины, входящие в уравнение первого начала термодинамики, отличны от нуля. В изохорном процессе не совершается работа ( $A = 0$ ), а в изотермическом процессе не изменяется внутренняя энергия ( $\Delta U = 0$ ). Возможен и такой процесс, в котором отсутствует теплообмен.

**Процесс, совершаемый без теплообмена, называют адиабатным.**

В адиабатном процессе работа над внешними телами совершается за счет внутренней энергии системы:

$$A = -\Delta U. \quad (5.11)$$

Теплоемкость газа в этом процессе равна нулю.

В 1823 г. французский физик С. Пуассон получил уравнение адиабаты

$$pV^\gamma = \text{const}, \quad (5.12)$$

где

$$\gamma = \frac{C_p}{C_v} > 1.$$

Сравнивая адиабату 2 с изотермой 1 в осях  $p-V$  (рис. 5.4), видим, что давление газа при адиабатном расширении падает быстрее, чем при изотермическом. Поэтому при одинаковом изменении объема газа работа в этих процессах оказывается различной. При адиабатном расширении она значительно меньше.

Поскольку абсолютно теплоизолировать систему невозможно, адиабатный процесс в чистом виде неосуществим. Однако если

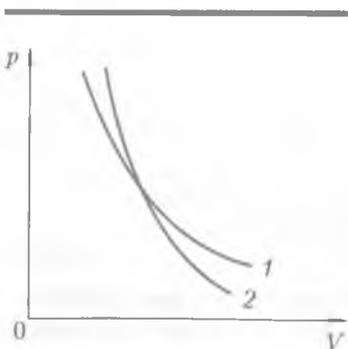


Рис. 5.4

процесс вести достаточно быстро, так, чтобы он проходил почти без обмена теплотой с внешней средой, то применение к такому процессу уравнения адиабаты дает совсем несущественные погрешности. Адиабатными процессами можно считать быстрое расширение газообразных продуктов горения топлива в цилиндре двигателя внутреннего сгорания, а также взрывы бомб, снарядов и мин.

Время, за которое происходит адиабатное расширение или сжатие газа, существенно зависит от масш-

табов процесса. Существуют звезды, периодически меняющие свой блеск. К ним, в частности, относятся пульсирующие звезды, изменение блеска которых связано с повторяющимися процессами адиабатного расширения и сжатия их внешних оболочек.

Процессы, близкие к адиабатным, происходят в некоторых туманностях. Длительность таких процессов может быть огромной (до нескольких миллионов лет).

### 5.3. Необратимость тепловых процессов

**Понятие о втором начале термодинамики.** Ни в каком процессе энергия не может вновь возникнуть или исчезнуть. Однако можно придумать много процессов, в которых выполняется закон сохранения энергии, но которые заведомо неосуществимы.

Например, наполним стакан водой при комнатной температуре. Молекулы воды из-за хаотичности их движения имеют самые различные скорости как по модулю, так и по направлению. Казалось бы, ничто не мешает всем быстрым молекулам собраться в нижней половине стакана, а медленным — в его верхней части. В результате такого перераспределения молекул нижняя часть воды в стакане оказалась бы сильно нагретой, а верхние слои воды превратились бы в лед. Однако вероятность такого события бесконечно мала и практически оно никогда не произойдет.

Другой пример. Пусть кто-то из вас, уходя утром из дома, бросил на пол мяч, и тот под действием сил упругости начал прыгать. Вернувшись домой, вряд ли вы увидите, что мяч продолжает прыгать, каждый раз поднимаясь на одну и ту же высоту. Хотя такое невероятное событие не противоречит первому началу термодинамики. Ведь можно рассуждать так: во время удара мяча о пол его механическая энергия превращается во внутреннюю энергию мяча и пола. Затем внутренняя энергия в том же количестве превращается в механическую энергию мяча, который после отскока поднимается на прежнюю высоту. Однако, сколько бы мы ни повторяли этот опыт, ничего подобного не увидим. Механическая энергия мяча будет необратимо превращаться во внутреннюю энергию окружающих тел, и мяч, сделав несколько отскоков, окажется покоящимся на полу.

Итак, кроме закона сохранения и превращения энергии в природе действует другой закон, определяющий направленность всех процессов, их необратимость. Этот закон называют **вторым началом термодинамики**. Существует несколько классических

формулировок второго начала термодинамики. Одну из них дал немецкий физик Р.Клаузиус (1822 – 1888):

невозможен процесс, в котором теплота самопроизвольно передается от менее нагретого тела к более нагретому.

**Принцип действия и коэффициент полезного действия тепловых машин.** Второе начало термодинамики играет основополагающую роль в теории тепловых машин.

Тепловыми машинами называют устройства, с помощью которых часть внутренней энергии системы можно превратить в механическую энергию и за счет нее совершить работу. К таким устройствам относятся паровые машины, паровые турбины, двигатели внутреннего сгорания и реактивные двигатели.

Если для превращения механической энергии во внутреннюю энергию системы достаточно наличия только двух тел, то для работы тепловой машины необходимо наличие трех тел: нагревателя, рабочего тела и холодильника (рис. 5.5).

Получив от нагревателя некоторое количество теплоты, рабочее тело часть этой теплоты превращает в механическую работу, а другую часть отдает холодильнику.

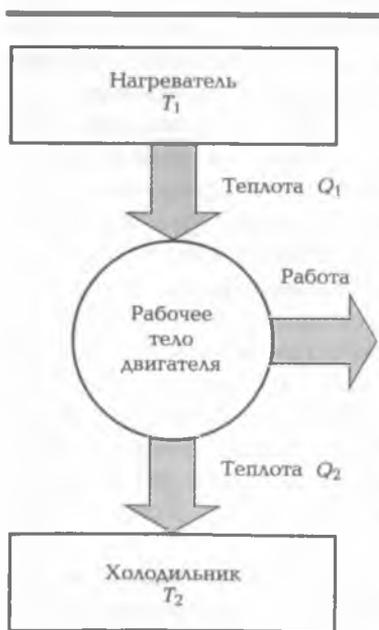


Рис. 5.5

Если бы тепловая машина могла работать без холодильника, то оказалось бы возможным всю внутреннюю энергию рабочего тела превращать в механическую работу, т.е. осуществлять обратимые процессы. Более того, такая машина могла бы работать и без нагревателя, а рабочим телом служило бы любое вещество, любой окружающий нас предмет, имеющий температуру, отличную от абсолютного нуля. По сути дела, это был бы вечный двигатель. Поскольку создание такого двигателя противоречит второму началу термодинамики, его называют вечным двигателем второго рода. Кельвин дал следующую формулировку второго начала термодинамики:

вечный двигатель второго рода неосуществим.

В 1824 г. французский инженер С. Карно показал, что максимально возможный коэффициент полезного действия (КПД) тепловой машины определяется формулой

$$\eta = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} 100\%, \quad (5.13)$$

где  $Q_1$  — затраченное нагревателем количество теплоты;  $Q_2$  — количество теплоты, отбираемое холодильником.

Формула (5.13) имеет только теоретическое значение, поскольку в реальных условиях измерить  $Q_1$  и  $Q_2$  практически невозможно. Однако с помощью термодинамических соотношений можно получить другую формулу, удобную для практического применения:

$$\eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1} 100\%, \quad (5.14)$$

где  $T_1$  — температура нагревателя;  $T_2$  — температура холодильника. В то же время необходимо помнить, что  $\eta$  — это КПД идеальной тепловой машины, в которой кроме  $Q_2$  никакие другие потери энергии не учитываются. В реальных машинах КПД значительно меньше.

У паровых машин, применявшихся в промышленности и на транспорте вплоть до 1950-х гг., КПД не превышал 10...13%.

Более совершенными двигателями являются паровые турбины, их КПД близок к 25%. Их делят на турбины активного действия и турбины реактивного действия. В первом случае вращение ротора

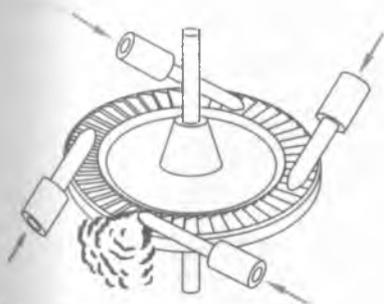


Рис. 5.6

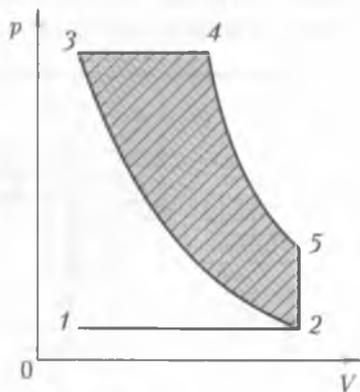


Рис. 5.7

происходит за счет удара струи пара о его лопатки (рис. 5.6). Во втором случае пар создает реактивную тягу. В последнее время стали применять *газовые турбины*. Принцип работы газовых турбин тот же, что и паровых, но поскольку температура газа значительно выше температуры пара, КПД газовых турбин достигает 50%. Широкое применение на транспорте получили *двигатели внутреннего сгорания*. Их КПД составляет около 40%. Различают два основных типа таких двигателей: карбюраторные и дизельные.

Более экономичным является дизельный двигатель, работающий на дешевых сортах топлива. В его цилиндр всасывается не горючая смесь, как в карбюраторном двигателе, а атмосферный воздух. На диаграмме (рис. 5.7) первый такт представлен изобарой 1–2. При движении поршня вверх происходит сжатие воздуха по адиабате 2–3 до давления 1,2 МПа. В конце этого такта температура воздуха повышается до 1 000 К. В сжатый и горячий воздух с помощью форсунки впрыскивается топливо, которое при столь высокой температуре воспламеняется. Во время горения топлива происходит расширение газа по изобаре 3–4. Когда топливо сгорает, дальнейшее расширение совершается по адиабате 4–5. В конце рабочего хода 5 поршня открывается выхлопной клапан и давление по изохоре 5–2 падает до атмосферного. Полезная работа соответствует площади заштрихованной фигуры на диаграмме (см. рис. 5.7).

При очень высоких температурах газа работают реактивные двигатели, нашедшие применение в авиации и ракетной технике. Схема авиационного турбореактивного двигателя представлена на рис. 5.8. КПД таких двигателей достигает 60...70%.

**Холодильные установки.** До сих пор мы говорили о тепловых машинах, которые работают по *прямому циклу*, т. е. когда осуществляется процесс превращения теплоты в работу. Кроме того, су-

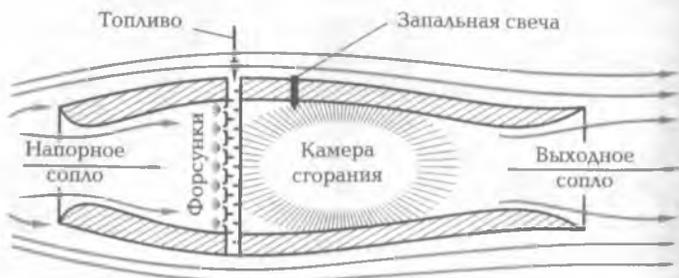


Рис. 5.8

ществуют машины *обратного цикла*, когда в результате совершенной работы от системы отбирается некоторое количество теплоты. В этом случае теплота переходит от менее нагретого тела к более нагретому. Такие машины называют *холодильными установками*. Так как в силу второго начала термодинамики процесс обратного цикла самопроизвольно идти не может, то холодильные установки работают на энергии от внешнего источника, например от электрической сети.

Самой распространенной холодильной установкой является домашний холодильник. Устройство основного агрегата холодильника показано на рис. 5.9. Агрегат состоит из компрессора 2, конденсатора 1, крана 4 и испарителя 3.

Охлаждающая система заполняется легкоиспаряющимся веществом, например фреоном. Газообразный фреон посредством компрессора, работающего от электродвигателя, сжимается в конденсаторе и переходит в жидкое состояние. При сжатии он отдает теплоту комнатному воздуху. Жидкий фреон через автоматический открывающийся кран поступает в испаритель, который находится внутри холодильника. В испарителе при низком давлении фреон становится газообразным и при этом сильно охлаждается. Охлажденный фреон забирает теплоту от внутренней полости холодильника и находящихся в нем продуктов. Далее весь процесс повторяется снова.

**Роль тепловых двигателей в народном хозяйстве и охрана природы.** Значение тепловых двигателей в народном хозяйстве исключительно велико. В плане развития энергетического машиностроения нашей страны предусмотрено серийное изготовление

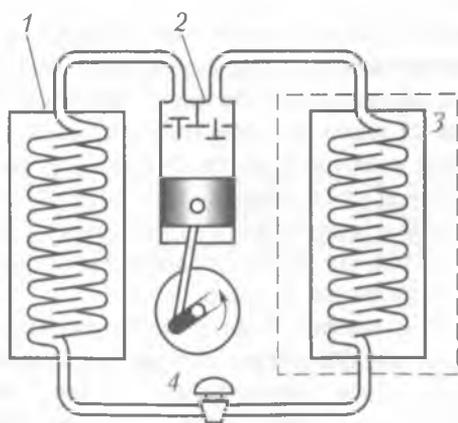


Рис. 5.9

паротурбинных блоков мощностью 800 МВт, а также газовых турбин мощностью 1 200 ... 1 500 МВт для высоконапорных и гидроаккумулирующих электростанций.

В развитии сельского хозяйства решающую роль играет внедрение новейших моделей тракторов, посевных и уборочных машин, в которых используются двигатели внутреннего сгорания.

Быстрыми темпами идет развитие автомобильного транспорта. Основное внимание уделяется выпуску дизельных грузовых автомобилей и автопоездов с уменьшением на 25 ... 30% (по сравнению с бензиновыми) удельного потребления топлива. Предусмотрены освоение производства дизельных автобусов повышенной вместимости и комфортабельности, увеличение выпуска большегрузных автомобилей, в том числе грузоподъемностью 110 ... 180 т. Расширяется производство автомобилей, работающих на сжатом и сжиженном газе. Ускоряется переход на производство легковых автомобилей с дизельным двигателем. Налаживается выпуск специальных автомобилей для обеспечения непрерывности технологических процессов в отраслях агропромышленного комплекса. Двигатели внутреннего сгорания широко применяются на водном транспорте.

Огромную роль в развитии воздушного транспорта сыграло использование в тепловых двигателях реактивной тяги. Турбореактивные лайнеры за считанные часы способны доставить грузы и пассажиров в самые отдаленные районы нашей страны.

Решая задачи экономики, нельзя забывать об охране природы. Перед человечеством встала неотложная задача охраны природы как в отдельных районах земного шара, так и в масштабах всей планеты. Особое беспокойство вызывает загрязнение водоемов и атмосферы.

Исследования показали, что животные, растения, а также человек очень чувствительны даже к незначительному изменению химического состава воздуха. А между тем работа промышленности и транспорта связана со сжиганием самого разнообразного топлива. При этом в атмосферу поступает огромное количество углекислого газа и других химических соединений. Многие из них оказывают неблагоприятные воздействия на живые организмы. Только за последние 25 лет количество углекислого газа в атмосфере увеличилось на 345 млрд т.

На тепловых электростанциях, где установлены газовые турбины, в окружающий воздух поступают десятки тонн сернистых газов. Эти газы, соединяясь с атмосферной влагой, образуют капельки серной кислоты, в результате чего выпадают кислотные дожди. Они губительно действуют на фауну и флору, вызывают различ-

ные заболевания у людей. Кроме того, возрастающее потребление топлива приводит к уменьшению кислорода в атмосфере. Только один реактивный лайнер за 5 ч полета потребляет 45 т кислорода.

Большое значение придается техническим средствам защиты окружающей среды. Например, разработана технология нейтрализации вредных отходов, возникающих при работе газовых турбин. С этой целью рекомендуется пропускать сернистые газы через щелочную воду. Исследуется проблема замены автомобилей электромобилями. Здесь главная трудность заключается в создании аккумуляторных батарей, обладающих достаточной мощностью и энергоемкостью. Изучается возможность использования в ряде случаев двигателей, работающих на энергии ветра, солнечных лучей и т. д.



## ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ВЫВОДЫ

1. Термодинамика изучает наиболее общие свойства термодинамических систем и происходящие в них процессы, связанные с превращением энергии. Под термодинамической системой понимают такую большую совокупность частиц, например молекул, когда поведение одной или нескольких из них несущественно для системы в целом. Предоставленная самой себе термодинамическая система стремится к тепловому равновесию, т. е. к такому состоянию, при котором характеризующие ее параметры — температура, давление, молярный объем — остаются постоянными.

В основе термодинамики лежат два начала (закона), которые получены в результате наблюдений и опытов.

Выражая закон сохранения и превращения энергии в тепловых процессах, первое начало термодинамики утверждает: подведенная к системе теплота расходуется на изменение внутренней энергии системы и на совершение работы:

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

2. При постоянном давлении молярная теплоемкость газа больше, чем при постоянном объеме, на значение молярной газовой постоянной  $R$ , которая равна работе 1 моль газа при его нагревании на 1 К:

$$C_p = C_v + R.$$

3. Процесс, происходящий в отсутствие теплообмена, называют адиабатным. В этом процессе работа совершается за счет изменения внутренней энергии системы:

$$A = -\Delta U.$$

4. Второе начало термодинамики констатирует необратимость процессов в природе. Оно отрицает возможность самопроизвольной передачи теплоты от менее нагретого тела более нагретому, а также создание тепловой машины, способной внутреннюю энергию рабочего вещества полностью превращать в механическую работу. Именно поэтому реальная тепловая машина содержит три необходимых компонента: нагреватель, рабочее вещество и холодильник.

5. Тепловые двигатели широко применяются в промышленности, сельском хозяйстве и на транспорте. Проблемой является такое совершенствование тепловых двигателей, чтобы их работа была экологически чистой, исключающей загрязнение почвы, атмосферы и гидросферы нашей планеты.



### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ

1. Каким условиям должна удовлетворять термодинамическая система?
2. Напишите уравнение первого начала термодинамики для изобарного, изохорного, изотермического и адиабатного процессов.
3. Вычислите работу газа в цилиндре тепловой машины, если площадь поршня  $500 \text{ см}^2$ , а ход поршня  $64 \text{ см}$ . Давление считать постоянным, равным  $5 \cdot 10^6 \text{ Па}$ .

*Ответ:*  $A = 16 \text{ кДж}$ .

4. Смешали  $3 \text{ л}$  воды, взятой при температуре  $20^\circ \text{C}$ , и  $2 \text{ л}$  кипятка. Определите температуру смеси.

*Ответ:*  $t = 52^\circ \text{C}$ .

5. К баллону с азотом подведена теплота величиной  $21 \text{ кДж}$ . Определите совершенную газом работу и изменение его внутренней энергии.

*Ответ:*  $A = 6 \text{ кДж}$ .

6. Водород массой  $100 \text{ г}$  нагрели при постоянном давлении от  $0$  до  $100^\circ \text{C}$ . Чему равна совершенная газом работа?

*Ответ:*  $A = 42 \text{ кДж}$ .

7. Пар поступает на турбину при температуре  $177^\circ \text{C}$ . Температура окружающего воздуха  $+15^\circ \text{C}$ . Определите максимально возможный КПД паровой турбины.

*Ответ:*  $\eta = 36\%$ .

# 6 АГРЕГАТНЫЕ СОСТОЯНИЯ И ФАЗОВЫЕ ПЕРЕХОДЫ

## 6.1. Понятие о фазовых превращениях. Диаграмма состояния вещества

**Понятие фазы вещества.** Наблюдения показывают, что вещество может находиться в различных физических состояниях, или *фазах*. Так, три различных агрегатных состояния воды — лед, обычная вода, водяной пар — это также три ее различные фазы.

Но понятия фазы вещества и его агрегатного состояния не являются тождественными. В пределах одного и того же агрегатного состояния вещество может находиться в различных фазах. В качестве примера рассмотрим алмаз и графит. Химический анализ показывает, что и тот и другой представляют собой углерод в чистом виде, однако свойства их весьма различны. Алмаз — одно из самых твердых веществ. Его плотность составляет  $3,5 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>. Ювелирная обработка алмаза превращает его в бриллиант — сверкающий драгоценный камень. Графит — совсем невзрачное вещество, легко расслаивается и имеет плотность  $2,1 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>. Таким образом, алмаз и графит — это две различные фазовые модификации твердого углерода.

**Молекулярная картина испарения и конденсации.** В быту и окружающей нас природе мы часто наблюдаем фазовый переход вещества (обычно воды) из жидкого состояния в газообразное, а именно в пар. Если такой переход совершается только в поверхностном слое жидкости, то его называют *испарением*. Из повседневного опыта известно, что интенсивность испарения зависит от температуры жидкости, площади ее открытой поверхности, плотности окружающего пара, скорости потока воздуха над поверхностью жидкости и химической природы жидкости.

Чтобы покинуть жидкость и перейти в пар, молекула должна совершить *работу выхода*, т. е. преодолеть притяжение окружа-

ющих молекул жидкости. Для этого молекула должна обладать достаточно большой кинетической энергией. Поэтому в пар переходят самые «быстрые» молекулы. В результате средняя квадратичная скорость оставшихся в жидкости молекул уменьшается и температура жидкости в процессе испарения понижается.

Замечено, что в жаркий летний день после дождя становится прохладнее. Испаряющаяся вода забирает теплоту от окружающего воздуха. Следовательно, испарение сопровождается поглощением теплоты.

Наряду с испарением происходит также *конденсация* пара. В процессе конденсации часть молекул вследствие хаотичности их движения возвращается в жидкость. Конденсация сопровождается выделением теплоты в том же количестве на единицу массы, в каком она поглощается при испарении. Интенсивность испарения или конденсации зависит от внешних условий, в которых находятся жидкость и пар. При некоторых условиях между этими процессами устанавливается *динамическое равновесие*, когда число молекул, покидающих жидкость в единицу времени, равно числу молекул, возвращающихся в нее.

**Насыщенный пар и его свойства.** Пар, находящийся в динамическом равновесии со своей жидкостью, называют *насыщенным*.

Некоторые свойства насыщенного пара можно изучить с помощью установки, схема которой показана на рис. 6.1, а. В прозрачном цилиндре под поршнем находится ненасыщенный пар. Будем изотермически сжимать этот пар, медленно вдвигая поршень в цилиндр, а изменение объема и давления отмечать на графике (рис. 6.1, б).

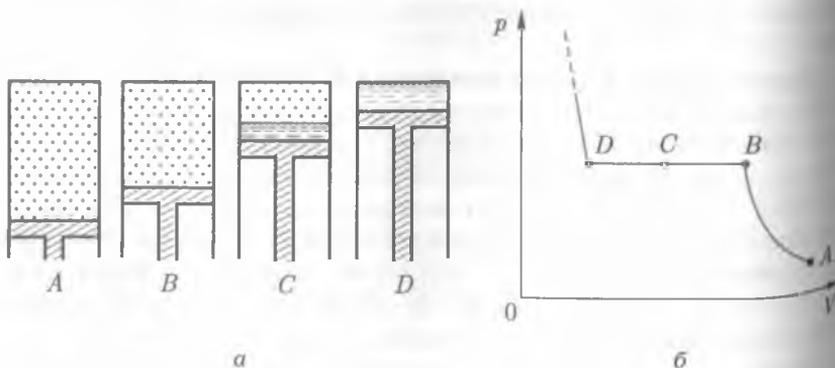


Рис. 6.1

При движении поршня на участке  $AB$  давление пара изменяется по изотерме в соответствии с законом Бойля—Мариотта. За точкой  $B$  в цилиндре появляется жидкость. Это означает, что находящийся там пар пришел в состояние насыщения. При дальнейшем сжатии на участке  $BC$  объем жидкости увеличивается, а давление остается постоянным. В точке  $D$  весь пар превращается в жидкость, и дальнейшее сжатие ведет к резкому скачку давления. Таким образом, *давление насыщенного пара не зависит от объема*. Иначе говоря, насыщенный пар закону Бойля—Мариотта не подчиняется.

Рассмотрим другой опыт. Возьмем герметически закрытый сосуд, часть объема которого занимает жидкость, а другую часть — насыщенный пар. Начнем нагревать этот сосуд. Поскольку с повышением температуры испарение становится более интенсивным, динамическое равновесие между жидкостью и паром нарушится. Количество жидкости начнет уменьшаться, а плотность и давление пара возрастут. Как только нагревание прекратится, между жидкостью и паром вновь установится динамическое равновесие. *Чем выше температура насыщенного пара, тем больше его плотность и давление.*

**Влажность воздуха.** Совершаемый в атмосфере Земли круговорот воды, сопровождаемый преобразованием энергии, подобен работе гигантской тепловой машины. Источником энергии здесь служит солнечное излучение, а «рабочим» веществом — водяной пар.

**Количество водяного пара, содержащегося в  $1 \text{ м}^3$  воздуха, называют абсолютной влажностью воздуха.**

Абсолютная влажность как таковая еще не определяет погодноклиматических условий. Решающую роль в формировании этих условий играет температура воздуха. При одной и той же абсолютной влажности воздух в зависимости от температуры вызывает ощущение сухой или сырой погоды. Все дело в том, насколько близок находящийся в воздухе пар к состоянию насыщения. Для характеристики состояния водяного пара при каждой конкретной температуре вводится специальная величина — относительная влажность воздуха  $\varphi$ .

**Относительной влажностью воздуха называют выраженное в процентах отношение абсолютной влажности  $\rho$  к плотности насыщенного пара  $\rho_0$  при данной температуре:**

$$\varphi = \frac{\rho}{\rho_0} 100 \% \quad (6.1)$$

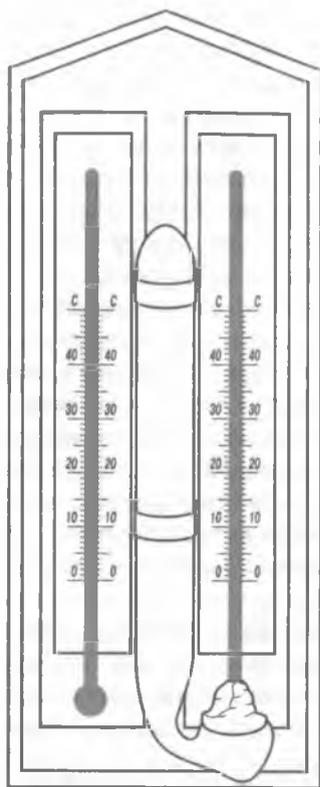


Рис. 6.2

мометров: сухого и смоченного. Фиксируя показания обоих термометров, определяют психрометрическую разность (разность показаний), а затем по психрометрической таблице находят относительную влажность воздуха.

При нормальной трудовой деятельности взрослый человек вследствие испарения влаги с поверхности кожи теряет около 2 кг воды в сутки. Повышенная или пониженная потеря воды в зависимости от влажности воздуха отрицательно сказывается на самочувствии человека. Медико-биологические исследования показали, что оптимальная относительная влажность воздуха в жилых помещениях должна быть около 60%.

**Физическая картина кипения.** Вы, наверное, не раз наблюдали, как закипает вода. Вначале на дне и стенках сосуда появляется множество мелких пузырьков. Это пузырьки воздуха, опрес-

**Точка росы.** Температура, при которой находящийся в воздухе пар переходит в состояние насыщения, называют *точкой росы*. В этом случае относительная влажность воздуха равна 100%, а процессы испарения воды и конденсации пара идут одинаково интенсивно.

Жителям средних широт хорошо известно, что при ясной погоде в конце августа и в начале сентября обычно ночная температура воздуха бывает значительно ниже дневной. В предрассветные часы она нередко опускается ниже точки росы. Тогда на траве, листьях деревьев, металлических крышах появляется роса, а в низинах над озерами, реками и болотами повисает туман, состоящий из очень мелких капелек воды.

При определении влажности воздуха пользуются специальными приборами — *гигрометрами* (от греч. *гигрос* — влажный) и *психрометрами* (от греч. *психрос* — холодный).

Достаточно высокую точность измерения обеспечивает психрометр Августа (рис. 6.2). Он состоит из двух тер-

деленное количество которого всегда растворено в воде. При дальнейшем нагревании пузырьки начинают увеличиваться за счет поступающего в них пара и всплывают к поверхности. В верхних, менее нагретых, слоях жидкости находящийся в пузырьках пар конденсируется, а воздух растворяется в воде. Поэтому, не достигнув поверхности, пузырьки захлопываются, производя характерный шум. Когда жидкость достаточно прогреется во всем объеме, пузырьки, быстро увеличиваясь в размерах, достигают поверхностного слоя и лопаются, разбрызгивая жидкость. С этого момента начинается процесс кипения.

**Кипение** — это парообразование, происходящее во всем объеме жидкости. Температуру, при которой закипает жидкость, называют *точкой кипения* данной жидкости.

**Зависимость точки кипения от внешнего давления.** Разрыв пузырьков в поверхностном слое кипящей жидкости свидетельствует о том, что давление пара в них превышает внешнее давление газа, например воздуха, над поверхностью жидкости. При  $100\text{ }^\circ\text{C}$  давление насыщенных паров воды равно нормальному атмосферному давлению. Именно при этом давлении точка кипения воды равна  $100\text{ }^\circ\text{C}$ . В горах на 5-километровой высоте атмосферное давление почти в два раза меньше, чем на уровне моря, и вода там закипает при  $82\text{ }^\circ\text{C}$  (на верхней границе тропосферы — при  $65\text{ }^\circ\text{C}$ ). Таким образом, жидкость начинает кипеть при температуре, соответствующей равенству давления ее насыщенных паров внешнему давлению.

## 6.2. Реальный газ

**Изотерма реального газа.** Графиком изотермического процесса для идеального газа в осях  $p - V$  является гипербола, симметричная этим осям. Сравнивая его с графиком экспериментальной изотермы для реального газа (см. рис. 6.1), нетрудно заметить существенное различие между ними. У изотермы идеального газа отсутствует горизонтальный участок. Если построить ряд экспериментальных изотерм, последовательно повышая начальную температуру ненасыщенного пара (рис. 6.3), т.е. реального газа, можно заметить, что горизонтальный участок  $BC$  ( $B_1C_1$ ,  $B_2C_2$  и т.д.) становится все короче и короче. В конце концов при некоторой достаточно высокой температуре он исчезает совсем.

Чтобы понять суть этого явления, обратимся к опыту. Пусть в запаянной ампуле (рис. 6.4) часть объема занимает жидкий

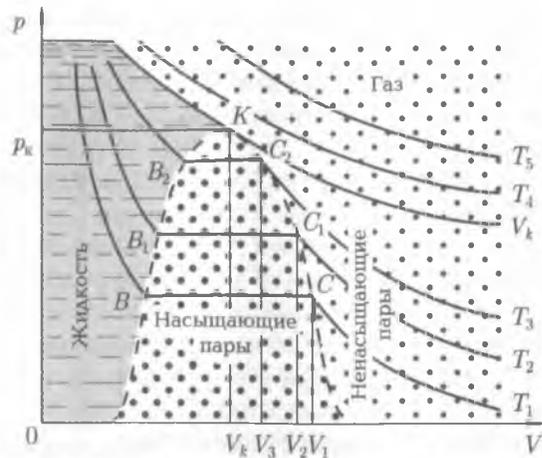


Рис. 6.3

эфир, а другую часть — его насыщенный пар (рис. 6.5, а). Нагревая ампулу с эфиром, замечаем, что объем, занимаемый жидкостью, увеличивается (рис. 6.5, б), несмотря на то, что плотность и давление насыщенного пара с повышением температуры возрастают. В конце концов граница между жидкостью и паром исчезает и в ампуле образуется туман (рис. 6.5, в). При дальнейшем нагревании ампула становится прозрачной (рис. 6.5, г), что указывает на полное отсутствие в ней жидкой фазы эфира.

Весь процесс представлен графически на рис. 6.6. Верхняя часть кривой показывает, как с повышением температуры уменьшается плотность жидкости, а нижняя — как при этом растет плотность пара.

**Критическая температура.** Температуру  $T_k$ , при которой плотность жидкости равна плотности ее насыщенного пара (точка  $K$  на рис. 6.6), называют *критической температурой*. Критической температуре соответствуют критическое давление, а также критическая плотность. Например, для воды  $T_k = 647$  К,  $p_k = 22,1$  МПа,  $\rho_k = 329$  кг/м<sup>3</sup>.

**Сжижение газов.** При температуре выше критической вещество может находиться только в состоянии газа, который изотермически нельзя превратить в жидкость ни при каком давлении. Основные компоненты земной атмосферы (азот и кислород) называют газами, а не парами, так как их критические температуры значительно ниже температуры воздуха в земных условиях (у азота  $T_k = 126$  К, у кислорода  $T_k = 154$  К).

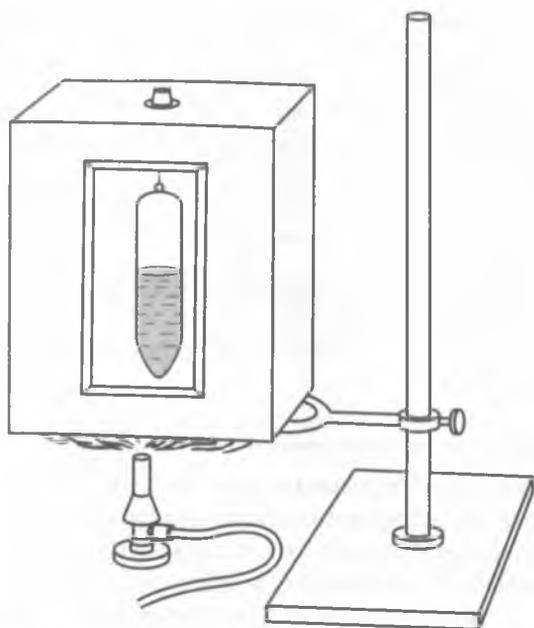


Рис. 6.4

Чтобы перевести какое-либо вещество, например азот, из газообразного состояния в жидкое, необходимо предварительно охладить его до температуры ниже критической, т. е. выделить пары азота. Только затем, сжимая эти пары, можно получить жидкий азот.

Вошедший в практику термин «сжижение газов» не совсем точно отражает сущность процесса, но он сложился исторически и к нему привыкли.

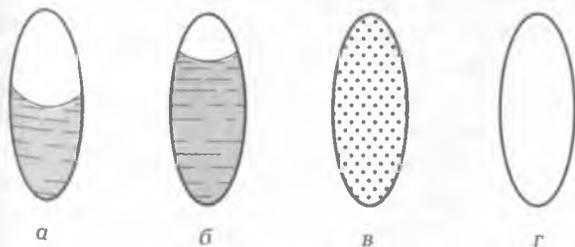


Рис. 6.5

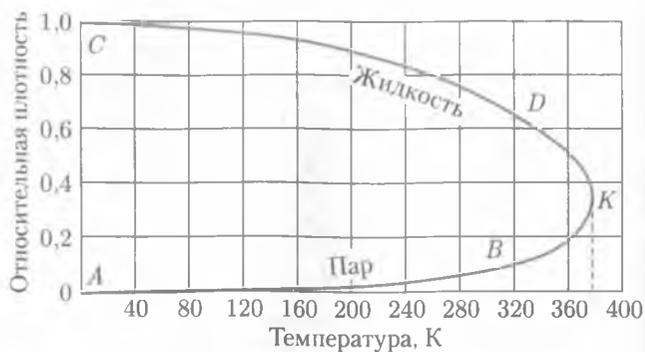


Рис. 6.6

**Внутренняя энергия реального газа.** В отличие от идеальных газов, где отсутствует межмолекулярное взаимодействие и внутренняя энергия представляет собой лишь кинетическую энергию движения молекул, зависящую от температуры и не зависящую от занимаемого газом объема, в реальных газах межмолекулярное взаимодействие играет существенную роль. Поэтому внутренняя энергия реального газа определяется суммой потенциальной энергии взаимодействия молекул и кинетической энергии их движения.

*Внутренняя энергия реального газа зависит как от температуры, так и от объема.*

Рассмотрим расширение реального газа в пустоту. В этом случае внешнее давление равно нулю, поэтому работы против внешних сил газ не совершает. Но в реальном газе действуют силы межмолекулярного взаимодействия, и при расширении газа совершается работа по преодолению этих сил за счет внутренней энергии газа. Вследствие этого температура реального газа при расширении в пустоту должна понижаться.

Однако это не совсем так, иногда может происходить и повышение температуры. Реальный газ при расширении охлаждается в том случае, когда преобладает действие сил притяжения между молекулами газа. Тогда молекулы газа совершают работу против сил притяжения за счет своей кинетической энергии, вследствие чего кинетическая энергия уменьшается, т. е. температура понижается. Если преобладает действие сил отталкивания между молекулами газа, то при расширении скорость молекул не уменьшается, а увеличивается, т. е. температура возрастает.

Таким образом, в зависимости от преобладания между молекулами сил притяжения или отталкивания при расширении газа в пустоту он или охлаждается, или нагревается. Изменение внутренней энергии реального газа при расширении положено в основу принципа действия машины для сжижения газов.

### 6.3. Жидкое состояние

**Общая характеристика жидкого состояния.** В жидкости молекулы находятся значительно ближе друг к другу, чем в газе, поэтому молекулярные силы играют очень важную роль в поведении жидкости.

Пусть в открытом сосуде имеется некоторое количество жидкости. Рассмотрим действие молекулярных сил внутри жидкости и в ее поверхностном слое (рис. 6.7). На молекулу, находящуюся внутри жидкости, молекулярные силы действуют по всевозможным направлениям и компенсируют друг друга. Их равнодействующая равна нулю. На молекулу, находящуюся в поверхностном слое, молекулярные силы действуют не по всем направлениям. В этом случае равнодействующая  $F_p$  молекулярных сил не равна нулю; она направлена внутрь жидкости. В результате жидкость стремится как бы сжаться, т.е. принять форму, соответствующую наименьшей площади ее поверхности при данном объеме. Такой формой является форма шара.

Шарообразную форму жидкость может сохранять лишь в условиях невесомости, например в кабине космического корабля, совершающего орбитальный полет. В таких условиях жидкость из со-

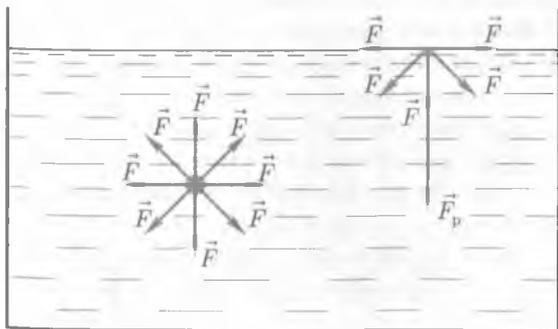


Рис. 6.7

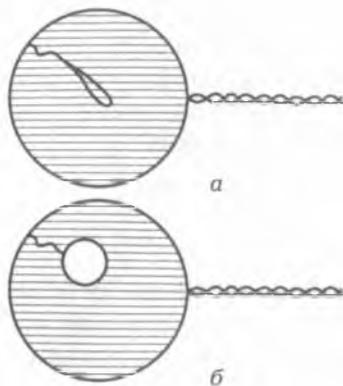


Рис. 6.8

суда не вытекает. Если же ее вытравить оттуда, она повиснет в воздухе в виде шариков правильной формы. В земных условиях весомости жидкость растекается по поверхности твердых тел. Только в малых количествах она способна сохранять овальную форму, близкую к шарообразной (например, в виде капель росы).

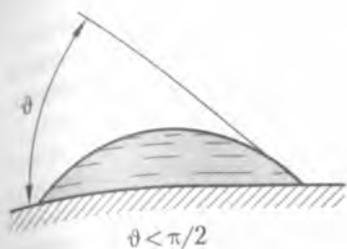
**Поверхностное натяжение.** Молекулярные силы, действующие вдоль поверхностного слоя жидкости, создают ее **поверхностное натяжение**. В наличии поверхностного натяжения жидкости можно убедиться на простом опыте. Проволочное колечко опускают в мыльную воду. Если вынуть колечко из этого раствора, то оно окажется затянутым мыльной пленкой. На мыльную пленку аккуратно кладут связанную концами нитку (рис. 6.8, а). Проколов пленку внутри контура нитки, можно видеть, что нитка натянулась и приняла форму окружности (рис. 6.8, б). Сила, растягивающая нитку, является силой поверхностного натяжения. *Отношение силы поверхностного натяжения к длине границы поверхностного слоя жидкости называют поверхностным натяжением (коэффициентом поверхностного натяжения) данной жидкости:*

$$\sigma = \frac{F_{\text{н}}}{l}. \quad (6.2)$$

Опыт показывает, что коэффициент поверхностного натяжения у разных жидкостей различен, но он во всех случаях уменьшается по мере повышения температуры жидкости.

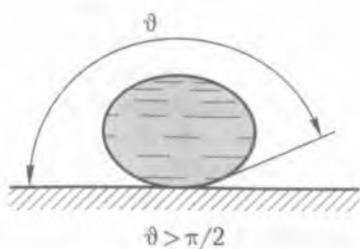
**Смачивание.** При соприкосновении жидкости с твердым телом наблюдаются два явления: либо смачивание, либо несмачивание. Если молекулярное взаимодействие между жидкостью и твердым телом больше, чем внутри жидкости, то наблюдается смачивание. В противном случае — несмачивание.

Например, вода хорошо смачивает дерево, вату, глину, хлопчатобумажные и шерстяные ткани, чистую поверхность стекла, но не смачивает смолу, парафин, воск, жир. Ртуть не смачивает ни дерево, ни вату, ни глину, но хорошо смачивает чистую поверхность металлов. О смачивании или несмачивании можно су



$$\vartheta < \pi/2$$

Рис. 6.9



$$\vartheta > \pi/2$$

Рис. 6.10

дить по виду капли на поверхности твердого тела. При смачивании капля растекается (рис. 6.9), а при несмачивании сохраняет свою овальную форму (рис. 6.10).

Проведем касательную к поверхности жидкости в точке ее соприкосновения с твердым телом. Угол, образованный этой касательной и поверхностью твердого тела, взятый в сторону жидкости, называют *краевым углом*  $\vartheta$ . При смачивании краевой угол острый, а при несмачивании — тупой. При полном смачивании его принимают равным нулю, а при полном несмачивании — равным  $\pi$ .

О смачивании или несмачивании можно также судить по виду мениска у края сосуда (*мениском* называют открытую поверхность жидкости). При смачивании мениск вогнутый, а при несмачивании — выпуклый.

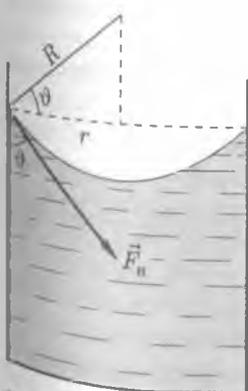


Рис. 6.11

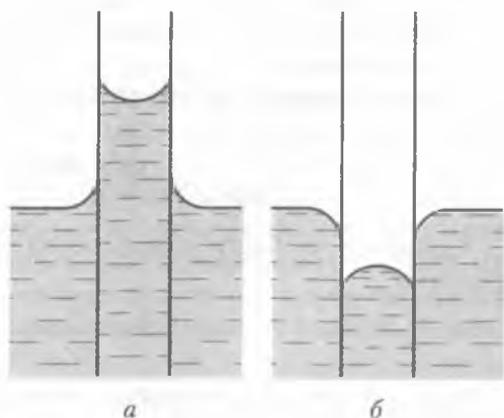


Рис. 6.12

Пусть смачивающая жидкость находится в цилиндрическом сосуде радиуса  $r$  (рис. 6.11). Силы молекулярного сцепления жидкости со стенками сосуда, действуя по всей границе поверхности этого слоя, создают добавочное давление на этот слой:

$$p_n = \frac{2\sigma\pi R}{\pi R^2} = \frac{2\sigma}{R}, \quad (6.3)$$

где  $\pi R^2$  — площадь открытой поверхности жидкости. Учитывая, что  $r = R \cos \vartheta$ , и произведя сокращения, получаем

$$p_n = \frac{2\sigma \cos \vartheta}{r}. \quad (6.4)$$

К этой формуле первым пришел французский ученый П. Лаплас, поэтому  $p_n$  принято называть *лапласовским давлением*.

**Капиллярность.** Благодаря лапласовскому давлению в очень узких трубках-капиллярах происходит либо подъем, либо опускание жидкости.

Возьмем сосуд с водой и опустим в воду узкую стеклянную трубку (рис. 6.12, а). Поскольку стекло смачивается водой и лапласовское давление направлено вверх, уровень воды в трубке окажется выше, чем в сосуде. Если же такую трубку опустить в сосуд с ртутью, которая не смачивает стекло, то уровень ртути в трубке окажется ниже, чем в сосуде (рис. 6.12, б).

Пусть смачивающая жидкость поднялась в капилляре на высоту  $h$ . Выясним, от чего зависит эта высота. Очевидно, что вес столбика поднявшейся жидкости компенсируется силой лапласовского давления. Поэтому

$$mg = \frac{2\sigma \cos \vartheta}{r} \pi r^2. \quad (6.5)$$

Выразим массу столбика жидкости через ее плотность и объем:

$$\rho g \pi r^2 h = \frac{2\sigma \cos \vartheta}{r} \pi r^2.$$

Сократив обе части уравнения на площадь сечения капилляра, получим

$$h = \frac{2\sigma}{\rho g} \cos \vartheta. \quad (6.6)$$

Высота столбика жидкости в капиллярной трубке пропорциональна коэффициенту поверхностного натяжения и обратно пропорциональна плотности жидкости и радиусу трубки.

Явления смачивания и капиллярности широко распространены в природе, используются в быту и технике. Приведем несколько примеров.

Так как дерево хорошо смачивается водой, влага из почвы по узким промежуткам между волокнами поднимается к его кроне.

Пчелы извлекают нектар из глубины цветка посредством капилляра, находящегося внутри пчелиного хоботка.

Перья водоплавающих птиц смазаны жиром и не смачиваются водой, поэтому водоплавающие птицы легко держатся на поверхности воды.

При медицинских анализах используется способность крови подниматься по узкой стеклянной трубочке из ранки на пальце.

Капиллярными свойствами обладает всякое пористое тело: фильтровальная бумага, губка, различные фитили, почва и т. д.

В результате пропитки ткани не смачивающимися водой веществами получают брезент. Он хорошо пропускает воздух, но не пропускает воду. Из брезента шьют плащи, чехлы, палатки.

Деревянные шпалы пропитывают смолой и дегтем, что предохраняет их от гниения и порчи. С этой же целью деревянные постройки (заборы, сараи, скамейки и т. д.) покрывают масляной краской, которая не смачивается водой.

Явления смачивания и несмачивания используют также при обогащении руды. Обогащением руды называют отделение от руды пустой породы. Сначала руду размалывают в мелкий порошок, а затем смешивают с водой и маслом. Получается пена, состоящая из пузырьков воздуха внутри масляной пленки. Кусочки пустой породы смачиваются водой и опускаются на дно, а кусочки ценного минерала прилипают к пленке и всплывают на поверхность.

**Вязкость.** Смачивание притормаживает хаотическое движение молекул жидкости, которые как бы прилипают на некоторое время к поверхности твердого тела. Это время называют *временем оседлой жизни молекул*. В течение оседлой жизни молекула совершает только колебательное движение около положения равновесия. Вокруг «остановившейся» молекулы начинают группироваться ближайшие молекулы жидкости, причем они занимают друг относительно друга такое положение, которое соответствует их наименьшей потенциальной энергии. В результате в малом объеме жидкости возникает кратковременный ближний порядок. В среднем он сохраняется всего  $10^{-9}$  с.

Время оседлой жизни молекул существенно зависит от температуры. Оно уменьшается при нагревании жидкости и увеличивается по мере ее охлаждения.

Время оседлой жизни молекул зависит также от *вязкости* жидкости. Такие жидкости, как глицерин, касторовое масло, мед, обладают большой вязкостью и большим временем оседлой жизни молекул. Кроме того, существует большая группа веществ, которые по признаку сохранения формы можно отнести к твердым телам, но по своему внутреннему строению они подобны жидкостям и обладают аномально большой вязкостью. Такие вещества называют *аморфными* (см. подразд. 6.5). К ним относятся стекло, пластмассы, различные смолы, каучук и т. д. При нагревании они постепенно смягчаются и, наконец, приобретают текучесть.

#### 6.4. Кристаллическое состояние

Твердое тело может существовать в двух различных состояниях — кристаллическом и аморфном.

Рассматривая кусок сахара и сахарный леденец, предварительно очистив его поверхность, можно заметить, что сахар имеет кристаллическое строение, а строение леденца характеризуется отсутствием периодичности в расположении атомов. Таким образом, одно и то же вещество (сахар) находится в разных состояниях: в первом случае в кристаллическом, во втором — в аморфном.

Характерный для внутреннего строения жидкости кратковременный ближний порядок охватывает всего два-три молекулярных слоя. Если же упорядоченное расположение молекул и атомов является устойчивым и распространяется на весь объем тела, то для характеристики его внутреннего строения используют термин «дальний порядок».

Дальний порядок служит основным признаком кристаллического тела. Тела, состоящие из одного кристалла, называют *монокристаллами*. К ним, например, относятся некоторые драгоценные камни, жемчужины, снежинки. Тела, состоящие из множества кристаллов, называют *поликристаллами*. Поликристаллическую структуру имеют металлы, сахар, гипс, лед и многие другие вещества. Молекулы и атомы в кристаллах расположены не хаотично, а в виде ячеек правильной геометрической формы. Такой форме соответствует пространственная решетка кристалла, именно дальний порядок.

Кристалл является *анизотропным*. Это значит, что его свойства неодинаковы по различным направлениям. Нанесем на гладкую поверхность гипса тонкий слой воска и коснемся его расколотой иглой. Вокруг иглы воск расплавится. При этом пятно рас-

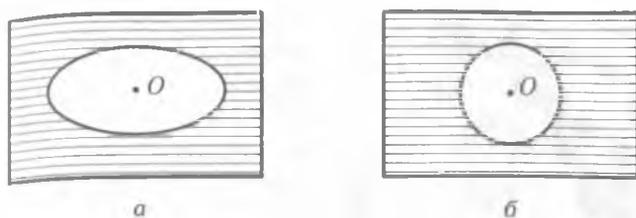


Рис. 6.13

плавленного воска примет форму эллипса (рис. 6.13, а). Отсюда можно заключить, что теплопроводность гипса вдоль большой оси эллипса оказалась более высокой, чем в других направлениях. Гипс анизотропен. Если такой же опыт проделать на поверхности стекла, то пятно расплавленного воска примет форму круга (рис. 6.13, б). Следовательно, теплопроводность стекла не зависит от направления. Стекло изотропно и является аморфным веществом. В его структуре отсутствует дальний порядок.

**Типы связей в кристаллах.** По характеру взаимодействия частиц, которые располагаются в узлах кристаллической решетки, различают четыре типа связей: молекулярную, ионную, атомную и металлическую.

**Молекулярная связь** осуществляется взаимодействием нейтральных молекул. Такая связь оказывается наиболее слабой. Кристаллы с молекулярной связью легко разрушаются и имеют сравнительно низкую температуру плавления. Примером вещества с молекулярной связью является обычный лед.

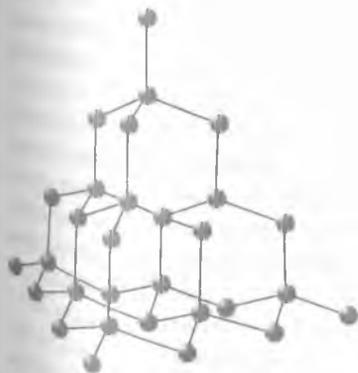


Рис. 6.14

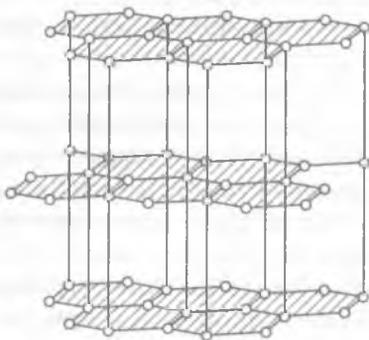
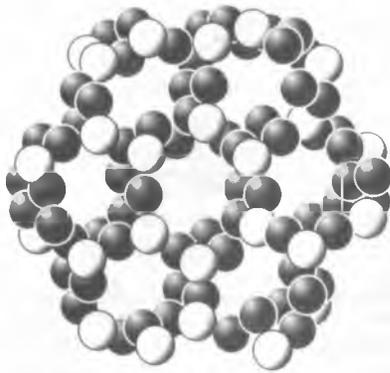


Рис. 6.15



● — атом Н    ○ — атом О

Рис. 6.16

Примером кристаллов *ионной связью* служат кристаллы поваренной соли. В решетке поваренной соли чередуются положительные ионы натрия с отрицательными ионами хлора. Этот тип связей обеспечивается притяжением разноименно заряженных ионов.

При *ковалентной связи* частиц в кристаллах атомы удерживаются в узлах кристаллической решетки путем обмена внешними электронами. Такая связь встречается в кристаллах сурьмы, селена, оксида кремния и ряда других веществ.

При наличии *металлической связи* внешние электроны обобществляются не только соседними ионами, но и всеми ионами кристаллической решетки. Отрицательный заряд электронного газа как бы цементирует положительно заряженные ионы в ее узлах.

**Виды кристаллических структур.** Ранее были описаны физические свойства алмаза и графита. Особенности каждой из этих модификаций углерода объясняются различием их кристаллических структур. У алмаза четыре атома располагаются в вершинах правильного тетраэдра, в центре которого находится пятый атом (рис. 6.14). Такая объемная решетка является очень прочной и устойчивой. У графита решетка плоская, слоистая (рис. 6.15), причем слои атомов слабо связаны между собой. Упаковка атомов в кристаллах алмаза значительно плотнее, чем в кристаллах графита.

В подавляющем большинстве случаев твердое состояние вещества плотнее жидкого. Если, например, в расплавленную сталь бросить кусок твердой стали, то он сразу же опустится на дно. Однако существует небольшая группа веществ (вода, чугун, висмут и кремний), плотность которых в кристаллическом состоянии меньше, чем в жидком. Такое anomальное свойство объясняется своеобразным строением их кристаллической решетки. Так, например, при кристаллизации воды формируется ажурная решетка с пустотами между колечками атомов (рис. 6.16). Как показали исследования, после плавления льда в воде еще

храняются элементы пространственной решетки. Они постепенно разрушаются при нагревании до  $+4^{\circ}\text{C}$ . Именно при этой температуре вода обладает наибольшей плотностью. Такое свойство воды играет исключительно важную роль в живой природе.

Поздней осенью в средних широтах поверхностный слой воды озер, рек и искусственных водоемов начинает интенсивно остывать. Охлажденная вода опускается ко дну, а на ее место поднимается еще не остывшая и менее плотная вода. Возникает конвекция. Она продолжается до тех пор, пока температура во всем объеме водоема не понизится до  $+4^{\circ}\text{C}$ . Затем конвекция прекращается. Верхний слой воды продолжает охлаждаться и наконец замерзает. Покрытый снегом лед обладает очень низкой теплопроводностью. Поэтому в придонном слое температура в течение всей зимы остается близкой к  $+4^{\circ}\text{C}$ , что сохраняет жизнь рыбам и другим обитателям водоема.

**Механические свойства твердых тел.** Исследование внутреннего строения твердых тел, их кристаллических структур имеет большое практическое значение. Оно позволяет создавать искусственные материалы, обладающие самыми разнообразными механическими свойствами.

Каждая деталь в конструкции машин и механизмов при их эксплуатации испытывает определенную нагрузку и должна обладать необходимой для этого прочностью. Прежде чем использовать тот или иной материал для серийного изготовления деталей, деталь-образец испытывают в лаборатории. В зависимости от назначения детали образец подвергают какому-либо виду деформации: растяжению, сжатию, кручению, сдвигу.

В одних случаях важно исследовать *упругость* материала, т. е. способность образца восстанавливать свою форму после прекращения действия силы. Упругостью, например, должны обладать пружины, рессоры, прокладки. При изготовлении различных инструментов (например, резцов, фрез, зубил) требуется повышенная *твердость* материала — его способность сохранять форму при больших нагрузках. Если образец представляет собой заготовку для штамповки, то он должен быть достаточно пластичным и сохранять полученную под прессом деформацию. Непластичный, хрупкий материал при штамповке разрушается.

Большинство деталей машин и механизмов изготавливают из упругих сортов стали. Образцы таких деталей подвергают возрастающим нагрузкам. При этом учитывают не абсолютную, а относительную деформацию

$$\epsilon = \Delta x / x. \quad (6.7)$$

Относительная деформация показывает, какую часть от первоначального размера образца составляет его абсолютная деформация.

Приложенная к телу сила  $F$  создает внутри тела напряжение  $\sigma$ . Пусть сила  $F$  равномерно действует на тело сечением  $S$  в перпендикулярном направлении. Тогда

$$\sigma = F/S. \quad (6.8)$$

Построим график зависимости относительной деформации  $\epsilon$  от напряжения  $\sigma$  (рис. 6.17). Предположим, что в качестве испытуемого образца взята цилиндрическая проволока, которая подвергается растяжению. Вначале удлинение пропорционально создаваемому напряжению. Область упругих деформаций характеризуется прямой  $0x_1$ . Напряжение  $\sigma_1$ , соответствующее точке  $x_1$ , называют *пределом пропорциональности*. При дальнейшем увеличении напряжения пропорциональность нарушается, но до точки  $x_2$  деформация остается еще упругой, и после снятия напряжения образец принимает прежнюю форму. При напряжении  $\sigma_2$  наступает *предел упругости*. Упругая деформация сменяется пластической, и относительное удлинение быстро нарастает. Наконец, за точкой  $x_3$  график становится параллельным оси абсцисс. Это область *текучести* материала. Относительная деформация увеличивается при постоянном напряжении, после чего происходит разрыв образца.

В области упругих деформаций справедлив закон Гука

$$\epsilon = k\sigma, \quad (6.9)$$

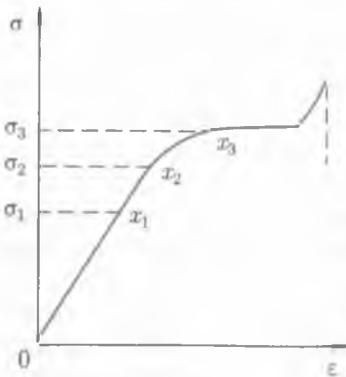


Рис. 6.17

где  $k$  — коэффициент упругости материала, из которого изготовлен образец.

**Тепловое расширение.** Механические свойства твердых тел существенно зависят от их температуры. Например, нагретая сталь приобретает ковкость, а резина при очень низкой температуре становится хрупкой.

При нагревании кристалла энергия тепловых колебаний атомов и молекул в узлах пространственной

решетки увеличивается. Но такие колебания не являются гармоническими. При сближении двух молекул или атомов силы отталкивания между ними возрастают быстрее, чем силы притяжения. Иначе говоря, при увеличении размаха колебаний частице «легче» удалиться от своей соседки, чем приблизиться к ней. В результате средние расстояния между молекулами и атомами в кристалле возрастают, и объем кристалла увеличивается. Такое явление называют *тепловым расширением*.

Для количественной оценки теплового расширения твердых тел экспериментально определяют *коэффициенты линейного  $\alpha$  и объемного  $\beta$  расширения*. Эти коэффициенты показывают относительное увеличение размеров тела, изготовленного из данного вещества, при нагревании на  $1^\circ\text{C}$ .

Пусть при  $0^\circ\text{C}$  длина некоторого тела была равна  $l_0$ , а после нагревания до температуры  $t$  она увеличилась и стала равной  $l$ . По определению имеем

$$\alpha = \frac{l - l_0}{l_0 t}, \quad (6.10)$$

откуда

$$l = l_0 (1 + \alpha t). \quad (6.11)$$

Коэффициент объемного расширения твердого тела можно выразить через коэффициент его линейного расширения:

$$\beta = 3\alpha.$$

Тогда объемное расширение тела будет

$$V = V_0 (1 + \beta t). \quad (6.12)$$

Приведем несколько примеров практического учета расширения твердых тел при нагревании.

Электрический питающий провод на железных дорогах жестко не закрепляют с обоих концов. Иначе в летнюю жару он будет сильно провисать, а в зимнюю стужу может разорваться. Один из его концов перекидывают через неподвижный блок и натягивают с помощью подвешенных к нему грузов (рис. 6.18).

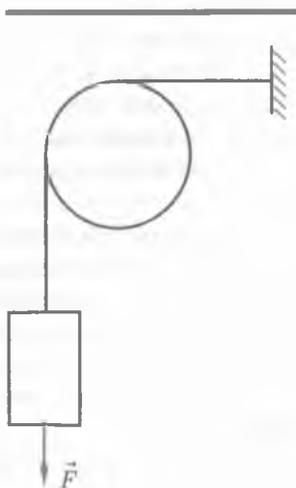


Рис. 6.18

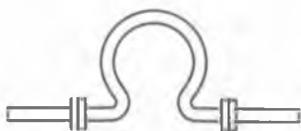


Рис. 6.19

Рельсы на железных дорогах не укладываются вплотную друг к другу, а в их стыках оставляют небольшие зазоры с учетом того, что в летнее время длина рельсов увеличивается, а зимой — сокращается.

Металлические паропроводы, а также трубы, по которым подается горячая вода, в нескольких местах изгибают в виде петель-компенсаторов (рис. 6.19).

При строительстве зданий подбирают материалы с одинаковым коэффициентом объемного расширения. В противном случае при изменении температуры в стенах возникают трещины и перекосы, что может привести все сооружение в аварийное состояние.

## 6.5. Аморфное состояние

Аморфное состояние характеризуется отсутствием дальнего порядка в расположении частиц, он сохраняется в расположении только соседних частиц. Повторяемости отдельных элементов структуры у аморфных тел не наблюдается. Твердые тела в аморфном состоянии можно отнести к жидкостям с большой вязкостью.

В аморфном состоянии в обычных условиях находятся стекло, обсидиан (природное стекло), вар, янтарь, гудрон, асфальт, каучук, фоль, различные клеи, большинство пластмасс.

Вещество может переходить из аморфного состояния в кристаллическое и обратно. Так, кристаллический сахар можно превратить в аморфный леденец, расплавив его и дав остыть. С течением времени на поверхности леденца образуются кристаллики сахара.

Аморфные тела, как и жидкости, текут, в них тонут тела с более высокой плотностью и всплывают тела с меньшей плотностью, только происходит это все очень медленно, в течение многих лет. Свойства жидкости у аморфных тел с течением времени становятся менее заметными, ближний порядок в строении аморфных тел сменяется дальним порядком. Это происходит потому, что время жизни квазикристаллических структур становится очень большим, объединяясь между собой, квазикристаллические структуры образуют обычные кристаллы, т.е. аморфное тело рано или поздно превратится в кристаллическое тело. Например,

аморфное тело — янтарь, с течением времени становится прозрачным т.е. кристаллизуется. Поэтому иногда аморфные тела называют твердыми жидкостями, т.е. они, обладая свойствами твердого тела, по своему молекулярному строению являются жидкостями.

Тепловые, механические, электрические и оптические свойства тел в аморфном состоянии отличаются от соответствующих свойств тел, находящихся в кристаллическом состоянии. Так, аморфные тела не имеют определенной температуры плавления — при повышении температуры они постепенно размягчаются, пока не превратятся в жидкости.

При кратковременных внешних воздействиях аморфные тела проявляют свойства твердых тел, в частности кусок вара при ударе раскалывается на части. При длительном внешнем воздействии проявляется такое свойство, как текучесть, присущее жидкостям. Так, твердые куски вара медленно растекаются по горизонтальной поверхности. Если поместить кусок вара в сосуд, то вар с течением времени примет форму сосуда. Эти свойства аморфного состояния твердого тела связаны с тем, что атомы и молекулы участвуют в тепловом движении: они совершают в течение некоторого времени колебания относительно положений равновесия, перескакивают из одного положения в другое.

Твердые тела, находящиеся в аморфном состоянии, в отличие от кристаллического, изотропны: их свойства одинаковы по всем направлениям.

## 6.6. Жидкие кристаллы

В 1889 г. австрийский биолог Р. Рейницер и немецкий физик О. Леман открыли удивительное промежуточное состояние вещества между кристаллами и жидкостью. Такое состояние, в котором вещество сочетает свойства жидкости и монокристалла, называют *жидкими кристаллами*.

Словосочетание «жидкий кристалл» вызывает определенное противоречие со стороны здравого смысла. Ведь кристалл — это твердое тело, в котором частицы (атомы, молекулы) расположены в строгом порядке, лишь слегка нарушаемом дефектами. Напротив, в жидкости никакого порядка в расположении атомов нет. Кристаллические тела сохраняют свою форму и не текут. Жидкости, наоборот, принимают форму сосуда, в котором находятся, и обладают свойством текучести. Кристаллы анизотропны,

т.е. их физические свойства зависят от направления внутри кристалла, жидкости же изотропны (физические свойства жидкости одинаковы по всем направлениям). Поэтому словосочетание «жидкий кристалл» может показаться таким же нелепым, как «горячий лед».

И все же жидкие кристаллы в природе существуют. Их довольно много — несколько тысяч. Все они представляют собой органические (т.е. углеродосодержащие) вещества со сложным химическим составом. Их молекулы содержат очень большое число атомов, относительная молекулярная масса этих веществ много больше 100. И самое главное — молекулы веществ, способных стать жидкими кристаллами, имеют, как правило, сильно вытянутую форму. Их длина часто в 8—10 раз больше их поперечных размеров, хотя сами размеры молекул, конечно, очень малы. Например, при длине  $4 \cdot 10^{-9}$  м поперечное сечение молекулы может составлять  $5 \cdot 10^{-10}$  м.

Не каждое вещество, имеющее молекулы удлинённой формы, может быть жидким кристаллом. В среднем на каждые 200 сложных органических соединений приходится одно, способное к образованию жидких кристаллов.

Как возникает жидкокристаллическое состояние вещества? Это легче всего понять на примере опыта, проведенного Р. Рейницером. Он нагревал твердое кристаллическое органическое вещество холестерилбензоат, которое плавится при температуре  $145^\circ\text{C}$  и превращается в мутную жидкость. При дальнейшем нагревании при температуре  $179^\circ\text{C}$  эта жидкость внезапно становится прозрачной. Оказывается, мутная жидкость, существующая в интервале температур от  $145$  до  $179^\circ\text{C}$ , и есть жидкий кристалл. По своим свойствам это жидкость: она течет, принимает форму сосуда, образует капли, но не сферической, а вытянутой формы. Молекулы в этой жидкости расположены в определенном порядке, следовательно, она должна иметь и действительно имеет свойства кристалла. Но при температуре  $179^\circ\text{C}$  порядок исчезает, исчезают и свойства кристалла. При этой температуре происходит как бы второе плавление: «плавится» жидкий кристалл, превращаясь в обычную жидкость.

Так же ведут себя и другие вещества, в которых наблюдается жидкокристаллическое состояние. Для каждого из них имеется определенный интервал температур, в пределах которого вещество одновременно является и жидкостью, и кристаллом.

**Типы жидких кристаллов.** Существует три типа жидких кристаллов с различным порядком расположения молекул. В зависи



Рис. 6.20

мости от внутреннего строения жидкие кристаллы разделяют на *нематические, смектические и холестерические*.

Жидкие кристаллы, в которых центры молекул расположены хаотично, но продольные оси заметно параллельны, называются *нематическими* (от греч. *fematos* — нить) (рис. 6.20, а).

Жидкие кристаллы, в которых молекулы, кроме одинаково ориентированного продольно-осевого расположения (рис. 6.20, б), образуют правильно чередующиеся слои, называются *смектическими* (от греч. *smegma* — мыло). На рисунке молекулы схематически изображены в виде палочек (хотя форма их значительно сложнее).

Наиболее сложно устроены *холестерики* (от греч. *chole* — желчь и *stereos* — твердый). Порядок расположения в них похож на нематический, но молекулы холестерика отличаются от молекул нематика тем, что имеют на своем конце отросток из одного или нескольких атомов, торчащий сбоку. Из-за него «укладка» молекул по длине сопровождается закручиванием структуры вокруг оси, перпендикулярной продольным осям молекул.

В отличие от обычных кристаллов, где дальний порядок трехмерный, в жидких кристаллах он существует лишь в одном направлении. Опыт показывает, что электрические, магнитные, оптические и другие свойства жидких кристаллов различны в разных направлениях. Особенно интересно, что оптические свойства жидких кристаллов можно изменять воздействием на него электрических и магнитных полей, изменением температуры, давления и т. д.

**Применение жидких кристаллов.** Жидкие кристаллы имеют широкое практическое применение. Например, зависимость цвета жидких кристаллов от температуры используют для измерения температуры. Из смесей жидкокристаллических веществ изготавливают температурные индикаторы для интервала температур от  $-20$  до  $+250$  °С. Индикатор представляет собой тонкую гибкую пленку из жидкого кристалла. При наложении пленки на поверхность предмета по цвету индикатора определяют температуру предмета и ее изменение со временем.

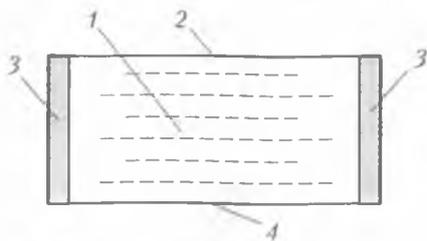


Рис. 6.21

У некоторых жидких кристаллов цвет настолько сильно зависит от температуры, что изменение температуры всего на сотую градуса можно заметить невооруженным глазом.

На практике используются очень тонкие слои жидкого кристалла 1 (рис. 6.21), заключенные между пленкой-поляризатором 2 и пленкой-отражателем 4, разделенных изолирующими прокладками 3. Под действием электрического поля в жидком кристалле поворачивается плоскость поляризации света, что делает ячейку непрозрачной. Ячейки такого типа используются в устройствах индикации информации. Сотни таких ячеек образуют циферблат электронных часов. Они используются в калькуляторах, цифровых и измерительных приборах, устройствах автоматики, мониторах переносных компьютеров типа Notebook, телевизоров и др.

Следует также отметить применение жидких кристаллов в качестве моющих средств. Дело в том, что растворенное в воде мыло представляет собой жидкокристаллическую систему. Оно образует множество двойных слоев молекул мыла, разделенных слоями воды. Наличие мыла в воде приводит к тому, что раствор мыла, смачивая загрязненные места, обволакивает частицы грязи мыльной пленкой. Таким образом, частицы грязи и очищаемая поверхность покрываются слоями жидких кристаллов, которые легко скользят один по другому, и при небольшом механическом воздействии частички грязи отделяются и переводятся в раствор.

В дальнейшем практическое применение жидких кристаллов будет еще более широким и нестандартным.

Отметим, что основным сырьем для изготовления жидких кристаллов являются отходы мясокомбинатов и других предприятий пищевой промышленности.

**Жидкие кристаллы в организме человека.** Жидкие кристаллы (холестерики) играют большую роль в жизнедеятельности организма человека. Так, белок, входящий в состав мышечной ткани,

обладает способностью образовывать жидкие кристаллы холестерина. Гладкие и поперечно-полосатые мышечные волокна имеют структуру жидкого кристалла, благодаря чему могут растягиваться и сжиматься не разрушаясь. Вещество коллаген, содержащееся в опорных тканях (кости, сухожилия) и в мозге, также близко по структуре к жидким кристаллам. Мозг человека по своей природе представляет сложную жидкокристаллическую систему. В белом веществе мозга и проводящих путях нервной системы жидкие кристаллы играют роль диэлектриков.

Чрезмерное содержание холестерина в крови человека приводит к образованию бляшек, которые (из-за особенностей своего строения) прилипают к стенкам кровеносных сосудов, что приводит к сужению сосудов, нарушению кровоснабжения мозга кислородом и развитию атеросклероза.

## ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ВЫВОДЫ

1. Часть термодинамической системы, в которой вещество однородно по своим физическим свойствам, называют фазой состояния данного вещества.

2. Между гидросферой и атмосферой Земли происходит непрерывный обмен веществом (круговорот воды) и энергией, которая поглощается при испарении воды и выделяется при конденсации пара. В результате в земной атмосфере всегда содержится водяной пар.

3. Массу водяного пара, содержащегося в  $1 \text{ м}^3$  воздуха, называют его абсолютной влажностью  $\rho$ . Относительная влажность воздуха вычисляется по формуле

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

где  $\rho_0$  — плотность насыщенного пара при данной температуре.

4. Температуру, при которой плотность жидкости становится равной плотности ее насыщенного пара, называют критической. При температуре выше критической вещество переходит в состояние газа.

5. Парообразование, происходящее во всем объеме жидкости, называют кипением. Жидкость закипает при той температуре, при которой давление ее насыщенного пара становится равным внешнему давлению. На Луне при отсутствии атмосферного дав-

ления жидкость закипает при любой температуре. Поэтому на поверхности Луны вещество находится только в твердом состоянии.

6. При давлении, близком к атмосферному, среднее расстояние между молекулами жидкости значительно меньше, чем между молекулами газа. Молекулярное взаимодействие проявляется во многих свойствах жидкости, в частности в ее поверхностном натяжении. Поверхностное натяжение жидкости равно отношению силы поверхностного натяжения к длине поверхностного слоя жидкости:

$$\sigma = F_n/l.$$

7. При соприкосновении жидкости с твердым телом наблюдаются два явления: либо смачивание, либо несмачивание, которые играют большую роль в живой природе, используются в быту и технике. В узких трубках поверхность жидкости принимает либо вогнутую (при смачивании), либо выпуклую (при несмачивании) форму. Под изогнутой поверхностью жидкости создается избыточное (лапласовское) давление

$$p_n = 2\sigma/R,$$

где  $R$  — радиус кривизны изогнутой поверхности жидкости.

Из-за смачивания происходит подъем жидкости по узким трубкам-капиллярам. Такое явление называют капиллярностью.

8. Для внутреннего строения жидкости характерен ближний порядок — кратковременное упорядоченное расположение молекул и нескольких молекулярных слоев, образующих псевдокристалл. Время оседлой жизни молекул в псевдокристаллах увеличивается по мере понижения температуры жидкости. В процессе отвердевания вещества псевдокристаллы переходят в устойчивые образования — кристаллы.

9. Кристаллы представляют собой анизотропную среду, в которой механическая прочность, теплопроводность и другие физические свойства зависят от направления. Атомы и молекулы в кристаллах образуют упорядоченную периодическую структуру — пространственную решетку. Наличие пространственной решетки в твердом теле характеризуют как дальний порядок в его атомно-молекулярном строении. В процессе плавления вся подводимая к телу теплота расходуется на разрушение его кристаллической решетки. При этом температура тела остается постоянной в равной точке плавления его вещества.



## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ

1. В каких трех агрегатных состояниях может находиться вода?
2. При каких условиях между процессами испарения и конденсации устанавливается динамическое равновесие?
3. Какой пар называют насыщенным?
4. Что характеризует абсолютная влажность воздуха?
5. Запишите формулу для определения относительной влажности воздуха.
6. Какие приборы позволяют определять влажность воздуха?
7. Опишите физическую картину процесса кипения.
8. Дайте характеристику жидкого состояния вещества. Какие явления свойственны жидкостям?
9. Какие типы связей в кристаллах вам известны?
10. Какое состояние тела называют аморфным?
11. Что такое «жидкие кристаллы»? Где их применяют?
12. Почему при испарении жидкости ее температура понижается?
13. Подсчитайте парциальное давление кислорода, содержащегося в воздухе на уровне моря.

*Указание:* в смеси газов парциальным давлением называют давление каждого газа в отдельности. Парциальное давление соответствует процентному содержанию данного газа в смеси.

14. Какова концентрация молекул в стратосфере на высоте 30 км, если давление на этой высоте  $10^4$  Па, а температура равна  $-20^\circ\text{C}$ ?

*Ответ:*  $n = 2,9 \cdot 10^{23} \text{ м}^{-3}$ .

15. Днем при температуре  $25^\circ\text{C}$  относительная влажность воздуха 75%. Выпадет ли ночью роса, если температура понизится до  $17^\circ\text{C}$ ?
16. Может ли замерзнуть кипящая вода?
17. В чайнике кипятили воду, взятую при  $10^\circ\text{C}$ . Когда чайник сняли с плиты, в нем оказалось  $\frac{4}{5}$  первоначального количества воды. На что было израсходовано больше теплоты: на нагревание воды до точки кипения или на парообразование? Во сколько раз?

*Ответ:*  $\sim 5$  раз.

18. Капиллярная трубка внутренним диаметром 3 мм частично погружена в воду и находится в вертикальном положении. Опре-

делите высоту столбика воды в трубке над уровнем воды в сосуде. Температура воды  $20^{\circ}\text{C}$ . Смачивание считать полным.

Ответ:  $h = 1 \text{ см}$

19. При отсутствии смазки и охлаждения двигателя внутреннего сгорания возможно «заклинивание» поршня в цилиндре. Объясните это явление.
20. Почему обычно металл не дает трещин при резких колебаниях температуры, а камень при тех же условиях дает трещины?
21. Действовал бы термометр, если бы жидкость в нем имела такой же коэффициент теплового расширения, как и стекло?
22. Почему не рекомендуется есть очень горячую или очень холодную пищу?



Раздел III

**ОСНОВЫ  
ЭЛЕКТРОДИНАМИКИ**

### 7.1. Электрический заряд

*Электростатика* — раздел электродинамики, в котором изучаются взаимодействия и свойства электрических зарядов, неподвижных относительно выбранной для их исследования инерциальной системы отсчета.

Фундаментальным понятием в электродинамике является электрический заряд.

*Электрический заряд* — скалярная физическая величина, характеризующая свойство некоторых частиц или тел вступать при определенных условиях в электромагнитное взаимодействие и определяющая значения сил и энергий при этих взаимодействиях.

Экспериментальным путем было установлено, что заряды обладают следующими основными свойствами.

1. Фундаментальным свойством электрического заряда является его существование в двух видах — в виде положительных и отрицательных зарядов. В окружающем нас мире количество этих зарядов одинаково. Между положительными и отрицательными зарядами нет никаких внутренних различий (наши наблюдения несколько не изменятся, если все положительные и отрицательные заряды поменять местами).

Частица, обладающая наименьшим отрицательным зарядом, называется *электроном* ( $e = -1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл,  $m_e = 9,1 \cdot 10^{-31}$  кг). Он является эталоном отрицательного элементарного заряда. Отметим, что до сих пор не обнаружены электрические заряды, меньшие заряда электрона, а также частицы вещества с массой, меньшей массы электрона. Экспериментов, которые позволили бы определить размеры или форму электрона, пока не существует.

В настоящее время известен *позитрон* (*антиэлектрон*), т. е. частица, имеющая такой же заряд по величине, как и заряд электрона, но противоположный ему по знаку. Время существования позитрона очень мало (порядка  $10^{-7}$  с), поэтому он не может служить эталоном элементарного положительного заряда.

Устойчивая частица, имеющая наименьший положительный заряд, называется *протоном* ( $e_p = 1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл,  $m_p = 1,67 \cdot 10^{-27}$  кг).

Протон и электрон входят в состав всех атомов и молекул. Электрический заряд протона и электрона называется *элементарным зарядом*.

Электрические заряды находятся в состоянии непрерывного движения, в природе не существует неподвижных зарядов. Рассматриваемые в электростатике неподвижные заряды есть результат макроскопического усреднения: если векторная сумма скоростей всех зарядов в рассматриваемой системе отсчета равна нулю, то такой заряд проявляет себя в этой системе как неподвижный. Заряд, неподвижный в одной системе отсчета, уже не является таковым в другой системе отсчета, движущейся относительно первой. Следует помнить, что когда говорят о движении или перераспределении зарядов, о силах, действующих на заряды, то имеют в виду, что двигаться, перераспределяться, испытывать действие сил могут, конечно, носители электрических зарядов — какие-то заряженные частицы или тела. Электрический заряд неотделим от частицы, которой он принадлежит. Заряженная элементарная частица не может «отдать» заряд, так же как она не может «потерять» массу. Другими словами, «зарядить» элементарную частицу, т. е. изменить ее заряд, нельзя — мы просто получим при этом другую частицу.

2. Электрический заряд частицы или тела не зависит от выбора инерциальной системы отсчета, в которой он измеряется. Он не изменяется при движении носителя заряда. Например, в каких бы движениях электрон не участвовал, его заряд всегда остается одним и тем же.

3. Электрический заряд аддитивен: заряд любой системы всегда равен сумме зарядов составляющих систему частиц. Например, заряд иона равен сумме зарядов ядра атома и тех его электронов, которые сохранились после ионизации атома.

4. Все электрические заряды кратны элементарному. Поскольку всякий заряд  $q$  образуется совокупностью элементарных зарядов, его значение определяется целым числом, кратным  $e$ :

$$q = \pm ne, \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (7.1)$$

Если физическая величина может принимать только определенные значения, говорят, что эта величина *квантуется*. Выражение (7.1) означает, что электрический заряд квантуется. Однако элементарный заряд настолько мал, что возможную величину макроскопических зарядов можно считать изменяющейся непрерывно.

5. Фундаментальным свойством является

**закон сохранения электрических зарядов: электрические заряды не создаются и не исчезают, они могут лишь переходить от одного тела к другому (электризация трением) или перемещаться внутри тела.**

Математически закон сохранения электрических зарядов обычно записывают так:

$$q_1 + q_2 + q_3 + \dots + q_n = \text{const.} \quad (7.2)$$

По этому закону алгебраическая сумма электрических зарядов в изолированной системе сохраняется постоянной.

Перечисленные свойства являются фундаментальными законами. Они не выводятся из каких-либо других законов. Не обнаружено ни одного факта, противоречащего этим свойствам.

**Закон Кулона** определяет силу взаимодействия между двумя неподвижными или медленно движущимися друг относительно друга (т.е. со скоростями, ничтожно малыми по сравнению со скоростью света в вакууме) заряженными частицами.

Закон был установлен экспериментально в 1785 г. французским инженером Ш. Кулоном с помощью изготовленных им крутильных весов. Приблизительно за 11 лет до этого данный закон был получен известным английским физиком Г. Кавендишем (1731 – 1810). Но результаты исследований Кавендиша не были опубликованы и оставались неизвестными в течение более 100 лет. Д. К. Максвелл — первый директор Кавендишской лаборатории — обнаружил в архиве этой лаборатории подготовленную к печати рукопись гениального исследования Кавендиша и опубликовал ее в 1879 г.

Обобщив результаты своих опытов, Кулон вывел следующую зависимость:

$$F = k_1 \frac{q_1 q_2}{r^2}, \quad (7.3)$$

где  $k_1$  — коэффициент пропорциональности;  $q_1$  и  $q_2$  — величины взаимодействующих зарядов;  $r$  — расстояние между зарядами.

Закон Кулона, записанный в форме (7.3), справедлив только для взаимодействия неподвижных точечных электрических зарядов. Требование неподвижности зарядов необходимо в данном случае для того, чтобы не рассматривать вопрос о магнитных взаимодействиях, возникающих при движении зарядов. Например, при взаимодействии электронов и ядер в атомах основную роль играют именно кулоновские силы. Магнитное взаимодействие существенной роли не играет.

Область применимости закона Кулона простирается от расстояний порядка нескольких километров до  $10^{-15}$  м. Для очень больших расстояний экспериментальных подтверждений нет (опыты трудно осуществить), но нет также причин сомневаться, что этот закон выполняется и при очень больших расстояниях между зарядами.

Из формулы (7.3) видно, что нельзя переходить к пределу при  $r \rightarrow 0$ , так как в этом случае получили бы  $F \rightarrow \infty$  (в природе бесконечно больших сил не существует). В этой формуле  $r$  есть расстояние между точечными зарядами, а так как реальные носители зарядов всегда имеют линейные размеры, то понятно, что нельзя осуществить опыт, при котором центры взаимодействующих зарядов совпадали бы.

Закон Кулона предполагает, что заряды помещены в вакууме. Дальнейшие экспериментальные исследования показали, что при прочих равных условиях силы электрического взаимодействия между двумя точечными зарядами зависят от свойств среды, в которой эти заряды находятся. Следовательно, коэффициент пропорциональности  $k_1$  в законе Кулона (7.3) зависит не только от выбора единиц измерения величин, входящих в эту формулу. Он также зависит от свойств среды. Поэтому  $k_1$  удобно представить в виде отношения двух коэффициентов:

$$k_1 = \frac{K}{\varepsilon}, \quad (7.4)$$

где  $K$  — коэффициент, зависящий только от выбора системы единиц измерения;  $\varepsilon$  — безразмерная величина, характеризующая электрические свойства среды и называемая *диэлектрической проницаемостью среды*. Она не зависит от выбора единиц измерения и для вакуума (воздуха) равна единице.

Подставляя (7.4) в (7.3), получим

$$F = K \frac{q_1 q_2}{\varepsilon r^2}. \quad (7.5)$$

Если заряды  $q_1$  и  $q_2$  находятся в вакууме ( $\epsilon = 1$ ) на том же расстоянии  $r$  друг от друга, то сила взаимодействия численно равна

$$F_0 = K \frac{q_1 q_2}{r^2}. \quad (7.6)$$

Из формул (7.5) и (7.6) следует, что

$$\epsilon = \frac{F_0}{F}. \quad (7.7)$$

Таким образом,  $\epsilon$  показывает, во сколько раз сила взаимодействия заряженных тел в вакууме больше силы взаимодействия этих тел в среде.

В СИ коэффициент пропорциональности для вакуума

$$K = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} = 9 \cdot 10^9 \text{ Н} \cdot \text{м}^2 / \text{Кл}^2,$$

где  $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Кл}^2 / (\text{Н} \cdot \text{м}^2) = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}$  — *электрическая постоянная* (ее значение зависит от выбора системы единиц). Таким образом, закон Кулона в наиболее общем виде записывается так:

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{\epsilon r^2}. \quad (7.8)$$

## 7.2. Свойства электрических полей и их силовые характеристики

Изучая закон всемирного тяготения, мы встречались с понятием гравитационного поля. Посредством этого поля происходит взаимодействие всех тел во Вселенной независимо от того, несут ли эти тела электрический заряд или являются электронейтральными. Помимо гравитационного взаимодействия, между заряженными телами возникает взаимодействие, осуществляемое посредством электрического поля.

*Электрическое поле представляет собой особый вид материи, связанный с электрическими зарядами, посредством которого передаются действия зарядов друг на друга.*

Электрическое поле, как и гравитационное, не имеет какого-либо вещественного строения, но оно так же материально, как и вещество. Электрические заряды связаны с частицами, определяющими

щими строение вещества, и в то же время каждый заряд возбуждает электрическое поле. Теснейшая связь вещества и полей проявляется во всех процессах и явлениях окружающей нас природы, во всем материальном мире.

**Напряженность электрического поля.** Поскольку электрическое поле действует только на электрические заряды, его исследуют с помощью пробного заряда, который условно считают положительным.

Внесем в произвольно выбранную точку электрического поля, создаваемого зарядом  $q$ , пробный заряд  $q_0$ , который много меньше  $q$ . Тогда на заряд  $q_0$  действует сила  $F$ . Отношение этой силы к пробному заряду называют **напряженностью  $E$  электрического поля** в данной точке:

$$E = F/q_0, \tag{7.9}$$

или в векторной форме

$$\vec{E} = \vec{F}/q_0.$$

Выясним, зависит ли напряженность от пробного заряда. Для этого воспользуемся формулой (7.8):

$$E = \frac{qq_0}{4\pi\epsilon_0\epsilon r^2} \frac{1}{q_0}.$$

откуда

$$E = \frac{q}{4\pi\epsilon_0\epsilon r^2}. \tag{7.10}$$

В формуле (7.10) пробный заряд  $q_0$  отсутствует, а это значит, что напряженность электрического поля не зависит от пробного заряда.

На основании определения (8.9) можно сказать, что *напряженность электрического поля есть силовая характеристика в данной точке*. Электрическое поле, напряженность которого в каждой точке постоянна по модулю и направлению, называется **однородным** ( $|\vec{E}| = \text{const}$ ).

**Линии напряженности (силовые линии).** Если изобразить векторы напряженности в разных точках поля, то можно получить картину, описывающую силовые свойства поля. В 30-х гг. XIX в. английский физик М. Фарадей предложил методику графического изображения электрических полей в виде неких силовых линий, называемых *линиями напряженности*. Силовые линии рас-

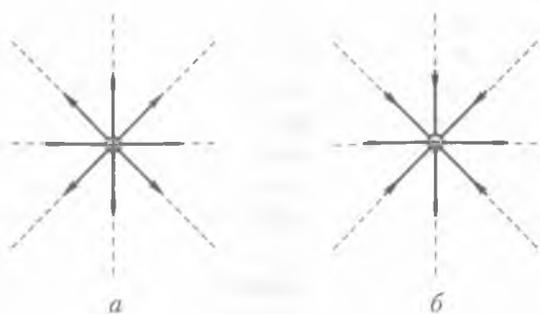


Рис. 7.1

полагаются таким образом, что касательные к ним в каждой точке пространства совпадают по направлению с вектором напряженности электрического поля.

Электрические поля точечных зарядов являются центрально-симметричными. Если точечный заряд положительный, то линии напряженности начинаются на заряде и уходят в бесконечность (рис. 7.1, а). Если заряд отрицательный, то линии напряженности начинаются в бесконечности и заканчиваются на отрицательном заряде (рис. 7.1, б).

Два равных по модулю, но противоположных по знаку заряда образуют *диполь*. В этом случае линии напряженности начинаются на положительном заряде и заканчиваются на отрицательном (рис. 7.2).

На рис. 7.3 показано поле двух одноименных зарядов. Силовые линии электрического поля не пересекаются в точке, где напряженность поля отлична от нуля, но могут пересекаться в точ-

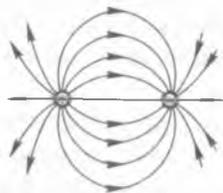


Рис. 7.2

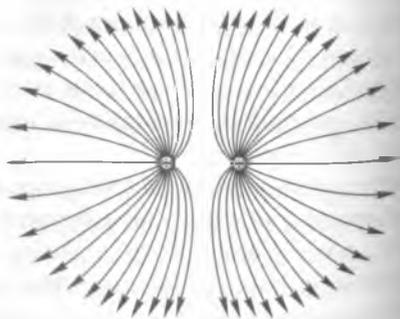


Рис. 7.3

ках, где напряженность поля равна нулю. Например, на рис. 7.4 показано поле, созданное двумя положительными зарядами. Здесь силовые линии пересекаются в точке 0, в которой напряженность поля равна нулю.

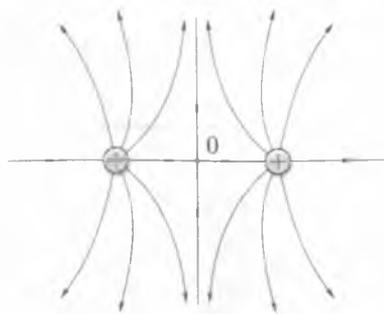


Рис. 7.4

Плотность (густота) линий напряженности характеризует напряженность поля. Вблизи зарядов эти линии сгущаются, и напряженность возрастает.

### Принцип суперпозиции полей.

Основная задача электростатики заключается в следующем: по заданному распределению в пространстве электрических зарядов и их значению найти значение и направление вектора напряженности  $\vec{E}$  в каждой точке поля.

Пусть поле создано системой неподвижных точечных зарядов  $q_1, q_2, q_3, \dots, q_n$ . Напомним рассмотренный в механике принцип действия сил: если на материальную точку действуют одновременно несколько сил, то каждая из этих сил сообщает материальной точке ускорение, определяемое вторым законом Ньютона так, как если бы других сил не было. На основании этого принципа результирующая сила  $\vec{F}$ , действующая со стороны исследуемого поля на пробный заряд  $q_0$ , равна векторной сумме сил  $\vec{F}_i$ , приложенных к нему со стороны каждого из зарядов  $q_i$ :

$$\vec{F} = \sum_{i=1}^n \vec{F}_i. \quad (7.11)$$

Согласно определению напряженности электрического поля

$$\vec{F} = q_0 \vec{E}; \quad \vec{F}_i = q_0 \vec{E}_i,$$

где  $\vec{E}$  — напряженность результирующего поля;  $\vec{E}_i$  — напряженность поля, создаваемого одним зарядом  $q_i$ . Подставляя эти значения сил в формулу (7.11) и сокращая на  $q_0$ , получим

$$\vec{E} = \sum_{i=1}^n \vec{E}_i. \quad (7.12)$$

**Принцип суперпозиции полей:** напряженность электрического поля точечных зарядов равна векторной сумме напряженностей полей, создаваемых каждым из этих зарядов в отдельности.

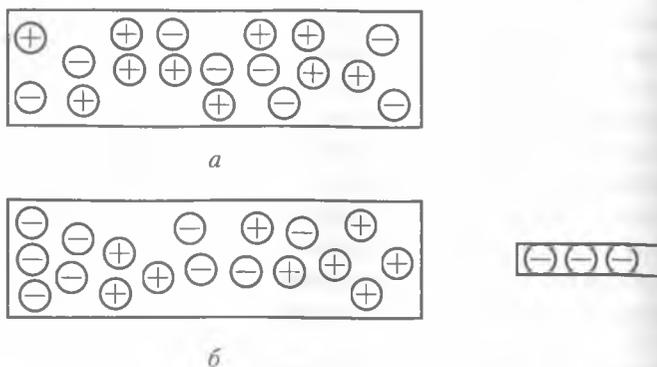


Рис. 7.5

Полученный результат часто называют *принципом независимости действия электрических полей*.

**Проводники и диэлектрики в электрическом поле.** Наэлектризуем эбонитовую палочку, потерев ее о мех, и поднесем к металлическому предмету. Предмет притянется к палочке.

Наэлектризуем стеклянную палочку, потерев ее о шелк, и снова поднесем к тому же предмету. И в этом случае предмет будет притягиваться к палочке. Почему? Дело в том, что в любом проводнике имеются свободные заряды, перемещение которых вызывает электризацию разных частей проводника.

В незаряженном металлическом проводнике (рис. 7.5, а) свободные отрицательные заряды (электроны) движутся хаотически между положительными (ионная решетка).

Если к проводнику поднести отрицательно заряженную эбонитовую палочку, то свободные электроны, перемещаясь, сосредоточатся на удаленном от эбонитовой палочки конце проводника (рис. 7.5, б).

Положительно заряженная правая сторона притянется к палочке. При поднесении к металлическому предмету положительно заряженной палочки электроны переместятся на участки металла, которые расположены близко к наэлектризованной палочке, и отрицательно заряженный участок (а следовательно, и весь предмет) притянется к палочке.

Рассмотрим более подробно случай внесения проводника в однородное электрическое поле (рис. 7.6). Внутри проводника под действием внешнего поля напряженностью  $\vec{E}$  начинается перемещение зарядов. После того как процесс установится, раз-

делившиеся заряды образуют поле, напряженность которого равна  $\vec{E}_1$ . Очевидно,  $\vec{E}_1 + \vec{E} = 0$ . Таким образом,

**внутри проводника напряженность электрического поля равна нулю.**

В отличие от проводников в диэлектриках свободных зарядов мало и они не могут перемещаться на значительные расстояния. Среди диэлектриков есть кристаллические и аморфные, жидкости и газы. Поведение диэлектриков во внешнем электрическом поле определяется их общим внутренним свойством: в диэлектриках нет свободных носителей заряда, которые под действием внешнего поля могли бы перемещаться внутри диэлектрика, и ни при каких условиях такие свободные заряды создать нельзя. К наиболее часто встречающимся у диэлектриков внутренним структурам относятся три вида, хотя этим разнообразие диэлектриков не исчерпывается.

Полярные диэлектрики. Множество тел в природе состоит из нейтральных молекул, каждая из которых представляет собой маленький диполь, т. е. положительные и отрицательные заряды, из которых составлена нейтральная молекула, располагаются на некотором расстоянии друг от друга (полярная связь). Тепловое движение молекул приводит к тому, что при отсутствии внешнего поля все молекулы ориентируются в пространстве произвольным образом, причем из-за хаотичности их движения все направления в пространстве равноправны и никакой преобладающей ориентации молекул не наблюдается (рис. 7.7, а).

Под действием внешнего электрического поля молекулы начинают постепенно поворачиваться в направлении силовых линий (рис. 7.7, б). Первыми ориентируются вдоль силовых линий поля те молекулы, которые были расположены по отношению к силовым линиям поля под наименьшим углом. С увеличением напряженности поля все большее число молекул поворачивается вдоль силовых линий поля. Процесс этот сопровождается появлением зарядов противоположного знака на концах диэлектрика, т. е. *поляризацией диэлектрика*. Эти появившиеся заряды невозможно удалить с тела, поскольку они не являются свободными. Они называются *связанными зарядами*. Связанные заряды создают внутри диэлектрика свое поле, направленное против внешнего.

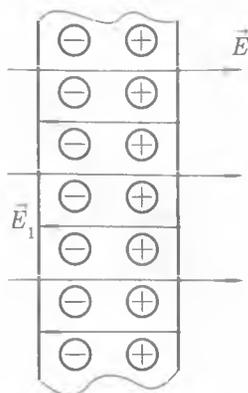


Рис. 7.6

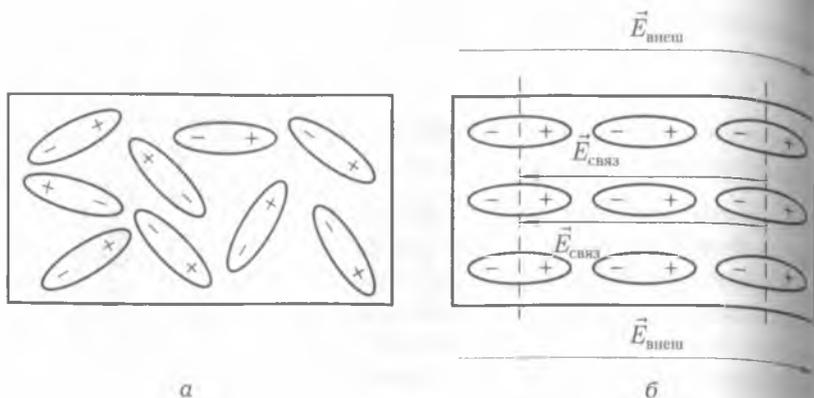


Рис. 7.7

В результате поле внутри диэлектрика всегда меньше, чем поле в вакууме, в определенное число раз. Это число называется *диэлектрической проницаемостью вещества*  $\epsilon$  и зависит от химического состава вещества и температуры тела, поскольку тепловое движение молекул препятствует их ориентации по полю.

**Неполярные диэлектрики.** Вторым достаточно распространенным типом диэлектриков являются диэлектрики, у которых центры положительного и отрицательного зарядов, распределенных внутри молекулы, совпадают (рис. 7.8, а). Это характерно, например, для веществ, состоящих из нейтральных атомов. Естественно, что тело, состоящее из нейтральных молекул, не способно проявить само по себе какие-либо электрические свойства. Однако если внести такое тело во внешнее электрическое поле, то с нейтральными молекулами начинается следующий процесс: под действием поля каждая молекула поляризуется, т. е. электрическое поле «растягивает» молекулу, смещая положительный и отрицательный заряды в противоположные стороны относительно друг друга (рис. 7.8, б). В результате каждая молекула становится полярной и растянутой вдоль силовых линий поля.

Повторив все рассуждения, приведенные для полярных диэлектриков, приходим к выводу о том, что на противоположных концах диэлектрика появляются связанные заряды (рис. 7.8, в) и что поле в веществе меньше поля в вакууме в определенное число раз. Это число равно значению диэлектрической проницаемости неполярного диэлектрика.

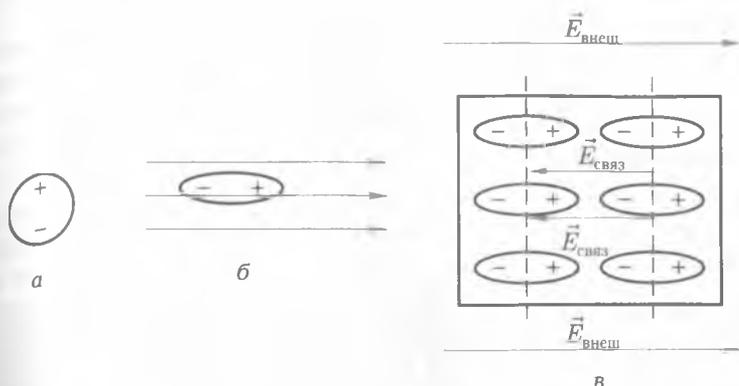


Рис. 7.8

**Кристаллические диэлектрики.** Среди большого разнообразия кристаллических диэлектриков, к которым относятся пьезоэлектрики, сегнетоэлектрики, имеющие весьма специфические свойства, рассмотрим наиболее типичный и распространенный вид кристаллов, у которых в узлах кристаллической решетки находятся положительные и отрицательные ионы. Если такой кристалл внести во внешнее электрическое поле, то ионы противоположных знаков смещаются под действием электрических сил в противоположных направлениях. Это приводит к появлению на противоположных сторонах тела связанных зарядов, которые, как и в двух предыдущих случаях, создают собственное поле, направленное против внешнего. И вновь поле внутри диэлектрика оказывается более слабым, чем в вакууме. Следовательно, каждый диэлектрик можно характеризовать величиной, называемой *диэлектрической проницаемостью*. Она показывает, во сколько раз поле в диэлектрике будет слабее, чем в вакууме.

### 7.3. Энергетическая характеристика электрического поля

Энергетической характеристикой электрического поля является потенциал или, точнее, разность потенциалов.

**Потенциал** — скалярная физическая величина, характеризующая способность поля совершать работу. Она измеряется от-

ношением потенциальной энергии пробного точечного заряда помещенного в данную точку поля, к значению этого заряда. Можно также сказать, что потенциал данной точки поля равен работе, совершаемой полем при перемещении единичного положительного заряда из этой точки поля в бесконечность:

$$\varphi = \frac{A}{q_0}. \quad (7.13)$$

На практике за нулевой потенциал обычно принимают потенциал Земли, а в теоретической физике за нулевой удобно принимать потенциал бесконечно удаленной точки пространства. В принципе выбор нулевого уровня для практических задач несущественен, так как совершенная полем работа зависит не от потенциальной энергии, а от разности энергетических уровней двух точек электрического поля. Поэтому вводят понятие разности потенциалов.

**Разность потенциалов численно равна работе сил поля, которая совершается при перемещении единичного положительного заряда из одной точки поля в другую:**

$$\Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1 = \frac{A}{q_0}. \quad (7.14)$$

Понятие разности потенциалов широко используют по двум основным причинам.

Во-первых, описание электрического поля с помощью потенциалов гораздо проще, чем при использовании напряженности поля. Напряженность поля есть вектор, и поэтому для каждой точки поля нужно знать три скалярные величины — составляющие напряженности по координатам. Потенциал же — скалярная величина, определяемая в каждой точке численным значением. Зная потенциал, можно найти и напряженность.

Во-вторых, разность потенциалов гораздо легче измерить на опыте, чем напряженность поля. Для измерения напряженности поля не существует удобных методов, тогда как для измерения разности потенциалов разработаны многочисленные методы и разнообразные приборы. Поэтому и описывать электрическое поле гораздо удобнее с помощью разности потенциалов.

Следует обратить особое внимание на тот факт, что потенциал (разность потенциалов) характеризует не энергию поля (плот-

ность энергии поля определяется с помощью  $E$ ), а потенциальную энергию заряда, помещенного в поле:

$$\varphi = E_n / q_0.$$

Кроме того, потенциал (разность потенциалов) — это не свойство проводника, как многие ошибочно считают, а характеристика того электростатического поля, которое существует при наличии проводника в точках, непосредственно примыкающих к проводнику. Например, потенциалом обладает и проводник, на котором вообще нет избыточного заряда, но находящийся во внешнем электрическом поле.

Для экспериментального определения потенциала (разности потенциалов) используют электрометр. При работе с электродами всегда следует задавать определенный потенциал корпуса электрометра (чаще всего заземляя его); без этого оценить показания прибора просто невозможно. Важно помнить, что электрометр всегда измеряет разность потенциалов. Измерителем заряда он может служить лишь при неизменной емкости системы, в которую он входит.

При измерениях корпус электрометра заземляют, для того чтобы корпус и окружающие его заряженные предметы, например стены физического кабинета, а также экспериментатор имели одинаковый потенциал (равный потенциалу Земли) и между ними не могли возникнуть электрические поля, действие которых на стрелку прибора исказило бы результат опыта.

Силовые поля, в которых работа не зависит от формы пути, называются *потенциальными (консервативными)*. Следовательно, не изменяющееся во времени электрическое (электростатическое) поле является потенциальным.

Работа по перемещению заряда из одной точки электростатического поля в другую равна изменению его потенциальной энергии, взятой с обратным знаком:

$$A = -(E_{2п} - E_{1п}). \quad (7.15)$$

Если заряд перемещается по замкнутой траектории, то изменения его потенциальной энергии не происходит:  $E_{2п} - E_{1п} = 0$ , тогда работа в электростатическом поле по замкнутой траектории равна нулю.

Из формулы (7.14) с учетом формулы (7.15) находим

$$A = q_0 (\varphi_1 - \varphi_2). \quad (7.16)$$

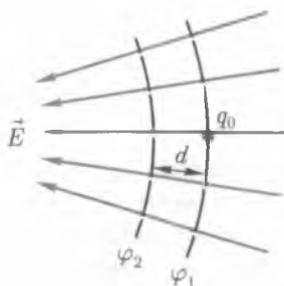


Рис. 7.9

Выражение в скобках называют разностью потенциалов или напряжением. Поэтому формула (7.16) принимает вид

$$A = q_0 U. \quad (7.17)$$

Поверхности, во всех точках которых потенциал принимает одно и то же значение, называют эквипотенциальными. Из формулы (7.16) следует, что перемещение заряда по эквипотенциальной поверхности не приводит к изменению его потенциальной энергии, и поэтому работа в этом случае равна нулю.

**Линии напряженности перпендикулярны эквипотенциальным поверхностям.**

Пусть положительный заряд  $q_0$  под действием силы электрического поля перемещается с эквипотенциальной поверхности, имеющей потенциал  $\varphi_1$ , на близко расположенную эквипотенциальную поверхность, имеющую потенциал  $\varphi_2 < \varphi_1$  (рис. 7.9). Напряженность поля  $E$  на всем малом пути  $d$  можно считать постоянной. Тогда, с одной стороны, работа перемещения

$$A = q_0 E d, \quad (7.18)$$

где  $q_0 E$  — сила, перемещающая заряд на пути  $d$ . С другой стороны, согласно формуле (8.16)

$$A = q_0 (\varphi_1 - \varphi_2) = q_0 \Delta\varphi. \quad (7.19)$$

В формулах (7.18) и (7.19) речь идет об одной и той же работе, поэтому можно установить связь между напряженностью и разностью потенциалов электрического поля:

$$E = \frac{\Delta\varphi}{d}.$$

**Электрическая емкость** является электрической характеристикой проводника или системы проводников. Она характеризует способность проводника удерживать электрический заряд.

Для уединенного проводника

$$C = \frac{q}{\varphi}, \quad (7.20)$$

где  $q$  — заряд проводника;  $\varphi$  — его потенциал.

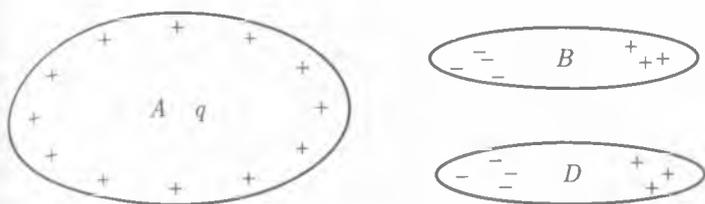


Рис. 7.10

Измеряется электрическая емкость в СИ в фарадах (Ф):  $1 \text{ Ф} = 1 \text{ Кл/В}$ .

Понятие электрической емкости применимо только к проводнику, так как заряженному диэлектрику нельзя приписать определенный потенциал — он различен в разных точках диэлектрика.

Электрическая емкость конкретного проводника определяется его размерами, формой, диэлектрической проницаемостью окружающей среды и, кроме того, зависит от присутствия и расположения окружающих тел, влияющих на конфигурацию поля и, следовательно, на потенциал рассматриваемого поля, и не зависит от заряда на нем, потенциала поля и вещества проводника.

Электрическая емкость — понятие макроскопическое. Не имеет смысла говорить об электрической емкости электрона, протона, так как, во-первых, заряды не изменяются, микросистемы с изменением заряда изменяются сами; во-вторых, о размерах элементарных частиц сейчас говорить трудно. Следовательно, электрическая емкость характеризует макроскопические области, размеры которых гораздо больше атомных.

Выясним, какой проводник — уединенный или неуединенный — имеет большую электрическую емкость.

Если проводник *A* (рис. 7.10) неуединенный, т.е. вблизи него имеются другие проводники *B* и *D*, то его электрическая емкость  $C_A$  больше, чем емкость  $C$  такого же, но уединенного проводника ( $C_A > C$ ).

Дело в том, что при сообщении проводнику *A* заряда  $q$  окружающие его проводники также заряжаются, причем ближайшими к наводящему заряду  $q$  оказываются заряды противоположного знака. Эти заряды несколько ослабляют поле, создаваемое зарядом  $q$ . Таким образом, они понижают потенциал проводника *A* и повышают его электрическую емкость (см. формулу (7.20)).

Нельзя считать электрическую емкость проводника аналогом вместимости сосуда, так как вместимость характеризует объем

вещества в сосуде (в литровом сосуде может быть не больше одного литра жидкости), а электрическая емкость проводника характеризует не количество заряда на нем, а взаимосвязь заряда с потенциалом. Ведь емкость не зависит ни от заряда проводника, ни от его потенциала. Это не противоречит соотношению (7.20), которое показывает, что потенциал уединенного проводника пропорционален заряду и обратно пропорционален емкости.

**Конденсаторы. Соединение конденсаторов в батарее.** Простейшие конденсаторы — это система двух проводников, разделенных слоем диэлектрика и расположенных так, что поле, создаваемое их зарядами, сосредоточено в пространстве, защищенном самими проводниками от внешних воздействий.

Для зарядки конденсатора ему передают на оба проводника (обкладки) равные разноименные заряды или заряжают только одну обкладку, а вторую заземляют. Тогда вследствие электризации на второй обкладке возникает заряд, равный, но противоположный по знаку заряду первой обкладки.

Емкость конденсатора не зависит от расположения окружающих тел и определяется следующим образом:

$$C = \frac{q}{\Delta\varphi}, \quad (7.21)$$

где  $q$  — заряд конденсатора, равный заряду на одной из обкладок,  $\Delta\varphi$  — разность потенциалов между обкладками конденсатора.

Емкость конденсатора зависит от формы и размеров обкладок, расстояния между ними, т. е. от геометрических характеристик конденсатора, а также от диэлектрической проницаемости заполняющего диэлектрика. У конденсаторов, имеющих различную форму, формулы для расчета емкости отличаются. Так, для плоского конденсатора

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon S}{d}. \quad (7.22)$$

Выясним границы применимости этой формулы. Ею можно пользоваться лишь в том случае, если электрическое поле между пластинами однородно. Однородным оно будет в том случае, если расстояние между пластинами  $d$  будет очень мало по сравнению с размерами пластин (шириной и высотой).

Несколько конденсаторов можно объединить в батарею. Определим емкость конденсаторной батареи при параллельном и последовательном соединениях конденсаторов.

**Параллельное соединение конденсаторов.**  
 В этом случае разность потенциалов на обкладках одинакова и равна  $\varphi_a - \varphi_b$ , так как обкладки соединены проводником (рис. 7.11, а). Сумма одноименных зарядов на обкладках  $q_1 + q_2 + q_3 + \dots + q_n = q$ .  
 Емкость такой батареи

$$C = \frac{q}{\varphi_a - \varphi_b} = \frac{q_1}{\varphi_a - \varphi_b} + \frac{q_2}{\varphi_a - \varphi_b} + \frac{q_3}{\varphi_a - \varphi_b} + \dots + \frac{q_n}{\varphi_a - \varphi_b}$$

где  $\frac{q_1}{\varphi_a - \varphi_b} = C_1$  — емкость первого конденсатора;

$\frac{q_2}{\varphi_a - \varphi_b} = C_2$  — емкость второго конденсатора и т. д. Поэтому в

общем случае

$$C = \sum_{i=1}^n C_i \quad (7.23)$$

**Последовательное соединение конденсаторов.** В этом случае (рис. 7.11, б) заряды на всех обкладках одинаковы по величине и равны  $q$ , а разность потенциалов  $\varphi_1 - \varphi_n = (\varphi_1 - \varphi_2) + (\varphi_2 - \varphi_3) + \dots + (\varphi_{n-1} - \varphi_n)$ . Емкость такой батареи

$$C = \frac{q}{\varphi_1 - \varphi_n}$$

откуда

$$\frac{1}{C} = \frac{\varphi_1 - \varphi_n}{q} = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{q} + \frac{\varphi_2 - \varphi_3}{q} + \dots + \frac{\varphi_{n-1} - \varphi_n}{q}$$

где  $\frac{\varphi_1 - \varphi_2}{q} = \frac{1}{C_1}$  — величина, обратная емкости первого конденса-

тора;  $\frac{\varphi_2 - \varphi_3}{q} = \frac{1}{C_2}$  — величина, обратная емкости второго конденса-

тора, и т. д.

Поэтому в общем случае

$$\frac{1}{C} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{C_i} \quad (7.24)$$

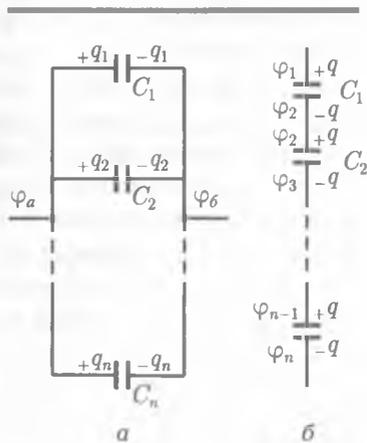


Рис. 7.11



## ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ВЫВОДЫ

1. В электродинамике основными являются понятия заряда и электрического поля. Заряд — физическая величина, определяющая интенсивность электромагнитного взаимодействия.

2. Различают два вида электрических зарядов: положительные и отрицательные. Носителями положительных зарядов являются протоны — частицы, входящие в состав атомных ядер, а носителями отрицательных — электроны — частицы, образующие оболочки атомов. По модулю заряд протона равен заряду электрона. Такой заряд называется элементарным.

3. В обычном состоянии атом электронейтрален, так как число протонов в его ядре равно числу электронов в оболочке. В ряде физических процессов, например в процессе трения, атомы могут терять свои внешние электроны или присоединять лишние. Тогда образуются положительно или отрицательно заряженные ионы. Появление на поверхности тела ионов называют электризацией тела. В этом случае говорят, что телу сообщен микроскопический заряд.

4. Взаимодействие электрических зарядов подчиняется закону Кулона

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2}$$

5. Электрические заряды взаимодействуют посредством электрического поля. Силовой характеристикой этого поля является напряженность  $\vec{E}$ . По модулю напряженность поля в некоторой точке равна силе, действующей на заряд, отнесенной к заряду, находящемуся в данной точке:  $E = F/q_0$ .

6. Электрические поля принято изображать графически в виде линий напряженности. В каждой точке такой линии вектор напряженности направлен по касательной к ней. Условились считать, что линии напряженности начинаются на поверхности положительного заряда и кончаются на поверхности отрицательного.

7. Поле, во всех точках которого напряженность имеет одно и то же значение, называют однородным.

8. Работа при перемещении заряда в электрическом поле не зависит от формы пути, а зависит только от начального и конечного положений заряда. Если расстояние между начальным и конечным положениями заряда равно  $d$ , то  $A = q_0 E d$ .

9. Энергетической характеристикой электрического поля в любой его точке служит скалярная величина — потенциал  $\varphi$ . Разность потенциалов двух точек поля называют напряжением  $U$ . Связь напряженности и разности потенциалов (напряжения) выражается формулой

$$E = \Delta\varphi/d = U/d.$$

10. По электрическим свойствам выделяют две группы веществ: проводники (металлы, электролиты) и диэлектрики (стекло, керосин, пластмассы, резина и т. д.). Проводники характеризуются наличием электрических зарядов, которые могут свободно перемещаться, а диэлектрики — отсутствием таковых.

В электрическом поле проводники и диэлектрики ведут себя по-разному. В проводниках напряженность поля равна нулю, в то время как в диэлектриках она отлична от нуля и уменьшается в  $\epsilon$  раз. Величину  $\epsilon$  называют диэлектрической проницаемостью диэлектрика и для каждого конкретного диэлектрика определяют экспериментально. В электрическом поле на противоположных концах диэлектрика образуется поверхностный заряд. Такое явление называют поляризацией.

11. Любой проводник можно характеризовать электрической емкостью, определяемой отношением заряда проводника к его потенциалу:  $C = q/\varphi$ . Электрическая емкость — понятие макроскопическое и применимо только к проводникам.

12. Система, состоящая из двух проводников, разделенных слоем диэлектрика, представляет собой конденсатор — накопитель электрических зарядов. Электрическая емкость плоского конденсатора, состоящего из двух пластин, определяется по формуле

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon S}{d}.$$

Если пластин больше двух, то формула принимает вид

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon S}{d} (n - 1),$$

где  $n$  — число пластин;  $S$  — площадь одной обкладки;  $d$  — расстояние между пластинами конденсатора.

13. При параллельном соединении конденсаторов емкость батареи конденсаторов равна сумме емкостей отдельных конденсаторов:

$$C = C_1 + C_2 + C_3 + \dots + C_n = \sum_{i=1}^n C_i.$$

14. При последовательном соединении конденсаторов величина, обратная емкости батареи конденсаторов, равна сумме величин, обратных емкостям входящих в нее конденсаторов:

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} + \dots + \frac{1}{C_n} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{C_i}$$



### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ

1. Что такое электростатика?
2. Дайте определение электрического заряда.
3. Можно ли наэлектризовать стеклянную палочку отрицательно, а эбонитовую положительно?
4. Определите силу взаимодействия двух точечных зарядов по  $1 \cdot 10^{-3}$  Кл каждый, находящихся на расстоянии 3 см друг от друга: а) в вакууме; б) в керосине. Сделайте вывод.  
*Ответ:* а)  $F = 1 \cdot 10^3$  Н; б)  $F = 0,5 \cdot 10^3$  Н
5. Что такое электрическое поле? Какое поле называют однородным?
6. Приведите формулу определения напряженности электрического поля.
7. В чем состоит принцип суперпозиции электрических полей?
8. На заряд  $0,5 \cdot 10^{-5}$  Кл, помещенный в электрическое поле, действует сила  $6,5 \cdot 10^{-5}$  Н. Определите напряженность поля в этой точке.  
*Ответ:*  $E = 13$  В
9. Два заряда  $+9q$  и  $-q$  находятся на расстоянии 10 см друг от друга. Найдите точку на прямой, соединяющей эти заряды, напряженность в которой равна нулю.  
*Ответ:*  $l = 2,5$  см
10. В чем отличие поведения проводников и диэлектриков в электрическом поле?
11. Что такое потенциал? Чему равна разность потенциалов между двумя точками поля?
12. Какие поверхности называют эквипотенциальными?
13. Заряженная пылинка массой  $2 \cdot 10^{-7}$  кг находится в вертикально направленном электрическом поле напряженностью  $1,4 \cdot 10^3$  Н/Кл. Каким должен быть заряд пылинки, чтобы она находилась в равновесии?  
*Ответ:*  $q = 1,4 \cdot 10^{-3}$  Кл
14. Как определить электрическую емкость конденсатора?
15. Два одинаковых конденсатора имеют емкость  $C$  каждый. Как изменится емкость системы, если их сначала соединить параллельно, а затем последовательно?

# 8 ПОСТОЯННЫЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК

## 8.1. Электрический ток и его основные характеристики

Классическая электродинамика — это фундаментальная физическая теория, устанавливающая поведение электромагнитного поля, осуществляющего электромагнитные взаимодействия. Законы классической (неквантовой) электродинамики были сформулированы и обоснованы английским физиком Д. К. Максвеллом. Они основаны на представлениях электронной теории.

Если в проводнике создать электрическое поле, то носители зарядов начнут двигаться упорядоченно: носители положительных зарядов в направлении поля, отрицательных — в противоположную сторону.

Упорядоченное движение свободных зарядов называется *электрическим током*.

Его характеризуют силой тока — скалярной величиной, численно равной электрическому заряду, проходящему через поперечное сечение проводника за единицу времени:

$$I = \frac{\Delta q}{\Delta t}, \quad (8.1)$$

где  $\Delta q$  — электрический заряд, который проходит через сечение проводника за бесконечно малый промежуток времени  $\Delta t$ .

Для постоянного тока формула (8.1) принимает вид

$$I = \frac{q}{t}.$$

В общем случае электрический ток может быть обусловлен перемещением как положительных, так и отрицательных заря-

дов. При этом перемещение положительного заряда в одном направлении эквивалентно перемещению такого же по величине отрицательного заряда в противоположном направлении. Если за время  $\Delta t$  через некоторое сечение проводника положительные носители переносят заряд  $\Delta q_+$ , а отрицательные в противоположном направлении  $\Delta q_-$ , то

$$I = \frac{\Delta q_+}{\Delta t} + \frac{\Delta q_-}{\Delta t}. \quad (8.2)$$

За направление тока условились принимать направление движения положительных зарядов. Электрический ток называют постоянным, если со временем остаются постоянными сила тока и его направление.

Единица силы тока в СИ — ампер (А).

**Направление электрического тока.** Электрический ток течет в определенном направлении. Выбор направления тока был предложен Ампером: за направление тока принимают направление движения положительно заряженных частиц. Поскольку в металлах движутся отрицательно заряженные электроны, то направление тока считают противоположным направлению движения частиц, т.е. противоположным скорости упорядоченного движения электронов  $\vec{v}$  (рис. 8.1).

Направление тока в металлическом проводнике противоположно направлению движения электронов, но совпадает с направлением напряженности электрического поля  $\vec{E}$ .

**Условия возникновения и поддержания электрического тока.** Для возникновения и поддержания электрического тока в проводнике необходимы три условия:

1) наличие свободных заряженных частиц (в металлическом проводнике — электронов);

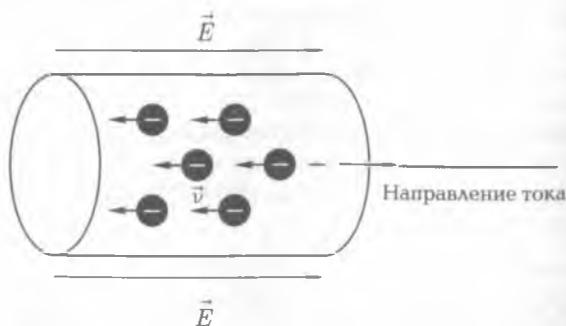


Рис. 8.1

2) действие на свободные заряды кулоновской силы. Если внутри проводника имеется электрическое поле, то между концами проводника существует разность потенциалов. Внутри проводника свободные заряды могут перемещаться только от большего потенциала к меньшему потенциалу. Когда разность потенциалов не изменяется с течением времени, в проводнике устанавливается постоянный ток;

3) для поддержания в проводнике тока необходимо устройство, в котором постоянно совершается работа по разделению положительно и отрицательно заряженных частиц. Разделенные частицы накапливаются на полюсах устройства — местах, к которым с помощью клемм или зажимов подсоединяются проводники. Один полюс источника заряжается положительно, другой — отрицательно. Между полюсами возникает разность потенциалов.

Устройство, создающее и поддерживающее разность потенциалов на концах проводника, называют источником тока.

В источниках тока в процессе работы по разделению заряженных частиц происходит превращение механической, внутренней, химической или какой-нибудь другой энергии в электрическую.

**Действия электрического тока.** Электрический ток имеет большое практическое значение: освещает помещения, приводит в движение станки и аппараты, циркулирует во всех электронно-вычислительных машинах. Движение заряженных частиц в проводнике мы видеть не можем. Однако о наличии тока можно судить по различным явлениям, которые вызывают электрический ток. Такие явления называют *действиями тока*.

Проводник, по которому идет ток, нагревается. В этом случае проявляется *тепловое действие тока*. Благодаря тепловому действию тока раскаляется добела вольфрамовая нить в лампе накаливания, нагревается нагревательный элемент в утюге, кипятильнике, чайнике или электроплите. Тепловое действие тока отсутствует только в сверхпроводниках (об этом вы узнаете позднее).

Электрический ток может изменять химический состав проводника. Это *химическое действие тока*. Химическое действие тока проявляется лишь при прохождении тока через растворы или расплавы электролитов. Так, при пропускании электрического тока через подкисленную воду она разлагается на водород и кислород, при пропускании тока через раствор медного купороса из раствора на одном из электродов выделяется медь.

Электрический ток оказывает *магнитное действие*. Убедиться в этом позволяет эксперимент. Если вдоль проводника расположить ось магнитной стрелки, то при пропускании тока магнитная

**Таблица 8.1. Воздействие постоянного тока на человека**

Сила тока $I$ , мА	Характер воздействия
До 3	Не ощущается
5... 10	Зуд, ощущение нагрева
12... 15	Усиление нагрева
20... 25	Сокращение мышц рук
50... 80	Судороги в руках, затруднение дыхания
90... 100	Паралич дыхания

стрелка поворачивается. При изменении направления тока изменяется направление поворота магнитной стрелки. Впервые действие электрического тока на магнитную стрелку обнаружил датский физик Х. Эрстед в 1820 г. На магнитном действии электрического тока основана работа электрических двигателей, генераторов, электроизмерительных приборов и др. Магнитное действие тока проявляется всегда.

Электрический ток, проходя через организм человека, раздражает и возбуждает живые ткани организма. Степень воздействия зависит от силы тока (табл. 8.1). Сила тока до 1 мА, проходящего через тело человека, считается безопасной.

**Ток проводимости.** Различают токи проводимости и конвекционные токи. *Ток проводимости* обусловлен направлением перемещением заряженных частиц (электронов, ионов) внутри неподвижного проводника (твердого, жидкого и газообразного) при наличии в нем электрического поля. Вместе с тем упорядоченное движение электрических зарядов можно осуществить, перемещая в пространстве заряженное макроскопическое тело. Такой ток называют *конвекционным*. Примером конвекционного тока может быть орбитальное движение Земли, обладающей избытком отрицательных зарядов.

Ограничимся рассмотрением тока проводимости, поскольку он наиболее простой и имеет широкое практическое применение. Для возникновения и существования токов проводимости необходимы следующие условия:

- наличие в данной среде свободных электрических зарядов. Такими зарядами в металлических проводниках являются свободные электроны, в полупроводниках — элект-

троны и «дырки», в электролитах — положительные и отрицательные ионы, в газах — преимущественно положительные ионы и электроны;

- наличие в данной среде электрического поля, энергия которого расходуется на перемещение зарядов. Таким образом, должна существовать разность потенциалов между двумя точками проводника. Для того чтобы ток был продолжительным, энергию электрического поля необходимо пополнять, т.е. поддерживать разность потенциалов на концах проводника. Для этого к концам проводника подсоединяют специальное устройство — источник тока. Таким образом, для существования непрерывного электрического тока следует построить электрическую цепь.

*Электрическая цепь — это совокупность источника тока, потребителя электрической энергии, измерительных и регулирующих приборов, выключателей и других элементов, соединенных проводниками.*

Простейшая электрическая цепь состоит из проводника, концы которого присоединены к источнику тока. Источник тока имеет два полюса: положительный и отрицательный. При разомкнутой внешней цепи на отрицательном полюсе источника тока наблюдается избыток электронов, на положительном — их нехватка. Понятно, что такое разделение зарядов в пределах источника тока может происходить только под действием сил, имеющих некулоновскую природу, поскольку под влиянием кулоновских сил разноименные заряды притягиваются. Эти дополнительные силы незлектрического происхождения, действующие в пределах источника тока, называют *сторонними*. Природа сторонних сил может быть различной: механической (генераторы, электрофорная машина), химической (гальванические элементы, аккумуляторы), внутренней (термоэлементы) и др.

Во всякой цепи имеются участки, где на заряды одновременно действуют и сторонние и электростатические силы, а также участки, где действуют только электростатические силы.

*Участок цепи, в котором на заряды действуют только электростатические силы, называется однородным.*

*Участок цепи, в котором на заряды одновременно действуют и электростатические и сторонние силы, называется неоднородным.*

При перемещении зарядов сторонние и электростатические силы совершают работу.

Работу  $A_{\text{ст}}$  сторонних сил характеризует *электродвижущая сила* (ЭДС).

**Электродвижущая сила источника.** ЭДС — это скалярная физическая величина, численно равная работе, совершаемой сторонними силами при перемещении единичного положительного заряда по всей замкнутой цепи:

$$\mathcal{E} = \frac{A_{\text{ст}}}{q}. \quad (8.3)$$

(Так как сторонние силы действуют только в источнике тока, ЭДС можно определить как величину, численно равную работе, совершаемой сторонними силами при перемещении единичного положительного заряда через источник тока, т.е. через всю область действия сторонних сил.)

ЭДС в СИ измеряется в вольтах (В). Термин «электродвижущая сила» является неудачным, поскольку электродвижущая сила характеризует источник тока с энергетической стороны.

Работу  $A_{\text{эл}}$  электростатического поля в проводнике характеризует *разность потенциалов (напряжение)*:

$$\varphi_1 - \varphi_2 = U = \frac{A_{\text{эл}}}{q}. \quad (8.4)$$

Следует помнить, что понятия разности потенциалов и напряжения равнозначны только в электростатике — в этом случае кулоновские силы являются консервативными (потенциальными) и, следовательно, их работа по перемещению единичного заряда в электрическом поле не зависит от формы и длины пути перемещения.

Однако в замкнутой цепи постоянного электрического тока понятия разности потенциалов и напряжения уже не совпадают. Дело в том, что в цепи тока не всегда имеет место потенциальное поле кулоновских сил. Так, внутри источника тока, кроме потенциального поля кулоновских сил, существует еще так называемое стороннее поле, и на заряды действуют как кулоновские, так и сторонние силы.

Если в потенциальном поле кулоновских сил работа по перемещению единичного заряда по замкнутому пути равнялась нулю, то в случае цепи с источником напряжения работа перемещения заряда уже не равна нулю.

Совместную работу сторонних и электростатических сил характеризует величина, называемая *падением напряжения*.

Следует иметь в виду, что о падении напряжения можно говорить лишь тогда, когда результатом работы тока, протекающего по данному участку электрической цепи, является только нагревание проводников. Во всех остальных случаях речь должна идти о напряжении.

*Падение напряжения на участке 1—2 — скалярная физическая величина, численно равная алгебраической сумме работ, совершаемых электростатическими и сторонними силами при перемещении единичного положительного заряда вдоль этого участка:*

$$\frac{A_{12}}{q} = \frac{A_{\text{эл}12}}{q} + \frac{A_{\text{ст}12}}{q},$$

или, учитывая (8.3) и (8.4), получим

$$\frac{A_{12}}{q} = \varphi_1 - \varphi_2 + \mathcal{E}_{12}, \quad (8.5)$$

где  $\mathcal{E}_{12}$  — ЭДС источника, действующая на участке 1—2.

**Стационарное электрическое поле.** Электрическое поле внутри проводника, вызывающее в этом проводнике постоянный электрический ток, по своим свойствам отличается от электростатического. Отличительные особенности электрического поля постоянного тока состоят в следующем:

- это поле существует как внутри проводника, так и вне его (в то время как электрическое поле, создаваемое неподвижными зарядами, находящимися в проводнике, существует только вне проводника, а внутри него отсутствует);
- потенциалы разных точек проводника, по которому идет постоянный ток, различны (в то время как потенциалы всех точек на поверхности проводника, находящегося в электростатическом поле, одинаковы);
- напряженность и потенциал любой точки электрического поля постоянного тока с течением времени не изменяются, поэтому данное поле называют **стационарным электрическим полем**;
- линии напряженности стационарного электрического поля внутри проводника параллельны его оси, а вне проводника расположены наклонно к его поверхности (меж-

ду тем линии напряженности электростатического поля перпендикулярны поверхности проводника);

- для существования в замкнутой цепи стационарного электрического поля необходимо, чтобы в этой цепи непрерывно происходил переход неэлектрической энергии в электрическую (что достигается включением в цепь источника тока);
- стационарное электрическое поле постоянного тока, текущего по проводнику, неразрывно связано со стационарным магнитным полем, существующим вокруг этого проводника с током.

## 8.2. Законы постоянного электрического тока

**Электрическое сопротивление проводника.** Сопротивление — физическая величина, характеризующая противодействие проводника или электрической цепи электрическому току. Это одна из важнейших характеристик электрической цепи.

Из школьного курса физики известно, что сопротивление  $R$  проводника пропорционально его длине, обратно пропорционально площади его поперечного сечения и зависит от вещества, из которого изготовлен проводник. Для однородного проводника, имеющего длину  $l$  и неизменную площадь поперечного сечения  $S$ , эту зависимость выражают формулой

$$R = \rho \frac{l}{S}, \quad (8.6)$$

где  $\rho$  — коэффициент пропорциональности, называемый *удельным электрическим сопротивлением*.

Из формулы (8.6) следует, что  $\rho = RS/l$ , т.е. *удельное сопротивление равно сопротивлению проводника, изготовленного из данного вещества и имеющего единичную длину и единичную площадь сечения*. Удельное сопротивление характеризует материал проводника и зависит от его состояния.

Единицей удельного сопротивления в СИ является  $1 \text{ Ом} \cdot \text{м}^2/\text{м} = 1 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ .

Величину  $\sigma$ , обратную удельному сопротивлению  $\rho$ , называют *удельной электрической проводимостью* проводника:

$$\sigma = 1/\rho. \quad (8.7)$$

Из (8.7) видно, что единицей удельной электрической проводимости в СИ является  $\frac{1}{1 \text{ Ом} \cdot \text{м}} = 1 \frac{\text{См}}{\text{м}}$  (сименс на метр).

**Зависимость сопротивления проводника от температуры.** Проводимость и сопротивление проводников зависят от температуры. Характер этой зависимости у проводников с различным типом проводимости различен.

У металлов, т. е. проводников с электронным типом проводимости (носителями тока являются электроны), с увеличением температуры сопротивление проводников увеличивается по закону

$$R_t = R_0 (1 + \alpha t), \quad (8.8)$$

где  $R_0$  — сопротивление проводника при  $0^\circ\text{C}$ ;  $R_t$  — сопротивление проводника при температуре, выраженной в градусах Цельсия.

Объясним эту закономерность. Абсолютное изменение сопротивления  $\Delta R = R_t - R_0$ ; относительное изменение сопротивления

$\frac{R_t - R_0}{R_0}$ , которое, как показывают наблюдения, при не слишком

высоких температурах пропорционально изменению температу-

ры, т. е.  $\frac{R_t - R_0}{R_0} = \alpha t$ , откуда

$$\alpha = \frac{R_t - R_0}{R_0 t}. \quad (8.9)$$

Коэффициент пропорциональности  $\alpha$  называют *температурным коэффициентом сопротивления*. Он характеризует температурную зависимость электрических свойств вещества проводника.

Из (8.9) следует, что температурный коэффициент сопротивления равен относительному изменению сопротивления при его нагревании на 1 К. Из (8.9) также видно, что размерность  $[\alpha] = \text{K}^{-1}$ .

Формула (8.8) является следствием закономерности (8.9).

Эксперименты показывают, что для всех металлов  $\alpha > 0$ . Для химически чистых металлов  $\alpha \approx \frac{1}{273} \text{K}^{-1}$ . У металлических спла-

вов удельные электрические сопротивления больше, чем у чистых металлов, а температурные коэффициенты сопротивления много меньше.

Существуют такие сплавы (например, константан и манганин), у которых температурный коэффициент сопротивления настолько

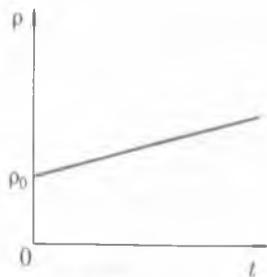


Рис. 8.2

мал, что их сопротивление практически не зависит от температуры. Эти сплавы используют для создания эталонных сопротивлений к измерительным приборам.

Согласно (8.6)  $R_0 = \rho_0 \frac{l}{S}$ , поэтому, подставив эту формулу в (8.8), можно получить полную формулу сопротивления:

$$R = \rho_0 \frac{l}{S} (1 + \alpha t), \quad (8.10)$$

где  $\rho_0$  — удельное сопротивление вещества при  $0^\circ\text{C}$ .

Подставив (8.6) в левую часть формулы (8.10), получим формулу, выражающую зависимость удельного сопротивления от температуры:

$$\rho = \rho_0 (1 + \alpha t). \quad (8.11)$$

Для металлов при не слишком низких и не слишком высоких температурах  $\alpha$  практически не зависит от температуры, и температурная зависимость удельного сопротивления является линейной (рис. 8.2).

При низких температурах зависимость  $\rho$  от  $t$  становится нелинейной.

**Сверхпроводимость.** В 1911 г. голландский физик Х. Камерлинг-Оннес провел опыты с ртутью, которую можно получить в чистом виде. Он столкнулся с новым, совершенно неожиданным явлением. Удельное сопротивление ртути при температуре 4,2 К (около  $-269^\circ\text{C}$ ) резко упало до такого значения, что его практически стало невозможно измерить. Это явление обращения электрического сопротивления в нуль было названо *сверхпроводимостью*.

В настоящее время сверхпроводимость обнаружена более чем у 25 металлических элементов, большого числа сплавов, некоторых полупроводников и полимеров. Температура  $T_{\text{кр}}$  перехода проводника в сверхпроводящее состояние для чистых металлов лежит в пределах от 0,14 К для иридия до 9,22 К для ниобия.

Движение электронов в металле, находящемся в состоянии сверхпроводимости, является до такой степени упорядоченным, что электроны, перемещаясь по проводнику, почти не испытывают соударений с атомами и ионами решетки. Полное объяснение

явления сверхпроводимости можно дать с позиций квантовой физики.

**Закон Ома для цепи постоянного тока.** Воспользовавшись законом сохранения энергии, покажем, что падение напряжения равно  $IR_{12}$ , где  $I$  — ток в проводнике;  $R_{12}$  — сопротивление проводника.

Если проводник, по которому течет ток, неподвижен, то единственным результатом прохождения по нему тока будет выделение теплоты. Полная работа, совершаемая электростатическими и сторонними силами за время  $t$ , равна в этом случае количеству выделившейся теплоты:

$$A_{12} = Q_{12}. \quad (8.12)$$

Как следует из (8.5), полная работа

$$A_{12} = q[(\varphi_1 - \varphi_2) + \mathcal{E}_{12}],$$

или, учитывая, что  $q = It$ ,

$$A_{12} = It[(\varphi_1 - \varphi_2) + \mathcal{E}_{12}]. \quad (8.13)$$

Количество теплоты, выделяющееся в проводнике, по закону Джоуля — Ленца

$$Q_{12} = I^2 R_{12} t. \quad (8.14)$$

Подставляя (8.13) и (8.14) в формулу (8.12), получим

$$(\varphi_1 - \varphi_2) + \mathcal{E}_{12} = IR_{12}. \quad (8.15)$$

Это и требовалось доказать, так как величина  $(\varphi_1 - \varphi_2) + \mathcal{E}_{12}$  есть падение напряжения на участке 1—2.

Решив уравнение (8.15) относительно  $I$ , получим выражение **закона Ома для неоднородного участка цепи**, из которого можно вывести ряд практически важных следствий:

$$I = \frac{\varphi_1 - \varphi_2 + \mathcal{E}_{12}}{R_{12}}. \quad (8.16)$$

Если источник тока на данном участке отсутствует ( $\mathcal{E}_{12} = 0$ ), то формула (8.16) переходит в выражение **закона Ома для однородного участка цепи**:

$$I = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{R_{12}}; I = \frac{U_{12}}{R_{12}}. \quad (8.17)$$

Отсюда видно, что падение напряжения  $IR_{12}$  и разность потенциалов  $\varphi_1 - \varphi_2$  на однородном участке равны.

Применив формулу (8.16) ко всей замкнутой цепи, получим

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R_{\text{полн}}}$$

Работа, совершаемая электростатическими силами при перемещении зарядов по всей цепи, равна нулю, так как в этом случае начальная и конечная точки совпадают и, следовательно,  $\varphi_1 = \varphi_2$ . Представим полное сопротивление цепи  $R_{\text{полн}}$  как сумму сопротивлений внешнего  $R$  и внутреннего  $r$  участков, тогда можем записать

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R + r}, \quad (8.18)$$

или

$$\mathcal{E} = IR + Ir. \quad (8.19)$$

Формулы (8.18) и (8.19) выражают

**закон Ома для замкнутой цепи постоянного тока: в замкнутой цепи постоянного тока сумма падений напряжений во внешней и внутренней частях цепи есть величина постоянная, равная ЭДС источника тока.**

Таким образом, с точки зрения физики закон Ома выражает закон сохранения энергии для замкнутой цепи постоянного тока.

**Работа и мощность тока.** Из формул  $A = qU$  и  $I = q/t$  следует, что

$$A = UI t. \quad (8.20)$$

Этим выражением определяется *работа тока*. Используя закон Ома для участка цепи и формулу (8.20), получим еще два выражения для работы тока:

$$A = I^2 R t; \quad (8.21)$$

$$A = \frac{U^2}{R} t. \quad (8.22)$$

В соответствии с (8.21) и (8.22) энергия, которая выделяется во внешней цепи, равна работе сторонних сил в источнике тока:

$$E = A = \mathcal{E}It. \quad (8.23)$$

Поскольку мощность есть работа, совершенная за 1 с, из формул (8.20) — (8.22) непосредственно вытекают три формулы, определяющие *мощность тока*:

$$P = UI; \quad (8.24)$$

$$P = I^2 R; \quad (8.25)$$

$$P = \frac{U^2}{R}. \quad (8.26)$$

**Закон Джоуля — Ленца.** Работа тока проявляется в превращении электрической энергии в механическую (например, в электродвигателе), химическую (например, при выделении из раствора химически чистого компонента), внутреннюю (например, при нагревании проводника) энергию.

Для последнего случая можно записать

$$Q = I^2 R t. \quad (8.27)$$

Уравнение (8.27) выражает

**закон Джоуля — Ленца: количество теплоты  $Q$ , выделяемой в проводнике, пропорционально квадрату силы тока, сопротивлению проводника и времени.**

Выясним механизм нагревания проводника с током. Сторонние силы источника тока создают в проводнике электрическое поле. Под действием сил этого поля свободные электроны, находящиеся в проводнике, начинают упорядоченно двигаться, т. е. увеличивают свою кинетическую энергию за счет энергии электрического поля. При соударениях с ионами кристаллической решетки электроны отдают им часть своей энергии. Эта энергия идет на увеличение внутренней энергии металла, проявляющееся в нагревании проводника. Так объясняется закон Джоуля — Ленца с точки зрения электронной теории проводимости металлов.

Закон Джоуля — Ленца (8.27) справедлив для любой электрической цепи. Следует отметить, что энергия тока может расходоваться не только на увеличение внутренней энергии проводника, но и на изменение его механической энергии (движение проводника в магнитном поле). Закон Джоуля — Ленца справедлив также

для газов и электролитов и отражает закон сохранения и превращения энергии.

Согласно закону Ома для однородного участка цепи постоянного тока формулу (8.27) можно записать также следующим образом:

$$Q = \frac{U^2}{R} t \quad (8.28)$$

и

$$Q = UIt. \quad (8.29)$$

Эти формулы выражают закон Джоуля — Ленца только для тех участков электрических цепей, в которых отсутствует ЭДС.

Тепловое действие тока находит широкое практическое применение. На некоторых металлургических заводах (например, Старооскольском) металл выплавляют в электропечах. Тепловое действие тока используют при электросварке, в лампах накаливания, в электропаяльниках. На тепловом действии тока основано устройство плавких предохранителей (пробок), защищающих электрические цепи от короткого замыкания. Большое распространение получили электронагревательные приборы в быту: электрические утюги, чайники, кухонные плиты, электросушилки, каминны и т. п.

### 8.3. Электрические цепи с последовательным и параллельным соединениями проводников

**Расчет сопротивлений при параллельном и последовательном соединениях проводников.** Различают последовательное и параллельное соединения проводников. *Последовательным называется такое соединение, при котором каждый проводник соединяется только с одним предыдущим и одним последующим проводниками.*

При последовательном соединении (рис. 8.3) сила тока, протекающего по всем проводникам, одна и та же:  $I_1 = I_2 = I_3 = \dots = I_n = I$ .

Иногда это неверно трактуют как постоянство силы тока. Силу тока можно изменить, например, меняя приложенное напряжение. Но она изменится одинаково во всех последовательных соединенных проводниках. Напряжение на каждом сопротивлении

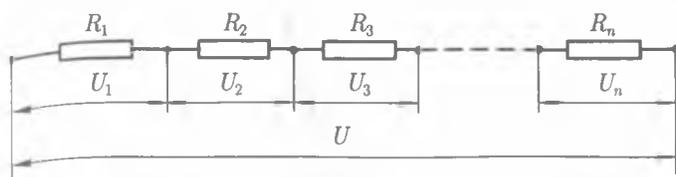


Рис. 8.3

лени определяется в соответствии с законом Ома для участка цепи:  $U_1 = IR_1$ ,  $U_2 = IR_2$ ,  $U_3 = IR_3$ , ...,  $U_n = IR_n$ . Напряжение на всем участке цепи

$$U = U_1 + U_2 + U_3 + \dots + U_n, \text{ или } U = \sum_{k=1}^n U_k. \quad (8.30)$$

Напряжение на последовательно соединенном участке равно сумме напряжений на его частях.

Подставляем в формулу (8.30) выражения для всех напряжений:

$$IR = \sum_{k=1}^n IR_k = I \sum_{k=1}^n R_k.$$

Сократив на силу тока, получим

$$R = \sum_{k=1}^n R_k, \text{ или } R = R_1 + R_2 + R_3 + \dots + R_n. \quad (8.31)$$

**Сопротивление последовательно соединенного участка равно сумме сопротивлений его частей.**

Если

$$R_1 = R_2 = R_3 = \dots = R_n = R_0,$$

то

$$R = nR_0.$$

Рассмотрим напряжения на любых двух последовательно соединенных сопротивлениях. Из равенства сил тока следует

$$\frac{U_i}{R_i} = \frac{U_k}{R_k},$$

откуда

$$\frac{U_i}{U_k} = \frac{R_i}{R_k}.$$

Напряжения на последовательно соединенных участках цепи пропорциональны сопротивлениям этих участков.

Например, электрическая лампа и подводный провод соединены последовательно, значит, по ним проходит один и тот же ток и равные количества электричества за одинаковые промежутки времени. Но лампа раскаляется и является источником света, а провод — нет. Почему? Потому что у них разные сопротивления. Сопротивление нити накаливания лампы велико, напряжение, измеряемое работой, совершенной на участке при прохождении единичного заряда, также значительно больше напряжения на проводе. При прохождении электрического тока энергия превращается во внутреннюю, нить накаливания раскаляется и испускает свет.

Параллельным называется соединение проводников, при котором одни их концы образуют узел  $A$ , а другие — узел  $B$  (рис. 8.4). При параллельном соединении различают ветви (отдельные проводники между узлами), разветвление (часть цепи между двумя узлами), неразветвленную часть цепи, лежащую вне разветвления.

Сопротивлением разветвления называется сопротивление такого линейного проводника, которым можно заменить разветвление без изменения силы тока в неразветвленной части цепи и напряжения между узлами. Действительно, для участка  $AB$   $I = U/R$ , где  $R$  — сопротивление разветвления. Если удалить разветвление

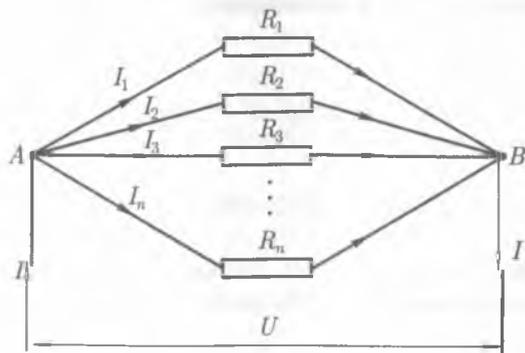


Рис. 8.4

а между точками  $A$  и  $B$  подобрать указанным способом неразветвленный проводник, то его сопротивление будет удовлетворять той же формуле и, следовательно, будет равно сопротивлению разветвления.

При таком соединении  $U_1 = U_2 = U_3 = \dots = U_n = U$ , т.е. напряжения на всех ветвях и на разветвлениях одинаковы, так как все они — разности потенциалов точек  $A$  и  $B$ .

**Сила тока в неразветвленной части цепи равна сумме сил токов в ветвях:**

$$I = \sum_{k=1}^n I_k. \quad (8.32)$$

На основании этого утверждения и в соответствии с законом Ома для участка цепи

$$\frac{U}{R} = \frac{\sum_{k=1}^n U_k}{R_k} = U \sum_{k=1}^n \left( \frac{1}{R_k} \right)$$

откуда

$$\frac{1}{R} = \sum_{k=1}^n \left( \frac{1}{R_k} \right), \text{ или } \frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \dots + \frac{1}{R_n}. \quad (8.33)$$

При параллельном соединении проводников величина, обратная полному сопротивлению, равна сумме обратных сопротивлений отдельных проводников.

**При параллельном соединении проводников их общее сопротивление меньше минимального.**

Следовательно, сопротивление разветвления меньше сопротивления любой ветви:  $R < R_k$ . На этом свойстве разветвления основано устройство лампового реостата. Он представляет собой систему параллельного соединения ламп, включение каждой из которых соответственно уменьшает сопротивление реостата.

Если

$$R_1 = R_2 = R_3 = \dots = R_n = R, \text{ то } R = \frac{R_0}{n}.$$

Из равенства напряжений следует, что для любых  $i$ -й и  $k$ -й ветвей

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

Силы токов в ветвях обратно пропорциональны сопротивлениям этих ветвей.



## ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ВЫВОДЫ

1. Электрический ток — упорядоченное движение электрических зарядов (заряженных частиц или тел). Электрический ток может создаваться движением носителей тока в проводнике (электрический ток проводимости); движением заряженных частиц или тел в вакууме или среде, не обладающей электрической проводимостью (конвекционный электрический ток); движением связанных заряженных частиц в диэлектрике при изменении поляризации диэлектрика.

2. Для появления и существования электрического тока проводимости необходимы два условия — наличие в данном теле (или в данной среде) заряженных частиц, которые могли бы перемещаться в пределах всего тела, и наличие в данной среде (внутри тела) электрического поля, энергия которого затрачивалась бы на перемещение электрических зарядов.

3. Электродвижущая сила (ЭДС) источника — это скалярная физическая величина, численно равная работе, совершаемой сторонними силами при перемещении единичного положительного заряда по всей замкнутой цепи.

4. Напряжение (падение напряжения) на участке цепи — скалярная физическая величина, численно равная алгебраической сумме работ, совершаемых электростатическими и сторонними силами при перемещении единичного положительного заряда вдоль этого участка.

5. Плотность электрического тока — векторная величина, характеризующая скорость и направление упорядоченного движения электрических зарядов.

6. Электрическое сопротивление проводника — физическая величина, характеризующая противодействие проводника или электрической цепи электрическому току.

7. Удельное электрическое сопротивление — физическая величина, характеризующая электропроводные свойства материала проводника и равная электрическому сопротивлению цилиндра

ческого проводника длиной 1 м и площадью поперечного сечения

1 м<sup>2</sup>.  
8. Сопротивление проводника зависит от вещества проводника, его размеров и формы. При постоянной температуре

$$R = \rho \frac{l}{S}.$$

9. Зависимость сопротивления проводника от температуры выражается формулой

$$R = R_0(1 + \alpha t).$$

10. Зависимость удельного сопротивления проводника от температуры имеет вид

$$\rho = \rho_0(1 + \alpha t).$$

11. **Сверхпроводимость** — свойство многих металлов, сплавов и химических соединений (сверхпроводников), состоящее в том, что их электрическое сопротивление скачком падает до нуля при температурах  $T < T_c$ , где  $T_c$  — характерная для данного вещества температура перехода в сверхпроводящее состояние.

12. Соотношение между силой тока во внешнем участке цепи, сопротивлением и напряжением называют **законом Ома** для участка цепи:

$$I = U / R.$$

13. **Закон Ома для замкнутой цепи** утверждает: сила тока в цепи пропорциональна электродвижущей силе источника и обратно пропорциональна сумме внешнего и внутреннего сопротивлений цепи:

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

14. Работа и мощность тока определяются по формулам

$$A = UIt; A = I^2Rt; A = \frac{U^2}{R}t;$$

$$P = UI; P = I^2R; P = \frac{U^2}{R}.$$

15. **Закон Джоуля — Ленца**: количество теплоты  $Q$ , выделяемой в проводнике, пропорционально квадрату силы тока, сопротивлению и времени:

$$Q = I^2Rt.$$

16. При последовательном соединении общее сопротивление цепи равно сумме сопротивлений отдельных его проводников:

$$R = R_1 + R_2 + R_3 + \dots + R_n = \sum_{k=1}^n R_k.$$

17. При параллельном соединении величина, обратная полному сопротивлению, равна сумме обратных сопротивлений отдельных проводников:

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \dots + \frac{1}{R_n} = \sum_{k=1}^n \frac{1}{R_k}.$$



### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ

1. Что такое электрический ток? Какой ток называют током проводимости? Что принимают за направление электрического тока?
2. Каковы условия возникновения и существования электрического тока?
3. Какие силы называют сторонними? Где они возникают?
4. Что называют силой тока? Приведите формулу, выражающую физический смысл этого понятия.
5. Что называют плотностью электрического тока? Приведите формулу, выражающую физический смысл этого понятия.
6. Какое электрическое поле называют стационарным? Чем оно отличается от электростатического?
7. Что такое электродвижущая сила источника?
8. Что такое разность потенциалов (напряжение)? Когда эти понятия совпадают, а когда нет?
9. Что такое электрическое сопротивление проводника? От чего оно зависит?
10. Что такое удельное сопротивление проводника? В каких единицах оно измеряется в СИ?
11. Что представляет собой явление сверхпроводимости?
12. Как записывают и формулируют закон Ома для однородного участка цепи постоянного тока?
13. В чем состоит физический смысл закона Ома для замкнутой цепи постоянного тока?
14. Чему равно общее сопротивление цепи при последовательном и параллельном соединениях потребителей?
15. Два проводника с одинаковыми сопротивлениями  $R$  соединены сначала последовательно, а затем параллельно. Как изменится их общее сопротивление?

16. Как связаны между собой напряжения и сопротивления на участках последовательно соединенной цепи?
17. Различны ли напряжения на концах параллельно соединенной цепи и на ее ветвях? Какова связь силы тока в неразветвленных частях этой цепи с силами токов в ее ветвях?
18. Как связаны между собой силы токов и сопротивления в ветвях параллельно соединенной цепи?
19. Докажите, что общее сопротивление разветвленной части цепи меньше любого из сопротивлений ее ветвей.

### 9.1. Электрическая проводимость в металлах

**Основные положения классической электронной теории.** В начале XX в. немецким физиком П. Друде (1863 — 1906) была создана классическая электронная теория проводимости металлов получившая дальнейшее развитие в работах голландского физика-теоретика Г. А. Лоренца (1853 — 1928). Ее основные положения заключаются в следующем.

С точки зрения электронной теории высокая электрическая проводимость металлов объясняется наличием огромного числа носителей тока — электронов проводимости, перемещающихся по всему объему проводника. П. Друде предположил, что электроны проводимости в металле можно рассматривать как *электронный газ*, обладающий свойствами одноатомного идеального газа. При своем движении электроны проводимости сталкиваются с ионами кристаллической решетки металла. Поэтому можно говорить о средней длине свободного пробега электронов  $\bar{\lambda}$ , порядок которой должен быть равен периоду кристаллической решетки металла, т. е.  $10^{-10}$  м.

Пользуясь закономерностями кинетической теории газов, мы разделим среднюю скорость теплового движения электронов:

$$\frac{mv^2}{2} = \frac{3}{2} kT.$$

При температуре  $0^\circ\text{C}$  получим для средней квадратичной скорости  $u \approx 110$  км/с. Такой же порядок имеет средняя арифметическая скорость теплового движения электронов. *Тепловое движение электронов вследствие своей хаотичности не может привести к возникновению электрического тока.*

Под действием внешнего электрического поля в металлическом проводнике возникает упорядоченное движение электронов, т. е. появляется электрический ток. При этом плотность тока будет равна

$$j = n_0 e \bar{v}. \quad (9.1)$$

Эта формула позволяет оценить порядок средней скорости  $\bar{v}$  упорядоченного движения электронов. Например, для меди табличное значение плотности тока  $j = 11 \cdot 10^6$  А/м<sup>2</sup>. Число электронов проводимости  $n_0$  в единице объема одновалентного металла определим из известного соотношения

$$\frac{N_A}{n_0} = \frac{A}{\rho},$$

где  $N_A$  — число Авогадро;  $A$  — атомная (молекулярная) масса;  $\rho$  — плотность металла. Для меди получается  $n_0 = 8,5 \cdot 10^{28}$  м<sup>-3</sup>. Подставляя значения в формулу (9.1), находим  $\bar{v} \approx 8 \cdot 10^{-4}$  м/с.

Таким образом, средняя скорость упорядоченного движения электронов, обуславливающая наличие электрического тока в проводнике, чрезвычайно мала по сравнению со средней скоростью их теплового движения при обычных температурах. Небольшое значение средней скорости  $\bar{v}$  объясняется весьма частыми столкновениями электронов с ионами кристаллической решетки. Поэтому во всех расчетах, связанных со столкновениями электронов проводимости с ионами кристаллической решетки, скоростью движения электронов считают среднюю квадратичную скорость  $u$ .

**Экспериментальное обоснование классической электронной теории.** В опытах, выполненных Н. Л. Мандельштамом и Н. Д. Паллакси (1913), а также Стюартом и Толменом (1916), было экспериментально подтверждено, что проводимость металлов обусловлена движением свободных электронов. На катушку был намотан длинный проводник, присоединенный к баллистическому гальванометру. Катушку приводили в быстрое вращение, а затем резко тормозили. В момент торможения гальванометр показывал кратковременный ток, направление которого свидетельствовало, что он создается движением отрицательно заряженных частиц. Эти частицы, будучи свободными, при торможении кристаллической решетки металла движутся по инерции и создают ток. Определяя с помощью гальванометра заряд, проходящий через него за все время существования тока в цепи, Стюарт и Толмен нашли удель-

ный заряд  $e/m$  носителей тока в металле, т. е. отношение заряда частиц к массе. Он оказался равным  $1,8 \cdot 10^{11}$  Кл/кг. Это отношение в пределах ошибки опыта совпадает со значением  $e/m$  для электронов, которое было найдено по отклонению пучка электронов в магнитном поле. Таким образом,

электрический ток в металлах представляет собой упорядоченное движение свободных электронов.

## 9.2. Электрический ток в электролитах

Электролитами называются растворы солей, щелочей или кислот в воде или некоторых других жидкостях, а также расплавы солей, являющихся в твердом состоянии ионными кристаллами. Молекулы электролита и растворителя являются дипольными. Поэтому в растворе каждую молекулу электролита окружает группа молекул растворителя (рис. 9.1). Очевидно, что молекулы растворителя стремятся как бы разорвать молекулу электролита на две части; этому способствует также тепловое движение — колебание атомов в молекуле электролита.

В результате большинство молекул электролита распадается на положительные ионы — катионы и отрицательные ионы — анионы; например, молекула  $\text{NaCl}$  распадается в одном растворе на катионы  $\text{Na}^+$  и анионы  $\text{Cl}^-$ . При этом возможен, конечно, и распад на ионы некоторых молекул самого растворителя. Описанный процесс называется электролитической диссоциацией. Обратному процессу — воссоединению (молизации) ионов электролита в нейтральные молекулы — препятствует образующаяся на ионах сольватная оболочка, состоящая из молекул растворителя (рис. 9.2).

Степенью, или коэффициентом, диссоциации называется отношение числа диссоциированных молекул электролита  $n$  к общему числу его молекул:

$$\alpha = \frac{n}{n_0} \quad (9.2)$$

(числа  $n$  и  $n_0$  относятся к единице объема раствора, т. е. представляют собой соответствующие концентрации). Степень диссоциации зависит от природы электролита и растворителя, концентрации электролита  $n_0$  и температуры. В слабых растворах ( $n_0 \rightarrow 0$ )

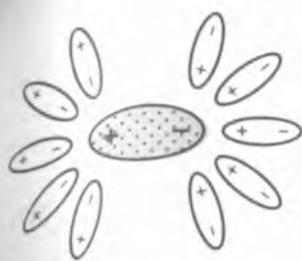


Рис. 9.1

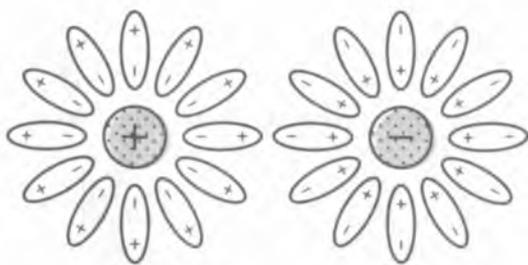


Рис. 9.2

почти все молекулы электролита диссоциированы ( $\alpha \approx 1$ ), с повышением концентрации степень диссоциации уменьшается (за счет молизации). При повышении температуры  $\alpha$  увеличивается, так как усиливающееся при этом колебательное движение атомов в молекулах электролита способствует распаду молекул на ионы.

Электрическое поле вызывает упорядоченное движение ионов в электролите: отрицательные ионы движутся к положительному электроду, а положительные ионы — к отрицательному. Следовательно,

**ток в электролитах представляет собой упорядоченное движение ионов.**

Прохождение электрического тока через электролит сопровождается *электролизом* — выделением на электродах, опущенных в электролит, составных частей вещества (или продуктов сопутствующих вторичных реакций). Законы электролиза были экспериментально установлены выдающимся английским физиком М. Фарадеем, но в настоящее время они легко выводятся теоретическим путем.

Зная механизм электропроводности, можно определить массу вещества, выделившегося при электролизе. Если за время  $t$  через электролит прошел заряд  $q$  и к каждому электроду подошло  $N$  ионов массой  $m_0$ , то на катоде откладывается вещество массой  $m = m_0 N$ . Масса иона  $m_0 = A/N_A$ , где  $A$  — молекулярная масса;  $N_A$  — число Авогадро. Число ионов

$$N = \frac{q}{q_0} = \frac{q}{ne},$$

где  $q_0$  — заряд иона;  $n$  — валентность вещества;  $e$  — заряд электрона. С учетом этого получим

$$m = \frac{A}{eN_A n} q. \quad (9.3)$$

Преобразуем (9.3) следующим образом:

$$m = \left( \frac{A}{eN_A n} \right) q = Kq, \quad (9.4)$$

где

$$K = \frac{A}{eN_A n},$$

но  $eN_A = F$ ;  $A/n = X$ , следовательно,

$$K = \frac{1}{F} X. \quad (9.5)$$

Формула (9.4) выражает

**первый закон Фарадея: масса вещества, выделившегося на каждом из электродов, пропорциональна количеству электричества, прошедшего через электролит.**

Формула (9.5) это

**второй закон Фарадея: электрохимические эквиваленты пропорциональны их химическим эквивалентам.**

Подставив (9.5) в (9.4), получим формулу, объединяющую оба закона Фарадея:

$$m = \frac{1}{F} \frac{A}{n} q. \quad (9.6)$$

Пользуясь ею, легко выяснить физический смысл постоянной Фарадея:

$$F = \frac{q(A/n)}{m},$$

Таким образом, для одновалентных веществ *постоянная Фарадея численно равна заряду, который надо пропустить через раствор электролита, чтобы выделить на электроде массу вещества, численно равную химическому эквиваленту.*

Законы Фарадея сыграли огромную роль в обнаружении *дискретной природы электричества.* Запишем объединенный закон Фарадея (9.6), разделив обе части этого равенства на массу иона:

$$\frac{m}{m_u} = \frac{1}{F} \frac{A}{m_u} \frac{1}{n} q$$

$$N = \frac{1}{F} \frac{N_A}{n} q,$$

или где  $N$  — количество ионов, содержащихся в массе вещества;  
 $N_A$  — число Авогадро.

Отсюда для заряда одного иона получается значение

$$e' = \frac{q}{N} = \frac{F}{N_A} n_e.$$

Следовательно, заряд иона оказывается целым кратным величины  $e = F/N_A$ , которая представляет собой элементарный заряд.

Таким образом, из анализа законов электролиза вытекает дискретность зарядов, которыми могут обладать ионы в электролитах.

### 9.3. Электрический ток в газах

**Электрическая проводимость газов.** В отличие от растворов электролита газ при нормальных условиях состоит из нейтральных молекул (или атомов) и потому является диэлектриком. Проводником электрического тока газ становится только в том случае, когда хотя бы часть его молекул ионизируется (превращается в ионы) под влиянием внешнего воздействия (ионизатора). При ионизации из молекулы газа вырывается обычно один электрон, в результате чего молекула становится положительным ионом. Вырвавшийся электрон либо остается некоторое время свободным, либо сразу же присоединяется («прилипает») к одной из нейтральных молекул газа, превращая ее в отрицательный ион. Таким образом, в ионизированном газе имеются положительные и отрицательные ионы и свободные электроны. Надо иметь в виду, что свободные электроны и ионы могут оседать на посторонних частицах, взвешенных в газе (пылинках, частицах дыма, капельках и т. п.), образуя *тяжелые ионы*.

Для того чтобы вырвать из молекулы (атома) один электрон, ионизатор должен совершить определенную работу, называемую *работой ионизации*; для большинства газов она имеет зна-

чение 5...25 эВ. Ионизаторами газа могут служить рентгеновские лучи, радиоактивные излучения, космические лучи, интенсивное нагревание, ультрафиолетовые лучи и некоторые другие факторы.

Наряду с ионизацией в газе идет процесс рекомбинации ионов. В результате устанавливается равновесное состояние с определенной концентрацией ионов, зависящей от мощности ионизатора.

При наличии внешнего электрического поля в ионизированном газе возникает ток, обусловленный движением разноименных ионов во взаимно противоположных направлениях и движением электронов.

Благодаря малой вязкости газа подвижность газовых ионов в тысячи раз больше, чем подвижность ионов электролита, и составляет примерно  $10^{-4} \text{ м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ .

При прекращении действия ионизатора концентрация ионов в газе быстро падает до нуля (в связи с рекомбинацией и выносом ионов к электродам источника тока) и ток перестает существовать. *Электрический разряд, для существования которого необходим внешний ионизатор, называется несамостоятельным газовым разрядом.*

При достаточно сильном электрическом поле в газе начинаются процессы *самоионизации*, благодаря которым ток может существовать и при отсутствии внешнего ионизатора. *Электрический разряд в газе, продолжающийся и после прекращения действия внешнего ионизатора, называется самостоятельным газовым разрядом.*

**Несамостоятельный газовый разряд.** Для исследования зависимости силы тока  $I$  при несамостоятельном газовом разряде от напряжения  $U$  между электродами воспользуемся установкой, схема которой представлена на рис. 9.3.

Напряжение, приложенное к электродам  $A$  и  $K$ , регулируется с помощью потенциометра  $R$  и измеряется вольтметром  $V$ . Для измерения силы тока служит чувствительный гальванометр  $G$ . Газ ионизируется рентгеновскими лучами, испускаемыми рентгеновской трубкой. Интенсивность ионизации во время эксперимента остается неизменной. Результаты измерений представлены в виде кривой (рис. 9.4).

Рассмотрим и объясним особенности процесса несамостоятельного разряда в газе.

При изменении напряжения между электродами от 0 до  $U_1$  (область  $I$  на рис. 9.4) сила тока разряда в газе растет пропорцио-

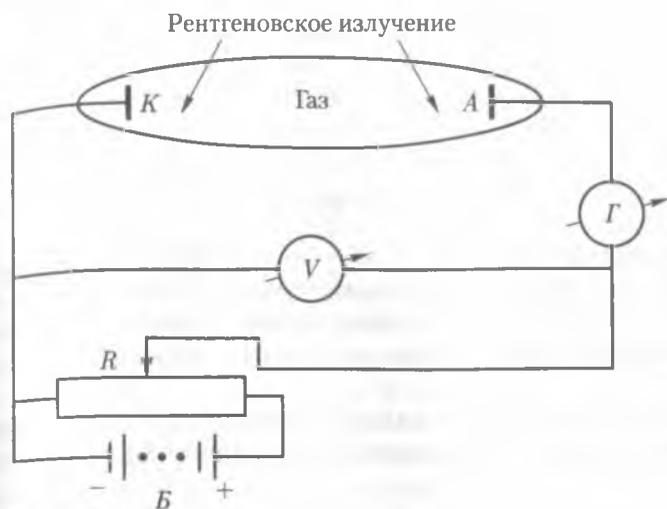


Рис. 9.3

нально напряжению. Следовательно, в этой области выполняется закон Ома для участка цепи.

Объясняется это так. При небольших напряжениях в газе наряду с процессом ионизации идет обратный процесс рекомбинации (т.е. процесс восстановления нейтральных молекул из ионов), в результате которого не все ионы, созданные внешним ионизатором в единичном объеме газа за единичное время, участвуют в образовании тока. С ростом напряжения число рекомбинирующих ионов уменьшается, а число ионов, участвующих в образовании тока, увеличивается.

Поэтому сила тока возрастает пропорционально напряжению.

Установим для области I соотношение между плотностью тока и напряженностью поля в газе. Так как ток в газе представляет собой два встречных потока заряженных частиц (к катоду движутся положительные ионы, а к аноду — электроны и отрицательные ионы), плотность тока в газе складывается из плотностей токов положительных  $j^+$  и отрицательных  $j^-$  частиц:

$$j = j^+ + j^- \quad (9.7)$$

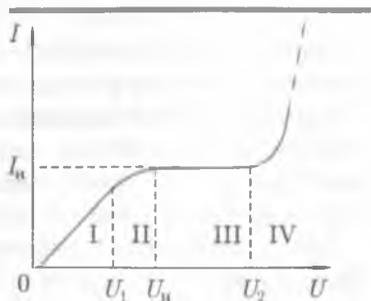


Рис. 9.4

Согласно формуле  $j = en_0v$  имеем

$$j^+ = qn_0v^+ \quad (9.9)$$

и

$$j^- = qn_0v^-, \quad (9.9)$$

где  $q$  — заряд носителя тока;  $n_0$  — концентрация носителей тока в газе;  $v^+$  — средняя скорость движения положительных ионов;  $v^-$  — средняя скорость движения отрицательных ионов (электронов). Эти скорости различны, так как различны массы электрона и иона.

Известно, что средняя скорость движения носителя заряда в электрическом поле пропорциональна напряженности этого поля

$$v^+ = u^+E \quad (9.10)$$

и

$$v^- = u^-E, \quad (9.11)$$

где коэффициенты пропорциональности  $u^+$  и  $u^-$  называют подвижностями газовых ионов. Из (9.10) и (9.11) следует, что если  $E$  равна единице напряженности, то  $u^+ = v^+$  и  $u^- = v^-$ , т.е. *подвижность иона численно равна той скорости, которую получает данный ион под действием электрического поля с напряженностью, равной единице напряженности.*

Подставив (9.10) в (9.8) и (9.11) в (9.9), получим

$$j^+ = qn_0u^+E; \quad j^- = qn_0u^-E.$$

Подставив эти выражения в формулу (9.7), находим

$$j = qn_0(u^+ + u^-)E. \quad (9.12)$$

Формула (9.12) выражает *закон Ома для тока в газе*. Она применима только для малых напряжений (область I на рис. 9.4)

При изменении напряжения между электродами от  $U_1$  до  $U_2$  (область II) сила тока в газе возрастает непропорционально напряжению, и рост тока замедляется. Область II является переходной между областями I и III.

При достижении определенного напряжения  $U_n$  рост тока вообще прекращается, и при изменении напряжения от  $U_n$  до  $U_3$  (область III) ток остается постоянным, не зависящим от напряжения. Такой ток называется *током насыщения*.

Причиной установления тока насыщения является полное прекращение процесса рекомбинации. Начиная с этого момента все ионы, создаваемые ионизатором, участвуют в образовании тока, и ток достигает максимального значения, которое определяется ионизационной способностью данного ионизатора.

Установлено, что плотность тока насыщения  $j_n$  в газе определяется по формуле  $j_n = qln_0$ , где  $l$  — расстояние между электродами разрядной трубки.

**Самостоятельный газовый разряд.** Рассмотрим и объясним особенности процесса самостоятельной проводимости газа.

При достижении достаточно большого напряжения между электродами (область IV на рис. 9.4) сила тока в газе резко возрастает (в сотни и тысячи раз по сравнению с током насыщения). Это значит, что в газе появились в большом количестве дополнительные носители тока (электроны и ионы) помимо тех, которые создаются под действием внешнего ионизатора. Если теперь устранить ионизатор, то разряд в газе не прекратится.

Причина появления в газе новых носителей тока состоит в следующем. Кинетическая энергия, которой обладают электроны и ионы, образующие ток в газе, обусловлена работой сил электрического поля и определяется по формуле  $mv^2/2 = qU$ . Из этой формулы видно, что с ростом напряжения между электродами разрядной трубки увеличивается и кинетическая энергия носителей тока в газе. При достаточно высоком напряжении эта энергия становится настолько большой, что в момент столкновения движущегося электрона с нейтральной молекулой газа в результате удара она может потерять свой электрон и превратиться в положительный ион. Это явление называют *ударной ионизацией*. Вследствие ударной ионизации число заряженных частиц в газе быстро нарастает, что и приводит к резкому увеличению силы тока.

Очевидно, что ударная ионизация не может длительно поддерживать самостоятельный разряд, так как все образующиеся при ней электроны, достигнув анода, перестают участвовать в образовании тока в газе. Чтобы процесс ударной ионизации и, следовательно, самостоятельный разряд в газе не прекратились, необходимо постоянная эмиссия (т.е. испускание) электронов в газ. Эта эмиссия может быть вызвана разными причинами. Во-первых, положительные ионы, появившиеся при столкновениях электронов с нейтральными молекулами газа, двигаясь к катоду, приобретают за счет работы сил электрического поля значительную кинетическую энергию и, ударяясь о катод, выбивают с его поверхно-

сти электроны. Это явление называют *вторичной электронной эмиссией*. Во-вторых, катод может испускать электроны при нагревании до высокой температуры, т. е. имеет место *термоэлектронная эмиссия*.

**Виды самостоятельного разряда в газах.** В зависимости от условий, в которых находится газ, в нем могут возникнуть различные виды самостоятельного разряда.

**Тлеющий разряд** — самостоятельный электрический разряд в газе, наблюдающийся при малой плотности электрического тока на катоде ( $j < 10^6$  А/м<sup>2</sup>), незначительном давлении газа (меньше атмосферного — до 10 Па) и небольшого, порядка  $10^2$  В напряжения. Тлеющий разряд происходит при низкой температуре катода, поэтому его иногда называют *холодным свечением газа*. В стабилизированном тлеющем разряде наблюдается чередование темных и светлых областей, связанных с разными процессами, происходящими на этих участках тлеющего разряда. Возле самого катода существует так называемое катодное темное пространство, которое переходит в катодное свечение; за ним идет фарадеево темное пространство, потом светящийся столб. Темное пространство тлеющего разряда соответствует участкам, где осуществляется разгон электронов и ионов, а светлые области — участкам, где происходит рекомбинация электронов и ионов, сопровождающаяся свечением газа. С понижением давления газа до 1...2 Па свечение прекращается. На практике тлеющий разряд используют в газосветных лампах и приборах тлеющего разряда (газотронах, тиратронах, стабилитронах).

**Коронный разряд** — самостоятельный электрический разряд в газе при высоком напряжении и нормальном атмосферном давлении. Коронный разряд возникает в резко неоднородном электрическом поле высокой напряженности около электродов с большой кривизной поверхности (например, возле острия, имеющего значительный потенциал, или около проводов, находящихся под высоким напряжением). Около электрода, где происходит ионизация газа и его свечение, находится область коронного разряда. За пределами коронного промежутка в отдаленных участках, где поле слабее, существует область несамостоятельного электрического разряда в газе, в которой нет ударной ионизации и характерного свечения; электрический ток в газе создают носители, выходящие из области коронного разряда.

Механизм ионизации газа при коронном разряде имеет двустороннюю природу: если разряд возникает около отрицательного электрода (катода), то электроны, вызывающие ионизацию

молекул, выбиваются из него положительными ионами; если коронирует анод, то электроны возникают вблизи электрода вследствие фотоионизации газа со стороны светящейся области коронного разряда. На остриях коронный разряд с повышением напряжения приобретает вид ломаных светящихся линий. Такой разряд по своей природе близок к искровому разряду. Коронный разряд используют в промышленности в электрических фильтрах для очистки газов, нанесения порошковых и лакокрасочных покрытий.

**Дуговой разряд** — самостоятельный электрический разряд в газе, возникающий при большой плотности электрического тока. Дуговой разряд возникает при незначительном напряжении (30...100 В) вследствие интенсивной электронной эмиссии с раскаленного катода (температура около 3000 К). Механизм дугового разряда связан с ударной ионизацией молекул газа в межэлектродном промежутке, вызванной термоэлектронами, ускоряющимися электрическим полем между электродами. Малое электрическое сопротивление межэлектродного промежутка вследствие высокой электрической проводимости газа создает условия для образования «дуги» при низком напряжении. Дуговой разряд используется как сильный источник света (дуговые лампы), в дуговых печах для выплавки металлов, как сварочная дуга при электросварке.

**Искровой разряд** — неустановившийся электрический разряд в газе при высоком напряжении, который сопровождается искровым кратковременным свечением газа и характерным треском. Он вызывается ударной ионизацией и сопутствующей ей фотоионизацией, создавая электронные и ионные лавины. Сливаясь, они образуют искровой канал, так называемый *стример*, в котором и распространяется искровой разряд. Типичным примером искрового разряда в природе является молния. Искровой разряд используют для обработки металлов, создания счетных искровых камер в атомной физике, измерения высоких напряжений.

**Понятие о плазме.** Частично или полностью ионизированный газ, в котором концентрации положительных и отрицательных зарядов примерно равны (квазинейтральность), называется *плазмой*. Причиной ионизации может быть взаимодействие с электромагнитными излучениями (фотоионизация), бомбардировка молекул газа заряженными частицами (электрический разряд в газе), нагревание газа. В отличие от нейтрального газа для плазмы кроме столкновений характерно коллективное взаимодействие частиц посредством колебаний и волн. Плазму с температурой

$10^3 \dots 10^5$  К называют низкотемпературной, а с температурой  $10^6 \dots 10^7$  К — высокотемпературной. Высокотемпературная плазма из смеси дейтерия и трития исследуется в целях осуществления управляемого термоядерного синтеза. Низкотемпературная плазма используется в газоразрядных приборах, плазмотронах, плазменных двигателях, магнитогидродинамических генераторах и т.д. В состоянии плазмы находится подавляющая часть Вселенной, звезды, туманности, межзвездная среда, радиационные пояса Земли, ионосфера.

#### 9.4. Электрический ток в вакууме

**Вакуумом** (от лат. *vacuum* — пустота) называется такая степень разрежения газа, при которой можно пренебречь соударениями между его молекулами и считать, что средняя длина свободного пробега  $\bar{\lambda}$  атомов или молекул газа превышает линейные размеры  $d$  сосуда, в котором газ находится ( $\bar{\lambda} \gg d$ ). Даже при самом большом достигаемом сегодня в научных лабораториях разрежении (порядка  $10^{-12}$  мм рт. ст.) в  $1 \text{ см}^3$  содержится  $10^3$  молекул.

Степень разрежения может быть различной, и поэтому вакуум — это относительное понятие. Различают высокий, средний и низкий вакуум. Критерием является сопоставление длины свободного пробега молекул и размеров сосуда, в котором создается разрежение. Если она намного больше размеров сосуда, то имеет место **высокий вакуум**, если того же порядка — **средний вакуум** если меньше — **низкий вакуум**. С точки зрения этого определения даже воздух при атмосферном давлении можно считать «вакуумом». Именно в случае микропористого вещества, когда поры имеют размеры порядка длины свободного пробега молекул при атмосферном давлении, можно говорить о вакууме в нем, и физические свойства газа в порах будут соответствовать таковым для вакуума соответствующей степени.

Проводимость межэлектродного промежутка в состоянии вакуума называется **электрическим током в вакууме**. Молекул газа при этом столь мало, что процессы их ионизации не могут обеспечить такого числа электронов и положительных ионов, которое необходимо для осуществления электрической проводимости. Проводимость межэлектродного промежутка в вакууме может быть обеспечена лишь с помощью заряженных частиц, возникших за счет эмиссионных явлений на электродах.

Необходимо помнить, что ток в вакууме принципиально отличается от тока в металлах.

Во-первых, электрический ток в металлах представляет собой направленный поток электронов в веществе, а ток в вакууме — направленный поток электронов в *свободном пространстве*. Во-вторых, электрический ток в металлах есть направленное перемещение в электрическом поле только свободных электронов, а не всех электронов, содержащихся в проводнике, тогда как электрический ток в вакууме — направленное перемещение (поток) *всех* электронов, попавших в электрическое поле.

Энергию, необходимую электронам для выхода из металла, можно сообщить не только нагреванием металла, но и другими способами. В зависимости от того, каким способом электронам сообщается эта энергия, различают автоэлектронную (холодную), вторичную, ионно-электронную, фотоэлектронную эмиссию.

## 9.5. Электрический ток в полупроводниках

**Отличие полупроводников от проводников и диэлектриков.** Существует большая группа веществ, которые по своим электрическим свойствам занимают промежуточное положение между проводниками и диэлектриками. Эти вещества называют *полупроводниками*. К ним относят кремний, германий, фосфор, мышьяк, сурьму, селен, оксиды ряда металлов, сульфиды, теллуриды.

От типичных проводников — металлов — полупроводники отличаются прежде всего концентрацией свободных электронов, которая при нормальных условиях в миллиард раз меньше, чем в металлах. Поэтому удельное сопротивление проводников на 10...15 порядков больше, чем металлов.

Однако следует учесть, что удельное сопротивление существенно зависит от температуры. Если при нагревании металла удельное сопротивление возрастает, то при нагревании полупроводника оно сильно уменьшается.

Наличие примесей также по-разному влияет на электрическую проводимость металлов и полупроводников. Присутствие примесей в металлах заметно снижает их электрическую проводимость, в то время как в полупроводниках примеси в отдельных случаях могут повысить электрическую проводимость в десятки и сотни тысяч раз.

Наконец, электрическая проводимость существенно зависит от давления. Уже при давлении 30...40 МПа она может быть так же

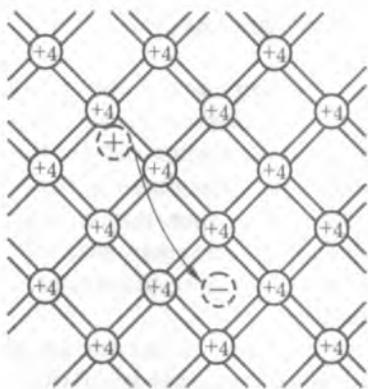


Рис. 9.5

велика, как и у металлических кристаллов. Отсюда можно ожидать высокой электрической проводимости внутренних оболочек Земли и планет.

**Собственная и примесная проводимости полупроводников.** Наличие электронов проводимости в полупроводниках объясняется особенностью их кристаллического строения. В качестве примера рассмотрим кристаллическую решетку германия (рис. 9.5).

Во внешней оболочке атомов германия имеется четыре валентных электрона. Эти электроны, участвующие в ковалентной связи с соседними атомами, слабо связаны с ядром. Энергия ионизации атомов германия сравнима с энергией теплового движения обусловленной колебаниями частиц в кристалле, уже при комнатной температуре. Поэтому часть внешних электронов обобществляется соседними атомами и легко переходит от одного из них к другому, становясь блуждающими частицами. Одновременно с появлением блуждающего электрона у одного из атомов полупроводника возникает свободное для электрона место, которое принято называть *дыркой*. Эту дырку может занять электрон соседнего атома, у которого в свою очередь образуется дырка. Таким образом, блуждание электронов в кристаллической решетке полупроводника влечет за собой своеобразное блуждание дырок.

«Перемещение» дырок от одного атома к другому подобно движению положительного заряда. Если в полупроводнике создать электрическое поле, то движение как электронов, так и дырок принимает направленный характер, причем дырки «перемещаются» в направлении поля, а электроны — навстречу им. Следовательно, ток в полупроводнике складывается из электронного и дырочного токов:

$$I = \bar{i}_э + \bar{i}_д. \quad (9.13)$$

В химически чистых полупроводниках электронный ток равен дырочному, что является условием собственной проводимости полупроводника. Для полупроводников различной химической природы энергия ионизации атомов неодинакова. Но во всех случаях повышение их температуры ведет к быстрому увеличению

числа свободных электронов и дырок и, следовательно, к уменьшению удельного сопротивления.

В отличие от многих диэлектриков упаковка атомов в кристаллах полупроводника является более плотной, а это существенно повышает вероятность обобществления валентных электронов. Теперь легко понять, почему высокое давление ведет к понижению удельного сопротивления. Под большим давлением у многих веществ происходит перестройка кристаллической решетки, в результате чего среднее расстояние между атомами в кристалле уменьшается, и число свободных электронов возрастает. При очень больших давлениях даже диэлектрики могут перейти в ряд проводников.

Подобный случай имеет место во внутренних слоях Юпитера. На глубине 25 тыс. км под давлением около 60 млн МПа атомы водорода сближаются настолько, что их электроны полностью обобществляются. В результате водород, будучи диэлектриком при нормальном давлении, становится проводником, подобным металлу. Поэтому такую фазу водорода называют *металлической*.

Проводимость полупроводников зависит не только от внешних условий, в частности температуры и давления, но и от наличия примесей. Специально подобранные примеси позволяют повысить проводимость. Тогда наряду с собственной проводимостью полупроводника появляется еще и *примесная проводимость*. Обычно основным полупроводником служит четырехвалентный германий или кремний.

Если, например, к четырехвалентному кремнию в качестве примеси добавить пятивалентный мышьяк, то для образования ковалентной связи атомов кремния и мышьяка достаточно четырех валентных электронов. При этом пятый валентный электрон мышьяка оказывается свободным, т. е. является электроном проводимости. Примесь, валентность которой больше валентности основного полупроводника, называют *донорной* (отдающей электрон). Полупроводники с донорной примесью относят к полупроводникам *n*-типа (от франц. *negative* — отрицательный).

В полупроводниках *n*-типа электронный ток преобладает над дырочным током.

В тех случаях, когда к кремнию в качестве примеси добавляют трехвалентный индий, при образовании ковалентной связи атомов кремния и индия не будет хватать одного электрона. Поэтому на каждый атом индия образуется одна лишняя дырка. При-

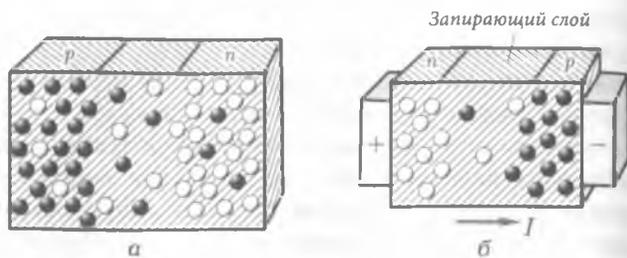


Рис. 9.6

месь, валентность которой меньше валентности основного полупроводника, называют *акцепторной* (принимающей). Полупроводники с акцепторной примесью относят к полупроводникам *p*-типа (от франц. *positive* — положительный).

**В полупроводниках *p*-типа дырочный ток преобладает над электронным.**

**Электронно-дырочный переход.** Приведем в непосредственный контакт два полупроводника с различными типами проводимости. Тогда начнется встречное диффундирование электронов и дырок. Электроны из полупроводника *p*-типа будут переходить в полупроводник *n*-типа, а дырки, наоборот, из полупроводника *p*-типа в полупроводник *n*-типа (рис. 9.6, а). Поэтому процесс, происходящий в контактном слое полупроводников различных типов, называют *электронно-дырочным переходом*.

В результате встречного диффундирования электронов и дырок полупроводник *p*-типа получит отрицательный заряд, а полупроводник *n*-типа — положительный заряд. В контактном слое возникнет электрическое поле, препятствующее дальнейшему переходу электронов и дырок (рис. 9.6, б).



## ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ВЫВОДЫ

1. Экспериментально установлено, что электрический ток в металлах обусловлен направленным движением свободных электронов. Неодинаковая электрическая проводимость металлов объясняется различной концентрацией в них свободных электронов.

2. Электроны проводимости в металле рассматриваются как электронный газ, обладающий свойствами одноатомного газа.

3. Растворы солей, кислот и щелочей называют электролитами. Молекулы растворимого вещества распадаются на положительные и отрицательно заряженные ионы. Такой процесс называют электролитической диссоциацией. Процесс, обратный диссоциации, называется молизацией.

4. Электрический ток в электролитах представляет собой упорядоченное движение ионов (положительных и отрицательных) в противоположных направлениях.

5. Процесс выделения вещества на электродах при прохождении тока через электролит называют электролизом. Для электролиза справедливы два закона Фарадея:

I закон: масса вещества, выделившегося на каждом из электродов, пропорциональна количеству электричества, прошедшего через электролит, т.е.  $m = kq = kIt$ ;

II закон: электрохимические эквиваленты пропорциональны их химическим эквивалентам, т.е.  $k = \frac{1}{F} \frac{A}{n} = \frac{1}{F} X$ .

6. Электролиз находит широкое применение в технике. Для защиты металлических изделий от коррозии их покрывают тонким слоем другого металла (никелирование, хромирование, золочение, серебрение).

С помощью электролиза осуществляют очистку металлов от примесей.

Исключительное значение имеет электролиз в получении алюминия из расплава бокситов.

7. Электрический ток в газе обусловлен направленным движением электронов, отрицательных и положительных ионов.

8. Электрические разряды в газах принято делить на самостоятельные и несамостоятельные.

9. **Несамостоятельный разряд** наблюдается только в присутствии ионизатора, благодаря которому в газе появляются свободные электроны и ионы. Возникающий при несамостоятельном разряде ток при некотором напряжении достигает своего наибольшего значения, которое называют током насыщения. Сила тока насыщения определяется мощностью ионизатора.

10. **Самостоятельные разряды** происходят при большой напряженности электрического поля. В воздухе при нормальных условиях такой разряд возможен при напряженности не менее  $2 \cdot 10^5$  В/м. Примером самостоятельного разряда в природе является молния.

11. Знание законов электрического тока в газе позволило получить так называемый дуговой разряд, который находит широкое применение в технике (дуговые источники света, электрические сварки, электросварка и т. д.).

12. Вакуум — состояние заключенного в сосуд газа при давлениях значительно ниже атмосферного. В зависимости от соотношения между длиной свободного пробега  $\bar{\lambda}$  атомов или молекул газа и размером  $d$  сосуда (прибора) различают низкий вакуум ( $\bar{\lambda} \ll d$ , давление выше  $10^2$  Па), средний вакуум ( $\bar{\lambda} = d$ , давление от  $10^2$  до  $10^{-1}$  Па), высокий вакуум ( $\bar{\lambda} \gg d$ , давление от  $10^{-1}$  до  $10^{-5}$  Па), сверхвысокий вакуум (область давления ниже  $10^{-5}$  Па).

13. Электрический ток в вакууме представляет собой направленное движение электронов, полученных в результате термоэлектронной эмиссии (в основном) и других эмиссионных явлений.

14. Изучение законов, характеризующих прохождение тока через вакуум, позволило создать ряд широко используемых в технике электронно-вакуумных приборов, в том числе электронные лампы и электронно-лучевые трубки.

15. Вещества, которые по своим электрическим свойствам занимают промежуточное положение между проводниками и диэлектриками, называют полупроводниками. Концентрация свободных электронов в полупроводниках в десятки и сотни миллиардов раз ниже, чем в металлах. При нагревании удельное сопротивление полупроводников уменьшается.

16. Электрический ток в полупроводниках представляет собой движение электронов и дырок.

17. Проводимость чистых полупроводников называют собственной. Проводимость полупроводников с примесью называют примесной.

18. Собственная проводимость полупроводников складывается из электронной и дырочной проводимостей. В химически чистом полупроводнике электронный ток равен дырочному. В полупроводниках  $n$ -типа, с донорной примесью, преобладает электронная проводимость, а в полупроводниках  $p$ -типа, с акцепторной примесью, — дырочная проводимость.

19. Полупроводники получили широкое применение в науке, технике и быту. В настоящее время используются полупроводниковые источники тока, транзисторные радиоприемники, полупроводниковые реле.

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ

1. Сформулируйте основные положения классической электронной теории проводимости металлов.
2. Какой классический эксперимент подтвердил существование в металлах электронов? Объясните его сущность.
3. Как согласовать очень малую величину средней скорости электронов в проводнике (примерно  $0,0008$  м/с) с практически мгновенной передачей электрических, например телеграфных, сигналов на очень большие расстояния?
4. Какие вещества относят к электролитам? Чем обусловлена электрическая проводимость электролитов? Что такое электролитическая диссоциация? молизация?
5. Что представляет собой электрический ток в электролитах?
6. Что называется электролизом? Напишите и сформулируйте первый закон Фарадея для электролиза. Что такое электрохимический эквивалент?
7. Напишите и сформулируйте второй закон Фарадея для электролиза. Что такое химический эквивалент?
8. Как записывают и формулируют объединенный закон Фарадея для электролиза? Какой физический смысл постоянной Фарадея для электролиза?
9. Объясните, как определяют значение элементарного заряда из закономерностей электролиза и как устанавливают закон дискретности электрических зарядов?
10. Что представляет собой электрический ток в газах?
11. В газе происходит самостоятельный разряд. Зависит ли сила тока насыщения от химического состава газа при прочих равных условиях?
12. В какой области напряжений выполняется закон Ома для тока в газе и как его записывают?
13. Опишите и объясните особенности самостоятельного газового разряда.
14. Опишите виды самостоятельного разряда в газах (тлеющего, коронного, дугового и искрового). Как их используют в технике?
15. Что такое плазма? Каковы ее особенности?
16. Что такое вакуум?
17. Что представляет собой электрический ток в вакууме?
18. Что представляет собой полупроводник? Что представляет собой электрический ток в полупроводниках?
19. Что называют собственной проводимостью? Какую проводимость называют примесной? дырочной? Что такое электронная проводимость?
20. Чем отличается полупроводник  $n$ -типа от полупроводника  $p$ -типа?

# ГЛАВА 10 ЭЛЕКТРОМАГНЕТИЗМ

## 10.1. Магнитное поле и его основные характеристики

**Магнитное поле.** Термин «магнитное поле» ввел в 1845 г. английский физик М. Фарадей, считавший, что как электрические так и магнитные взаимодействия осуществляются посредством единого материального поля. Классическая теория электромагнитного поля была создана английским физиком Дж. К. Максвеллом (1873), квантовая теория — в 1920-х гг.

Магнитным полем называют такую материальную среду, которая, занимая какую-либо часть пространства, вызывает действие особых сил, называемых магнитными, на находящиеся в нем движущиеся электрические заряды и проводники с током.

Источниками макроскопического магнитного поля являются намагниченные тела, проводники с током и движущиеся электри-

чески заряженные тела. Природа этих источников едина: магнитное поле возникает в результате движения заряженных микрочастиц — электронов, протонов, ионов, а также благодаря наличию у микрочастиц собственного магнитного момента. Переменное магнитное поле возникает также при изменении во времени электрического поля.

**Взаимодействие токов.** Если по двум длинным гибким параллельным проводникам пропускать постоянные токи одинакового на-

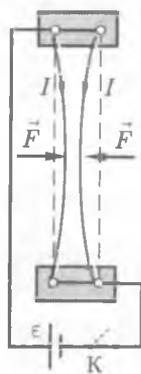


Рис. 10.1

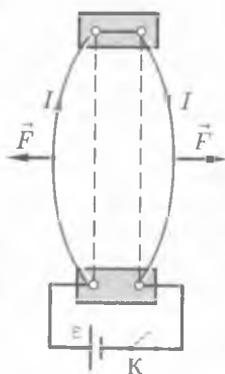


Рис. 10.2

правления, то проводники притягиваются друг к другу (рис. 10.1). Если же направления токов в этих проводниках взаимно противоположны, то проводники отталкиваются друг от друга (рис. 10.2).

Согласно теории близкодействия силовое взаимодействие тел на расстоянии всегда осуществляется посредством поля. Наблюдаемое взаимодействие проводников с током не может быть вызвано электрическим полем по следующим причинам. Во-первых, можно увидеть, что прекращение тока в проводниках (например, при размыкании цепи) приводит к исчезновению сил взаимодействия между проводниками, вызвавших их прогибание, хотя заряды на проводниках и их электрические поля остаются. Следовательно, обнаруженное взаимодействие свойственно только движущимся зарядам. Во-вторых, взаимодействуя посредством электрического поля, неподвижные одноименные заряды всегда отталкиваются. А рассмотренный эксперимент показывает, что когда электроны (т. е. одноименные заряды) движутся по проводникам в одном направлении, проводники притягиваются друг к другу.

Таким образом, мы установили, что воздействие электрических токов друг на друга не может быть объяснено кулоновским взаимодействием между электрическими зарядами. Какое же поле существует вокруг движущихся электрических зарядов, обуславливая взаимодействие проводников с током?

В 1820 г. датский физик Х. К. Эрстед проделал следующий опыт. Он поместил медный проводник над установившейся в магнитном поле Земли магнитной стрелкой, расположив этот проводник вдоль магнитной оси стрелки (рис. 10.3, а). При пропускании по проводнику тока магнитная стрелка отклонялась (рис. 10.3, б), причем направление ее отклонения зависело от направления тока

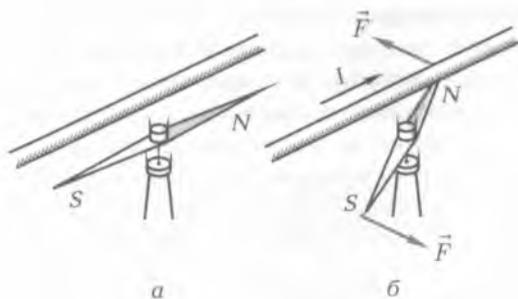


Рис. 10.3

в проводнике. Известно, что магнитная стрелка отклоняется под действием магнитного поля. Таким образом, опыт Эрстеда показал, что *вокруг проводника с током существует магнитное поле*.

Совокупность явлений, связанных с взаимодействием между электрическими токами, между электрическими токами и магнитами и между магнитами, называется *магнетизмом*. Это взаимодействие осуществляется посредством магнитного поля.

Опыт Эрстеда, опыты Ампера и других исследователей показали, что магнитное поле возникает вокруг любых движущихся электрических зарядов. Впоследствии, когда было установлено, что любое вещество состоит из атомов, в которых электроны движутся вокруг ядра, образуя круговые токи, стало ясно, что магнетизм, обнаруживаемый у ряда веществ, тоже обусловлен движущимися электрическими зарядами. Следовательно, любое проявление магнетизма есть *электромагнетизм* — совокупность электрических и магнитных явлений, связанных с движением заряженных тел и частиц.

Согласно современным научным представлениям,

**магнитное поле есть вид материи, посредством которого взаимодействуют между собой движущиеся электрические заряды.**

Магнитное поле является составной частью электромагнитного поля.

Магнитное поле создается движущимися электрическими зарядами и переменными электрическими полями и действует только на движущиеся электрические заряды. Неподвижные заряды магнитного поля не создают и не испытывают силового воздействия со стороны магнитного поля. (На намагниченные тела магнитное поле действует независимо от того, неподвижны они или движутся.)

Магнитное поле, созданное постоянным электрическим током, т. е. поле, характеристики которого с течением времени не изменяются, называют *стационарным* (постоянным).

Таким образом, причиной возникновения магнитного поля является любое изменение электрического поля, в том числе и связанного с движением электрического заряда. Поскольку всякое движение относительно, для любого заряда всегда можно выбрать такую систему отсчета, в которой он будет покоиться, и одновременно бесконечное множество систем отсчета, в которых он будет двигаться с самыми различными скоростями. Это, в свою очередь, приводит к тому, что в одних системах отсчета наблюдатель будет регистрировать магнитное поле, со-

данное рассматриваемым зарядом, а в других в это же самое время нет.

Изучая электростатическое и гравитационное поля, мы не встречались с аналогичным их свойством. Характеристики электростатического и гравитационного полей не зависели от того, с какой системой отсчета был связан наблюдатель. Это определяло *потенциальность* (консервативность) этих полей и характер действующих в них сил. *Принципиальное отличие магнитного поля от электростатического и гравитационного состоит в непотенциальности (неконсервативности).*

Направление магнитного поля определяется по ориентации свободной магнитной стрелки (стрелки, которая может поворачиваться как в горизонтальной, так и вертикальной плоскостях).

Основной силовой характеристикой магнитного поля служит *вектор магнитной индукции  $\vec{B}$* . Условились считать, что вектор магнитной индукции  $\vec{B}$  в произвольной точке поля совпадает по направлению с силой, которая действует на северный полюс бесконечно малой магнитной стрелки, помещенной в эту точку поля. Такая магнитная стрелка не может своим присутствием искажать то поле, в которое она вносится. Сила, действующая со стороны магнитного поля на южный полюс стрелки, направлена в сторону, противоположную вектору  $\vec{B}$ . Оба полюса такой магнитной стрелки лежат в бесконечно близких точках поля, так что силы, действующие на оба полюса, численно равны друг другу. Следовательно, в магнитном поле на магнитную стрелку действует пара сил, поворачивающая ее таким образом, чтобы ось стрелки, соединяющая южный полюс с северным, совпадала с направлением поля, т. е. с вектором  $\vec{B}$ .

Магнитные поля, в каждой точке которых действуют одинаковые по величине и направлению магнитные силы, называются *однородными*. Силовые линии однородного магнитного поля параллельны друг другу, а количество силовых линий через единичную площадку в любой области поля одинаково.

**Линии магнитной индукции.** Для графического изображения магнитных полей удобно пользоваться линиями магнитной индукции.

Линиями магнитной индукции называют линии, проведенные так, что вектор  $\vec{B}$  в каждой точке этой линии направлен по касательной к ней.

Проведем сравнение линий магнитной индукции с силовыми линиями электростатического поля. Силовые линии электростати-

ческого поля разомкнуты, они начинаются на положительных зарядах, оканчиваются на отрицательных зарядах и вблизи от заряженного проводника направлены перпендикулярно его поверхности. Линии магнитной индукции, например постоянного магнитного поля, выходят из северного полюса и входят в южный полюс — они замкнуты. Магнит всегда имеет два полюса — северный и южный, однако разделить их нельзя. Со времен А. Ампера, который дал объяснение электрической природе магнетизма, известно, что магнетизма как особой субстанции не обнаружено, что те «магнитные заряды», о которых говорил У. Гильберт, и «магнитные массы», на существование которых указывал Ш. Кулон, являются абстракциями. Однако в последнее время происходят (правда, пока безуспешные) поиски *монополь Дирака*, отдельных «магнитных зарядов», существование которых следует из его теории.

Магнитные поля непотенциальны (неконсервативны), т. е. работа сил поля существенно зависит не только от положения начальной и конечной точек перемещения объекта в магнитном поле, но и от траектории его движения. Это не позволяет ввести понятие потенциала магнитного поля аналогично потенциалу гравитационного или электростатического поля. Силы, действующие на объекты в магнитном поле, не являются центральными. Каждая силовая линия поля является замкнутой. Поля, силовые линии которых замкнуты, как у магнитного поля, называются *вихревыми*. Распространение вихревых (нестационарных) магнитных полей происходит со скоростью света в вакууме.

Для магнитных полей, как и для всех других, известных в современной физике, справедлив *принцип суперпозиции*: поля, одновременно существующие в какой-то точке пространства, действуют на любой объект, помещенный в эту точку, независимо друг от друга. Каждое поле действует на объект точно так же, как и в отсутствие других полей.

Магнитное поле может существовать как в вакууме, так и в любом веществе. При этом магнитное поле, созданное в различных веществах, может быть сильнее или слабее, чем поле, созданное теми же источниками в вакууме.

**Магнитное поле тока.** Электрический ток, протекающий по проводнику, создает в пространстве, окружающем проводник, магнитное поле (опыт Эрстеда). Модуль и направление вектора магнитной индукции в любой точке магнитного поля зависит от силы тока в проводнике, а также от магнитных свойств среды, в которой находятся проводник и рассматриваемая точка. Существенно, что магнитное поле в данной точке создается одновременно всеми уча-

отдельными участками проводника, по которому течет ток. Согласно принципу суперпозиции полей вектор магнитной индукции поля в произвольной точке равен геометрической сумме векторов магнитных индукций полей, создаваемых всеми участками проводника.

Если некоторый проводник с током силы  $I$  создает в вакууме магнитное поле, вектор магнитной индукции которого в данной точке равен  $\vec{B}_0$ , то в однородной изотропной среде, заполняющей все пространство, где имеется магнитное поле, в этой же точке будет создаваться магнитное поле с индукцией  $\vec{B}$ :

$$\vec{B} = \mu \vec{B}_0$$

или

$$B = \mu B_0 \quad (10.1)$$

где  $\mu$  — магнитная проницаемость среды; она показывает, во сколько раз при заданных токах, создающих магнитное поле, магнитная индукция в рассматриваемой точке однородной изотропной среды, заполняющей все поле, больше (или меньше), чем в вакууме.

Направление вектора магнитной индукции поля, создаваемого проводником с током, определяется по **правилу буравчика** (рис. 10.4):

если движение острия буравчика с правой резьбой совпадает с направлением тока в проводнике, то направление вектора магнитной индукции совпадает с направлением вращения рукоятки буравчика.

Весьма длинный прямолинейный проводник (бесконечный проводник) с током  $I$  создает в данной среде на расстоянии  $R$  от проводника (см. рис. 10.4) магнитное поле с индукцией  $B$ , по модулю равной

$$B = \mu_0 \mu \frac{I}{2\pi R} \quad (10.2)$$

где  $\mu$  — магнитная проницаемость среды;  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м — множитель размерности, называемый **магнитной постоянной**.

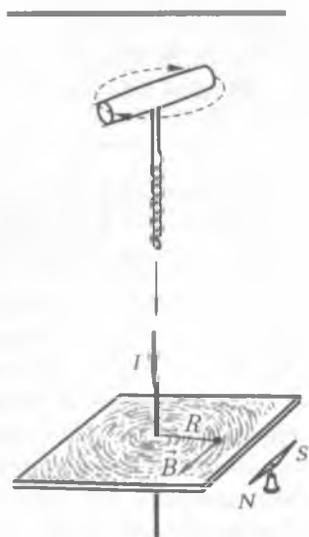


Рис. 10.4

## Произведение

$$\mu_a = \mu_0 \mu, \quad (10.3)$$

входящее в формулу (10.2), называют *абсолютной магнитной проницаемостью вещества*.

(Практически прямолинейный проводник считается бесконечно длинным, если можно считать, что расстояние от его конца до точки, где отыскивается индукция магнитного поля, намного больше, чем  $R$ .)

**Напряженность магнитного поля.** Согласно формулам (10.2) и (10.3) имеем  $B/B_0 = \mu_a/\mu_0$ , т. е.  $B/\mu_a = B_0/\mu_0$ .

Равенство этих двух отношений для любой среды и вакуума означает, что должна быть характеристика магнитного поля, не зависящая от свойств среды, в которой это поле существует. Ее обозначают  $H$  и называют *напряженностью магнитного поля* в данной точке. Следовательно,

$$H = \frac{B}{\mu_a} = \frac{B_0}{\mu_0 \mu},$$

откуда

$$B = \mu_a H = \mu_0 \mu H.$$

Напряженность магнитного поля является векторной величиной, характеризующей магнитное поле без учета намагничивания среды, в которой это поле существует. По направлению вектор магнитной напряженности совпадает с направлением вектора магнитной индукции в каждой данной точке магнитного поля:

$$\vec{B} = \mu_0 \mu \vec{H}.$$

Проводник в форме кругового витка радиусом  $R$ , по которому протекает ток  $I$ , создает магнитное поле, магнитная индукция которого в центре витка по модулю равна

$$B = \mu_0 \mu \frac{I}{2R}. \quad (10.4)$$

Простейшим однослойным *соленоидом* (от греч. *соленидес* — трубообразный) называется цилиндрическая катушка, состоящая из большого числа витков проволоки, которые образуют витковую линию. Если длина соленоида  $l \gg R$ , то соленоид имеет концы, изображенное на рис. 10.5. Внутри соленоида вдали от его концов поле является однородным и линии магнитной индукции параллельны между собой. Вне соленоида поле неоднородное.

Для достаточно длинного соленоида с числом витков  $N$  и длиной  $l$  индукция магнитного поля в точках его оси, достаточно удаленных от концов соленоида,

$$B = \mu_0 n I, \quad (10.5)$$

где  $I$  — сила тока, протекающего по витку;  $n = N/l$  — число витков на единицу длины соленоида.

Соленоид, внутри которого помещен ферромагнитный стержень, называется *электромагнитом*.

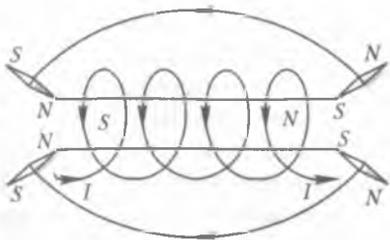


Рис. 10.5

**Магнитные поля в природе** разнообразны по масштабам и вызываемым эффектам. Магнитное поле Земли, образующее земную магнитосферу, простирается на 70...80 тыс. км в направлении на Солнце и на многие миллионы километров в других направлениях. Индукция магнитного поля Земли около  $5 \cdot 10^{-5}$  Тл. В околоземном пространстве магнитное поле образует магнитную ловушку для заряженных частиц высоких энергий — *радиационные пояса*. Происхождение магнитного поля Земли связывают с конвективными движениями проводящего жидкого вещества в земном ядре.

Из других планет Солнечной системы лишь Юпитер и Сатурн обладают собственными магнитными полями, достаточными для создания устойчивых магнитных ловушек. На Юпитере обнаружены поля с индукцией до  $10^{-3}$  Тл, а также ряд характерных явлений (магнитные бури, синхронное излучение в радиодиапазоне и др.), указывающих на значительную роль магнитного поля в планетарных процессах.

Межпланетное магнитное поле — это главным образом поле *солнечного ветра* (непрерывно расширяющейся плазмы солнечной короны). Вблизи орбиты Земли оно имеет значение порядка  $10^{-9}$ ... $10^{-8}$  Тл. Силовые линии регулярного межпланетного магнитного поля имеют вид идущих от Солнца раскручивающихся спиралей (их форма обусловлена сложением радиального движения плазмы и движения Солнца). Магнитное поле межпланетной плазмы имеет секторную структуру: в одних секторах оно направлено от Солнца, в других — к Солнцу. Регулярность межпланетного магнитного поля может нарушаться из-за развития различных видов плазменной неустойчивости, прохождения ударных волн и распространения потоков быстрых частиц, рожденных солнечными вспышками.

Во всех процессах на Солнце — вспышках, появлении протуберанцев, рождении солнечных космических лучей — магнитное поле играет важнейшую роль.

Удаленность звезд не позволяет пока наблюдать у них магнитных полей типа солнечных. В то же время более чем у двухсот называемых магнитных звезд обнаружены аномально большие поля, в миллиарды раз превышающие любое искусственно созданное магнитное поле. Поля порядка  $10^3$  Тл измерены у нескольких звезд — белых карликов. Особенно большие ( $10^6 \dots 10^7$  Тл) магнитные поля должны быть, по современным представлениям, у нейтронных звезд.

В явлениях микромира роль магнитных полей столь же важна как и в космических масштабах. Это объясняется существованием магнитного момента у всех частиц — структурных элементов вещества (электронов, протонов, нейтронов), а также действием магнитного поля на движущиеся электрические заряды.

## 10.2. Действие магнитного поля на проводник с током

**Закон Ампера.** Изучая, как проводники различной формы, по которым протекает ток, взаимодействуют между собой, Ампер установил, что это взаимодействие может рассматриваться как совокупность взаимодействий сколь угодно малых участков этих проводников с током (элементов тока).

*Элементом тока* называют векторную величину  $I\vec{\Delta l}$ , равную произведению силы тока  $I$  в проводнике на длину  $\Delta l$  данного участка проводника. Направление элемента тока совпадает с направлением тока на этом участке проводника.

Исследования Ампера показали, что магнитное поле действует на каждый элемент тока любого проводника, находящегося в этом поле, с силой, значение которой определяется по формуле

$$F = I\Delta l B \sin \alpha, \quad (10.6)$$

где  $\alpha$  — угол между элементом тока  $I\vec{\Delta l}$  и направлением магнитной индукции  $\vec{B}$  (рис. 10.6).

Если магнитное поле является однородным и проводник длиной  $l$  целиком находится в нем, то формула (10.6) принимает вид

$$F = IlB \sin \alpha. \quad (10.7)$$

Силу, действующую на проводник с током (или элемент тока) в магнитном поле, называют *силой Ампера*, а формулы (10.6) и (10.7) являются выражением *закона Ампера*.  
 Если  $\sin \alpha = 1$ , то  $F = IBl$ , откуда

$$B = \frac{1}{I} \frac{F}{l}. \quad (10.8)$$

Из формулы (10.8) следует, что магнитная индукция  $B$  численно равна силе, действующей со стороны поля на единицу длины проводника, по которому течет электрический ток единичной силы и который расположен перпендикулярно направлению магнитного поля. Таким образом, *магнитная индукция является силовой характеристикой магнитного поля*, подобно тому, как напряженность  $\vec{E}$  является силовой характеристикой электрического поля.

Закон Ампера, записанный в формах (10.6) и (10.7), не указывает направление силы  $\vec{F}$  и поэтому не определяет ее полностью. Как показали опыты, направление силы  $\vec{F}$  можно найти по следующему правилу.

**Правило левой руки:** если расположить левую руку так, чтобы четыре вытянутых пальца были направлены по току в проводнике, а перпендикулярная проводнику составляющая вектора индукции магнитного поля входила в ладонь, то отогнутый под прямым углом большой палец покажет направление силы Ампера, с которой магнитное поле действует на этот проводник с током (элемент тока).

Это правило очень удобно применять, когда элемент  $\Delta \vec{l}$  проводника с током перпендикулярен направлению магнитного поля. Во всех остальных случаях оно нуждается в дополнительных пояснениях. Для отыскания направления силы  $\vec{F}$  лучше пользоваться более универсальным правилом:

вектор  $\vec{F}$  направлен перпендикулярно плоскости, образованной векторами  $\Delta \vec{l}$  и  $\vec{B}$  таким образом, чтобы из конца вектора  $\vec{F}$  вращение от вектора  $\Delta \vec{l}$  к вектору  $\vec{B}$  по кратчайшему пути происходило против часовой стрелки. Иными словами, вектор  $\vec{F}$  совпадает по направлению с векторным произведением  $[\Delta \vec{l}, \vec{B}]$ .

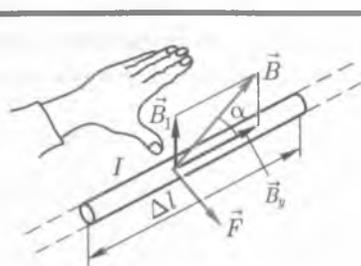


Рис. 10.6

Закон Ампера в векторной форме записывается следующим образом:

$$\vec{F} = I[\Delta\vec{l}, \vec{B}]. \quad (10.9)$$

В заключение остановимся на существенной особенности сил электромагнитного взаимодействия, определяемой законом Ампера. В электростатике мы имели дело с центральными силами, т. е. как сила взаимодействия между двумя точечными зарядами направлена по линии, соединяющей эти заряды. Силы же электромагнитного взаимодействия, как это следует из закона Ампера (10.9), не являются центральными. Они всегда направлены перпендикулярно линиям магнитной индукции и проводникам с током, т. е. их абсолютные значения и направления существенным образом зависят от ориентации в магнитном поле рассматриваемых элементов проводников с током.

**Сила взаимодействия параллельных токов.** Если по параллельным проводникам идут токи одного направления, то проводники притягиваются друг к другу (рис. 10.7), а если направления токов взаимно противоположны, то проводники отталкиваются друг от друга (рис. 10.8). Зависимость направления сил магнитного взаимодействия параллельных токов от направлений этих токов можно объяснить, используя правило правого винта и левой руки. (Векторы этих сил лежат в одной плоскости с проводниками, по которым идут токи.)

Определим силу магнитного взаимодействия токов  $I_1$  и  $I_2$ , текущих по участкам одинаковой длины  $l$  бесконечно длинных параллельных проводников, находящихся в вакууме на расстоянии  $r$  друг от друга. Будем наблюдать взаимодействие проводников изображенных на рис. 10.7, сверху. Тогда в проекции на  $CD$  поперечные сечения этих проводников изобразятся маленькими кружками с центрами в точках  $C$  и  $D$ , а линии магнитной индукции полей токов  $I_1$  и  $I_2$ , направленных вертикально вверх, — окружностями большого диаметра (рис. 10.9). На этом рисунке

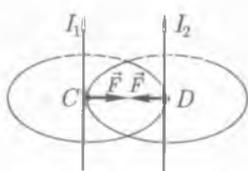


Рис. 10.7

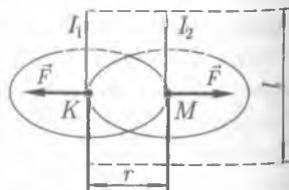


Рис. 10.8

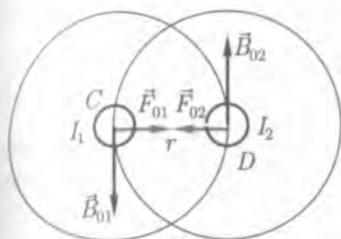


Рис. 10.9

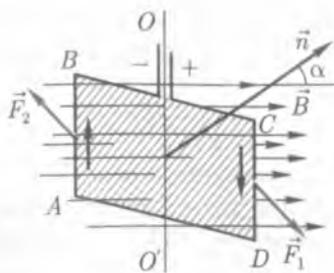


Рис. 10.10

$B_{01}$  — индукция магнитного поля, создаваемого током  $I_1$  в точке  $D$ ;  $B_{02}$  — индукция магнитного поля тока  $I_2$  в точке  $C$ ;  $F_{01}$  — сила, с которой магнитное поле тока  $I_2$  действует на ток  $I_1$ ;  $F_{02}$  — сила, с которой магнитное поле тока  $I_1$  действует на ток  $I_2$ .

Согласно закону Ампера (10.7) и формуле (10.2) для индукции магнитного поля прямолинейного тока можно записать

$$F_{01} = I_1 l B_{02}; \quad (10.10)$$

$$F_{02} = I_2 l B_{01}; \quad (10.11)$$

$$B_{02} = \mu_0 \mu I_2 / (2\pi r); \quad (10.12)$$

$$B_{01} = \mu_0 \mu I_1 / (2\pi r). \quad (10.13)$$

Подставив (10.12) в (10.10) и (10.13) в (10.11), получим

$$F_{01} = \frac{\mu_0 \mu I_1 I_2}{2\pi r} l; \quad F_{02} = \frac{\mu_0 \mu I_2 I_1}{2\pi r} l.$$

Из сравнения последних формул видно, что  $F_{01} = F_{02}$ , а с учетом направления этих сил  $\vec{F}_{01} = -\vec{F}_{02}$  в полном соответствии с третьим законом Ньютона. Следовательно, в вакууме (воздухе) сила магнитного взаимодействия параллельных токов

$$F_0 = \frac{\mu_0 \mu I_1 I_2}{2\pi r} l. \quad (10.14)$$

**Рамка с током в однородном магнитном поле.** На рис. 10.10 изображена прямоугольная электропроводящая рамка  $ABCD$ , подвешенная на сплетенных между собой мягких проводах. Будем считать, что стороны рамки  $AB$ ,  $BC$ ,  $CD$  и  $DA$  являются жесткими проводниками. Введем обозначения:  $|AB| = |CD| = l$ ;  $|BC| = |DA| = r$ .

Поскольку вращающий момент равен произведению силы на плечо, для пары сил  $|F_1| = |F_2| = F$  имеем

$$M = F \frac{r}{2} \sin \alpha + F \frac{r}{2} \sin \alpha = Fr \sin \alpha. \quad (10.15)$$

Воспользуемся законом Ампера, учитывая при этом, что направление тока в проводниках  $AB$  и  $CD$  перпендикулярно направлению вектора индукции магнитного поля:

$$F = BIl.$$

Подставляя это выражение в (10.15), получим

$$M = BIlr \sin \alpha.$$

Заметим, что произведение  $lr$  есть площадь рамки  $S$ . Тогда

$$M = BIS \sin \alpha. \quad (10.16)$$

Максимального значения вращающий момент достигнет тогда когда угол  $\alpha = 90^\circ$  ( $\sin 90^\circ = 1$ ):

$$M_m = BIS. \quad (10.17)$$

Величину

$$P_m = \frac{M_m}{B} = IS \quad (10.18)$$

называют **магнитным моментом**. Магнитный момент характеризует магнитные свойства замкнутого контура с током.

**Магнитный поток.** Из (10.17) имеем

$$\frac{M_m}{I} = BS.$$

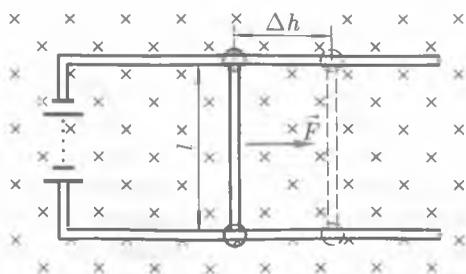
Если  $B$  определяет густоту (плотность) линий магнитной индукции, то произведение  $BS$  соответствует количеству этих линий, пронизывающих контур рамки. При произвольной ориентации рамки в магнитном поле следует учитывать угол  $\alpha$  между вектором  $\vec{B}$  и нормалью к плоскости рамки:

$$\frac{M}{I} = BS \cos \alpha. \quad (10.19)$$

Совокупность линий магнитной индукции, пронизывающих замкнутый контур произвольной формы, называют **магнитным потоком**  $\Phi$  сквозь этот контур:

$$\Phi = BS \cos \alpha. \quad (10.20)$$

Рис. 10.11



Магнитный поток в СИ выражают в веберах (Вб) в честь немецкого физика В. Вебера (1804 – 1891).

**Работа в магнитном поле.** Возьмем в качестве замкнутого контура прямоугольную электропроводящую рамку, одна сторона которой представляет подвижный проводник (рис. 10.11).

Поместим этот контур в однородное магнитное поле так, чтобы линии магнитной индукции были перпендикулярны плоскости контура. (На рис. 10.11 линии магнитной индукции направлены от читателя и изображены крестиками.) Если по рамке пропустить ток, то действующая на проводник сила Ампера заставит его перемещаться в направлении вектора этой силы. Пусть подвижный проводник, длину которого обозначим  $l$ , переместился на расстояние  $\Delta h$ . Совершенная при этом работа

$$\Delta A = BIl\Delta h. \quad (10.21)$$

Произведение длины  $l$  подвижного проводника на его перемещение  $\Delta h$  есть изменение площади контура  $\Delta S$ , что означает изменение магнитного потока сквозь этот контур. Тогда можно написать

$$\Delta A = I\Delta\Phi. \quad (10.22)$$

*Работа по перемещению проводника с током в магнитном поле пропорциональна силе тока в проводнике и изменению магнитного потока, пронизывающего контур, по которому течет ток.*

### 10.3. Практические применения свойств замкнутого проводника с током в магнитном поле

Силы, действующие на электрический ток в магнитном поле, широко пользуются в технике. Электродвигатели и генераторы, устройства для записи звука в магнитофонах, телефоны и микрофоны — во всех этих и во множестве других приборов и уст-

ройств используется взаимодействие токов, токов и магнитов и т. д.

**Электрический двигатель.** *Электродвигатель* — машина преобразующая электрическую энергию в механическую.

Основными частями электродвигателя являются: индуктор 1 — магнит или электромагнит, создающий магнитное поле; якорь 2 — вал с обмоткой из изолированного провода; коллектор 3 — устройство из двух полуколец, к которым прижимаются скользящие контакты 4 (щетки) для подведения к обмотке якоря тока (рис. 10.12).

Главная часть двигателя — это контур (рамка, катушка), расположенный в сильном магнитном поле электромагнита (рис. 10.13). (На рисунке 10.13 электромагнит не показан, показано только направление вектора  $\vec{B}$  индукции созданного им поля.) Такой контур в магнитном поле не вращается, а только поворачивается. Повернувшись и расположившись так, чтобы его плоскость была перпендикулярна линиям индукции поля, контур должен остановиться. Но если через каждую половину оборота изменять направление тока в нем на противоположное, то контур будет вращаться непрерывно. Изменение направления тока производится автоматически с помощью *коллектора* (см. рис. 10.12). Он состоит из двух металлических полуцилиндров, к которым присоединены концы контура. Через них и скользящие щетки контур присоединяется к источнику тока.

В реальных двигателях имеется не один, а несколько контуров, намотанных на железный сердечник (ротор двигателя).

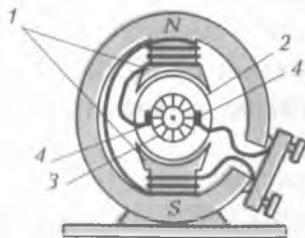


Рис. 10.12

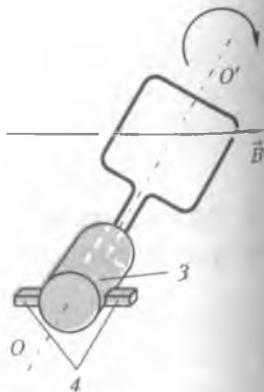


Рис. 10.13

При подключении к щеткам постоянного напряжения в обмотке якоря возникает электрический ток и в магнитном поле на обмотки действует пара одинаковых по модулю, но противоположных по направлению сил Ампера, стремящихся вращать якорь вокруг оси.

Пока в проводниках есть ток, якорь вращается. Укрепив на ось якоря шкив или соединив ось якоря с осью какой-либо машины, вращение якоря можно передать любой машине.

Один из первых электрических двигателей, пригодных для практического использования, был изобретен в 1834 г. российским электротехником Б. С. Якоби (1801—1874) и опробован для привода судна.

Выпускают электродвигатели любой мощности: от нескольких ватт (например, для электрических бритв) до сотен и тысяч киловатт, используемых на прокатных станах, кораблях; для приведения в движение колес электровоза, троллейбуса, трамвая, автобуса.

С помощью электродвигателя постоянного тока — стартера — производится запуск двигателя автомобиля.

**Электроизмерительные приборы.** Действие магнитного поля на проводник с током используется в электроизмерительных приборах магнитоэлектрической системы для измерения силы тока (амперметр) и напряжения (вольтметр).

Измеряемый электрический ток (или напряжение) пропускается через катушку 1, помещенную в магнитное поле постоянного магнита (рис. 10.14) и укрепленную на оси, на этой же оси укреплена стрелка 2. Внутри катушки расположен стержень 3 из мягкого железа. Такая конструкция обеспечивает радиальное направление линий магнитной индукции в той области, где находятся витки катушки. Например, при пропускании электрического тока через катушку возникает момент сил Ампера, вызывающий поворот катушки и соединенной с ней стрелки.

Угол поворота стрелки в приборах магнитоэлектрической системы пропорционален силе тока (или измеряемому напряжению). В данном случае для увеличения сопротивления прибора последовательно с катушкой подключают резистор с большим сопротивлением.

В настоящее время широкое распространение получили цифровые амперметры и вольтметры.

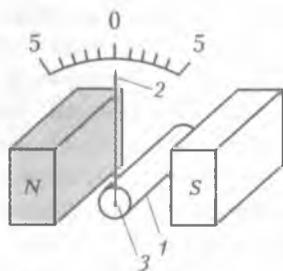


Рис. 10.14

## 10.4. Движение электрических зарядов в магнитном поле

**Геомагнитное поле.** Первые трактаты о геомагнитном поле появились в XVII в. К концу XIX в. была уже обстоятельно исследована структура этого поля, а с начала XX в. публиковались многочисленные гипотезы о его происхождении.

В одной из гипотез предполагалось существование железного ядра нашей планеты, которое сформировалось как постоянный магнит. В другой гипотезе образование магнитного поля Земли приписывалось космическим взаимодействиям. Выдвигалось также предположение о том, что существуют еще не известные законы природы, в силу которых любое вращающееся тело, например планета, обладает магнитным полем, причем напряженность такого поля зависит от массы и скорости вращения тела. В конце 1950-х гг. наибольшей известностью пользовалась гипотеза, согласно которой избыточный электрический заряд на поверхности Земли при суточном вращении создает наблюдаемое геомагнитное поле. Однако строгие расчеты, основанные на фактических данных, доказывали несостоятельность этих гипотез.

Дальнейшие исследования показали, что жидкое вещество, окружающее твердое внутреннее ядро Земли, обладает высокой электрической проводимостью и находится в состоянии конвективного движения. Движение электропроводящей жидкости влечет за собой появление электрических токов, а следовательно, и магнитных полей. Суперпозиция полей, образованных внутренними токами в оболочке ядра, создает глобальное магнитное поле Земли.

Напряженность геомагнитного поля не превышает на экваторе 25 А/м, а на полюсах — 48 А/м. Это очень слабое поле, уступающее по напряженности полю обычного школьного магнита несколько десятков раз.

Магнитная ось Земли не совпадает с географической. Она составляет с ней угол  $11,5^\circ$ . Южный магнитный полюс расположен в Арктике, а северный — в Антарктике.

**Пояса радиации.** Уже первые космические исследования, выполненные в 1958 — 1962 гг., показали, что в околоземном пространстве имеются области, сравнительно плотно заселенные заряженными частицами. Эти области окружают Землю по геомагнитному экватору и их называют *поясами радиации*.

Внутренний пояс радиации населен протонами. Он расположен между широтами  $\pm 30^\circ$  на высотах 2 400... 5 600 км. Вто-

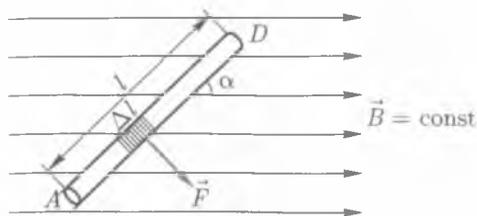


Рис. 10.15

рой пояс, охватывающий Землю более широким кольцом на высотах 12...20 тыс. км, состоит как из протонов, так и из электронов. Наконец, на высотах 50...60 тыс. км выделяется третий пояс, состоящий из электронов.

Существование поясов радиации обусловлено взаимодействием потоков заряженных частиц с магнитным полем Земли.

**Сила Лоренца.** Влетая в магнитное поле Земли, заряженная частица испытывает действие силы, которую называют *силой Лоренца* (в честь голландского физика-теоретика Г. А. Лоренца). Сила Лоренца имеет ту же природу, что и сила Ампера. Выведем формулу для определения силы Лоренца.

Сила, действующая на проводник с током в магнитном поле, вызвана наличием направленного движения электронов в проводнике. Следовательно, магнитное поле действует на каждый движущийся электрон.

Сила, с которой магнитное поле действует на движущийся в нем электрон, получила название лоренцевой силы  $F_L$ .

Пусть в однородном магнитном поле (рис. 10.15) с индукцией  $B$  под углом  $\alpha$  к магнитным линиям расположен проводник  $AD$ .

Выделим участок этого проводника  $\Delta l$ . На этот участок со стороны магнитного поля будет действовать сила  $F$ , которую определим по закону Ампера:

$$F = BI\Delta l \sin \alpha, \quad (10.23)$$

где  $I$  — сила проходящего по проводнику тока.

Но из электронной теории проводимости металлов известно, что

$$I = en_0 v S, \quad (10.24)$$

где  $e$  — заряд электрона;  $n_0$  — число свободных электронов в единице объема проводника (концентрация);  $v$  — средняя скорость

упорядоченного движения электронов;  $S$  — площадь поперечного сечения проводника.

Подставляя значение  $I$  в формулу (10.23), получим

$$F = Ben_0v\Delta lS\sin\alpha. \quad (10.25)$$

Вычислим силу Лоренца  $F_\Lambda$ , с которой магнитное поле действует на каждый движущийся электрон. Для этого необходимо подсчитать число свободных электронов в участке проводника длиной  $\Delta l$  и силу  $F$  разделить на число  $n$  электронов в этом участке, т.е.

$$F_\Lambda = \frac{F}{n}. \quad (10.26)$$

Если в единице объема будет  $n_0$  свободных электронов, то в проводнике длиной  $\Delta l$  при поперечном сечении  $S$  их число составит

$$n = n_0\Delta lS. \quad (10.27)$$

Следовательно, лоренцева сила, действующая со стороны магнитного поля на каждый электрон, будет равна с учетом формул (10.25) и (10.27) после их подстановки в (10.26)

$$F_\Lambda = Bev\sin\alpha. \quad (10.28)$$

Под углом  $\alpha$  следует понимать угол между направлениями магнитных линий и средней скорости упорядоченного движения электронов.

Направление лоренцевой силы определяется по правилу левой руки, причем за направление тока принимается направление, противоположное движению электронов.

В общем случае формула (10.28) записывается следующим образом:

$$F_\Lambda = B|q|v\sin\alpha.$$

В векторной форме она имеет вид

$$\vec{F}_\Lambda = q[\vec{B}, \vec{v}]. \quad (10.29)$$

Сила Лоренца всегда направлена перпендикулярно скорости движения заряженной частицы и сообщает ей нормальное (центростремительное) ускорение. Следовательно, сила Лоренца не совершает работы. Она изменяет только направление скорости движения частицы в магнитном поле. Абсолютное значение скорости заряда и его кинетическая энергия при движении в магнитном поле не изменяются.

В общем случае на движущийся заряд помимо магнитного поля с индукцией  $\vec{B}$  может действовать еще и электрическое поле с напряженностью  $\vec{E}$ . Тогда результирующая сила  $\vec{F}$ , приложенная к заряду, равна геометрической сумме силы  $\vec{F}_{эл} = q\vec{E}$ , действующей на заряд со стороны электрического поля, и силы Лоренца:

$$\vec{F} = q\vec{E} + q[\vec{v}, \vec{B}]. \quad (10.30)$$

Соотношение (10.30) называется формулой Лоренца. Часто именно эту результирующую силу называют силой Лоренца.

**Движение заряженных частиц в однородном магнитном поле.** На рис.

10.16 изображено однородное магнитное поле, силовые линии которого перпендикулярны плоскости рисунка и направлены от читателя.

Электрон, двигаясь со скоростью  $v$  перпендикулярно силовым линиям, испытывает действие лоренцевой силы  $F_{\Lambda} = Bev$ , так как  $\alpha = 90^\circ$ . По правилу левой руки находим направление лоренцевой силы. Под действием этой силы траектория электрона станет искривляться, но с изменением направления движения электрона изменится и направление лоренцевой силы, которая будет всегда действовать по нормали к траектории электрона. Так как в однородном поле сила  $F_{\Lambda}$  будет сохраняться постоянной по модулю, а направление ее всегда нормально к траектории электрона, то очевидно, эта сила будет являться центростремительной:  $F_{\Lambda} = F_{цс}$ , т.е.  $Bev = mv^2/r$ , а движение электрона будет происходить по окружности. Отсюда радиус  $r$  окружности, описываемой электроном, определяется по формуле

$$r = \frac{mv}{Be}. \quad (10.31)$$

Время, в течение которого электрон опишет полную окружность, т.е. пройдет путь  $2\pi r$ , будет равно

$$T = \frac{2\pi r}{v}. \quad (10.32)$$

Определив  $v$  из (10.31),  $v = Be r/m$ , и подставив в выражение (10.32), получим



Рис. 10.16

$$T = \frac{2\pi m}{Be}$$

(10)

Из полученной формулы видно, что время  $T$  не зависит от радиуса описываемой электроном окружности. Чем больше скорость движения электрона, тем больший радиус будет иметь окружность, описываемая им в том же магнитном поле.

## 10.5. Индукционные токи и их закономерности

**Явление электромагнитной индукции.** Явление обнаружено экспериментально английским физиком М. Фарадеем в 1831 г. (независимо от него американским ученым Дж. Генри в 1832 г.).

Рассмотрим основные опыты, раскрывающие сущность явления электромагнитной индукции. В качестве регистрирующей установки в них используется приемный контур, т. е. катушка или рамка, замкнутая на нуль-гальванометр (т. е. гальванометр с нулем посередине шкалы), позволяющий устанавливать наличие тока и его направление.

1. Постоянный магнит вставляют в приемный контур или вынимают из него (рис. 10.17). Можно надевать контур на неподвижный магнит или снимать с него. Мы увидим, что во время относительного перемещения магнита и приемного контура в последнем возникает электрический ток, называемый **индукционным**.

2. Приемный контур 1 располагают рядом с контуром 2, содержащим источник тока. Оба контура неподвижны (рис. 10.18) в приемном контуре возникает индукционный ток в момент замыкания либо размыкания цепи в контуре с источником тока или же в момент изменения силы тока в этой цепи с помощью реостата.

3. Приемный контур в виде рамки, замкнутой на гальванометр помещают в однородное магнитное поле (рис. 10.19). Если рамка

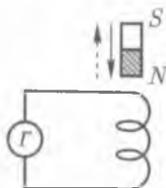


Рис. 10.17

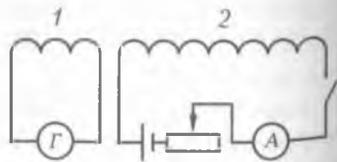


Рис. 10.18

двигается поступательно, не пересекая линий магнитной индукции (рис. 10.19, а), то индукционный ток в ней не возникает. Если же рамка вращается, пересекая линии индукции (рис. 10.19, б), то в ней возникает индукционный ток.

В опытах 1 – 3 происходит изменение магнитного потока, охватываемого приемным контуром. При этом в приемном контуре возникает индукционный ток, который существует все время, пока изменяется магнитный поток. Известно, что условием существования электрического тока в замкнутой цепи является наличие в этой цепи электродвижущей силы (ЭДС). Возникающая при изменении магнитного потока ЭДС получила название *ЭДС индукции*. Следовательно, при изменении магнитного потока, охватываемого контуром проводника, в контуре возникает ЭДС индукции, которая (если контур замкнут) создает в нем индукционный ток, продолжающийся все время, пока изменяется магнитный поток. Это явление называют *электромагнитной индукцией*.

Явление индукции можно объяснить на основе электронной теории. Во всех проводниках имеются электроны, их перемещение есть электрический ток, следовательно, на них действует сила со стороны внешнего поля, и электроны начнут перемещаться по направлению действия силы, определяемому правилом левой руки. Поэтому на одном конце проводника будет избыток электронов, а на другом — недостаток, в результате возникнет разность потенциалов, равная ЭДС индукции.

**Направление индукционного тока. Правило Ленца.** Направление индукционного тока  $I_{ин}$  зависит от характера изменения магнитного потока. Например, на рис. 10.20 показано, как изме-

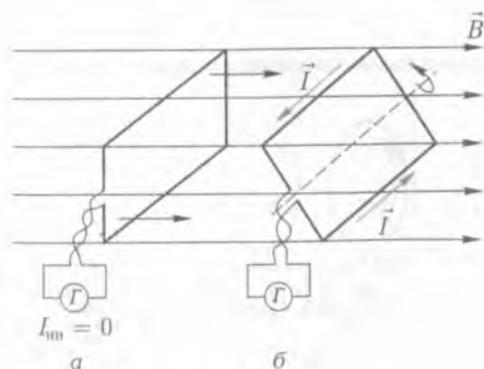


Рис. 10.19

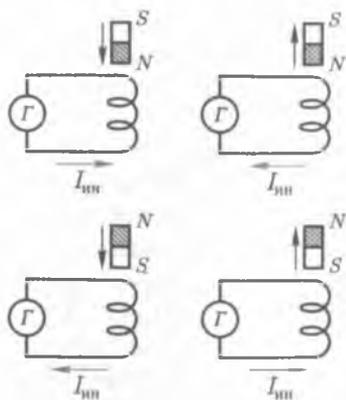


Рис. 10.20

миниевых кольца. Одно кольцо сплошное, а другое имеет разрез. Если поднести магнит к сплошному кольцу, то в нем возникнет индукционный ток, направленный таким образом, что создаваемое им магнитное поле будет отталкивать кольцо от подносимого к нему магнита и стержень с кольцом повернется, удаляясь от магнита.

Если же магнит удалять от кольца, то направление индукционного тока, возникающего в кольце, окажется таким, что магнитное поле начнет притягивать кольцо к магниту и стержень с кольцом повернется в другую сторону.

Если подносить магнит к кольцу с разрезом, то никакого взаимодействия не произойдет, так как разрез препятствует возникновению в кольце индукционного тока.

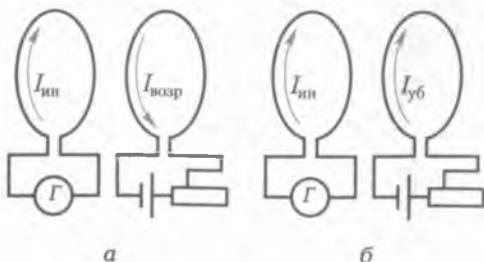


Рис. 10.21



Рис. 10.22

На основе подобных наблюдений русский ученый Э. Х. Ленц предложил следующее правило для определения направления тока, индуцируемого в проводнике: *индукционный ток всегда направлен так, что его магнитное поле противодействует тому изменению магнитного поля, которое вызывает этот ток.*

Индукционный ток возникает не только в замкнутом контуре, но и в проводнике, пересекающем линии магнитной индукции, если этот проводник входит в состав замкнутой цепи (рис. 10.23). Направление индукционного тока в этом проводнике определяется с помощью следующего правила.

**Правило правой руки:** если расположить правую руку так, чтобы линии индукции магнитного поля входили в ладонь, а отогнутый под прямым углом большой палец совпадал с направлением движения проводника, то четыре вытянутых пальца покажут направление индукционного тока, возникающего в этом проводнике.

**Закон электромагнитной индукции.** Закон экспериментальным путем установил М. Фарадей. Немецкий физик и естествоиспытатель Г. Гельмгольц показал, что основным закон электромагнитной индукции

$$E_i = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \quad (10.34)$$

является следствием закона сохранения энергии.

Выражение (10.34), называемое *законом Фарадея*, является универсальным: оно справедливо для всех возможных случаев электромагнитной индукции. Знак «-» показывает, что ЭДС

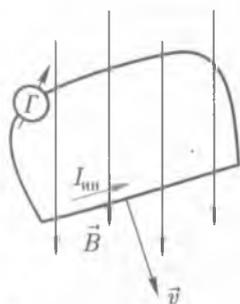


Рис. 10.23

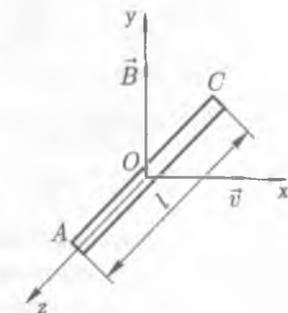


Рис. 10.24

индукции  $E_i$  направлена так, что магнитное поле индукционного тока препятствует изменению потока магнитной индукции: если поток увеличивается ( $\Delta\Phi > 0$ ), то  $E_i < 0$  и поле индукционного тока направлено навстречу потоку; если же поток уменьшается ( $\Delta\Phi < 0$ ), то  $E_i > 0$  и направление потока и поля индукционного тока совпадают.

Легко показать, что ЭДС электромагнитной индукции возникает не только в замкнутом проводнике, но и в отрезке проводника, пересекающем при своем движении линии индукции магнитного поля.

Для простоты будем считать, что отрезок прямолинейного металлического проводника  $AC$  длиной  $l$  движется с постоянной скоростью  $v$  в плоскости  $xOy$  перпендикулярно вектору  $\vec{B}$  магнитной индукции (рис. 10.24). При этом на электроны проводимости металла действует сила Лоренца  $\vec{F}_L$ . Она направлена вдоль проводника от  $A$  к  $C$  и численно определяется по формуле  $F_L = evB$ . Под действием силы Лоренца электроны перемещаются вдоль проводника и равномерность их распределения по объему проводника нарушается. Между его концами  $A$  и  $C$  возникает разность потенциалов  $\Delta\varphi = \varphi_A - \varphi_C$ , а внутри проводника — электрическое поле. Напряженность этого поля  $E = \Delta\varphi/l$  и направлена вдоль проводника от  $A$  к  $C$ . Сила  $eE$ , действующая на электрон со стороны электрического поля, противоположна по направлению силе Лоренца. При равенстве численных значений этих сил дальнейшее передвижение электронов по проводнику прекращается. Поэтому для равновесного состояния имеем

$$eE = evB,$$

или

$$\frac{\Delta\varphi}{l} = vB. \quad (10.35)$$

По закону Ома для разомкнутой цепи ( $I = 0$ )

$$\Delta\varphi = \Delta\varphi_A - \Delta\varphi_C = -E_l,$$

где  $E$  — ЭДС, приложенная в цепи, т. е. в проводнике  $AC$ . Так как на участке  $AC$  никаких гальванических элементов или других источников ЭДС нет, то естественно считать, что  $E = E_i$ . Заменяя разность потенциалов выражением из (10.35), получим  $E_i = -Blv$ .

Так как скорость  $v$  движения проводника вдоль оси  $Ox$  равна  $\frac{\Delta x}{\Delta t}$ ,

то  $E_i = -Bl \frac{\Delta x}{\Delta t}$ , но  $l\Delta x = \Delta S$  представляет собой площадь поверхно-

сти, описываемой проводником при его движении за время  $\Delta t$ , а  $B\Delta S = \Delta\Phi$  — магнитный поток сквозь эту поверхность. Следовательно, ЭДС выражается формулой

$$E_i = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \quad (10.36)$$

Этот результат по своей форме тождественен уравнению основного закона электромагнитной индукции (10.34). Однако смысл правой части этого уравнения для контура и отрезка проводника различен. В первом случае  $\Delta\Phi/\Delta t$  — скорость изменения магнитного потока сквозь поверхность, ограниченную контуром. Во втором — это отношение магнитного потока сквозь поверхность, описываемую проводником при его движении за бесконечно малый промежуток времени, к величине этого промежутка.

Выясним границы применимости закона электромагнитной индукции. В закон электромагнитной индукции входят ЭДС и скорость изменения магнитного потока. Это макрофизические величины, их область применения макроскопическая. В законе рассматриваются электрические и магнитные поля зарядов и токов в объемах, неизмеримо больших объемов атомов и молекул. Время изменения магнитного поля и существования электрического здесь гораздо больше, чем периоды внутриатомных и внутримолекулярных процессов. Кроме того, предполагается непрерывное изменение электрических и магнитных полей. Переход же в область атомных размеров, как показано в квантовой физике, приводит к скачкообразным изменениям всех характеристик, в том числе и рассматриваемых.

**Явление самоиндукции.** Самоиндукция — частный случай явления электромагнитной индукции. Если ток, созданный в каком-либо контуре подключенным к нему источником тока, изменяется, то меняется и индукция магнитного поля этого тока и, следовательно, создаваемый им магнитный поток. Поскольку этот переменный магнитный поток не только создается данным контуром с током, но им же самим и охватывается, то в контуре возникает ЭДС индукции. Явление возникновения ЭДС в проводнике с током при изменении собственного магнитного потока, создаваемого этим током, называют *самоиндукцией*, а возникающую ЭДС — ЭДС самоиндукции.

**ЭДС самоиндукции. Индуктивность.** Поскольку самоиндукция представляет собой разновидность явления электромагнитной индукции, то ЭДС самоиндукции  $E_c$  может быть определена по формулам, установленным для ЭДС индукции, а именно:

$$E_c = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}, \quad (10.37)$$

где  $\Delta\Phi/\Delta t$  — скорость изменения магнитного потока.

Кроме указанных общих формул для ЭДС самоиндукции существуют еще одна, специфическую формулу.

Магнитный поток, изменение которого вызывает появление ЭДС самоиндукции, создается током, текущим по данному проводнику, поэтому очевидно, что этот поток  $\Phi$  пропорционален силе тока в проводнике, т. е.

$$\Phi = LI, \quad (10.38)$$

где  $L$  — коэффициент пропорциональности, называемый *индуктивностью проводника*.

При  $L = \text{const}$   $\Delta\Phi = L\Delta I$ . Подставив это в формулу (10.37), получим

$$E_c = -L \frac{\Delta I}{\Delta t}, \quad (10.39)$$

Из (10.39) следует, что  $|L| = \frac{E_c \Delta t}{\Delta I}$ .

Отсюда видно, что *индуктивность проводника численно равна ЭДС самоиндукции, возникающей в данном проводнике при изменении в нем тока на единицу тока за единицу времени*.

Единицу индуктивности в СИ устанавливают из той же формулы.

$$\frac{1 \text{ В} \cdot 1 \text{ с}}{1 \text{ А}} = 1 \text{ Ом} \cdot \text{с} = 1 \text{ Гн (генри)}.$$

Следовательно, за единицу индуктивности в СИ — генри — принимают индуктивность такого проводника, в котором при изменении тока на 1 А за 1 с возникает ЭДС самоиндукции, равная 1 В.

Наблюдения и расчет показывают, что *индуктивность контура зависит от его формы, размеров, числа витков и магнитной проницаемости сердечника (если он помещен в контур)*.

Следует отметить, что вывод формулы (10.39) был сделан при условии, что индуктивность проводника является величиной постоянной. В этом случае ЭДС самоиндукции возникает в проводнике за счет изменения тока в нем.

Однако ЭДС самоиндукции может возникать в проводнике и при неизменном токе, если будет изменяться индуктивность этого проводника (например, при введении в контур или удалении из него ферромагнитного сердечника).

**Энергия магнитного поля.** Из уравнения (10.39) получим

$$E_c \Delta t = -L \Delta I. \quad (10.40)$$

Пусть сила тока в цепи, содержащей катушку, равна  $I$ . При размыкании цепи изменение силы тока  $\Delta I$  можно представить как разность конечного и начального значений:

$$\Delta I = 0 - I.$$

Теперь уравнение (10.40) можно переписать так:

$$E_c \Delta t = LI. \quad (10.41)$$

Умножим правую и левую части уравнения (10.41) на среднее значение силы тока за время  $\Delta t$ :

$$E_c \Delta t \frac{I}{2} = \frac{LI^2}{2}. \quad (10.42)$$

Заметим, что произведение  $\Delta t \frac{I}{2}$  равно заряду, прошедшему по цепи после отключения батареи. Следовательно,

$$q E_c = \frac{LI^2}{2}.$$

Левая часть полученного уравнения представляет собой работу тока, наведенного изменяющимся магнитным полем катушки. Отсюда ясно, что эта работа совершается за счет энергии магнитного поля, которая выражается формулой

$$E_{\text{м}} = \frac{LI^2}{2}. \quad (10.43)$$

Энергия магнитного поля равна половине произведения индуктивности проводника на квадрат силы тока в нем.

## 10.6. Переменный ток

**Получение переменной ЭДС.** Явления электромагнитной индукции широко используются в практической деятельности человека. Мир современной техники невозможно представить без переменного тока, возникающего под действием переменной ЭДС, которая изменяется по гармоническому закону.

Физические принципы получения переменного тока можно рассматривать на примере равномерного вращения прямоугольной рамки из проводящего материала в однородном магнитном поле (рис. 10.25). Рамку располагают таким образом, чтобы ее ось вращения была перпендикулярна силовым линиям поля. При вращении рамки ее плоскость составляет с направлением силовых линий угол  $\varphi$ , равномерно изменяющийся с течением времени. Магнитный поток, пронизывающий рамку, в любой момент времени по определению равен

$$\Phi = BS \cos \varphi,$$

а с учетом того, что при вращении рамки с угловой скоростью  $\omega$   $\varphi = \omega t$ , имеем  $\Phi = BS \cos \omega t$ .

Напомним, что ЭДС индукции согласно закону электромагнитной индукции можно выразить через измерение магнитного потока:

$$\varepsilon_i = - \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} = - \frac{\Delta (BS \cos \omega t)}{\Delta t} = B\omega S \sin \omega t.$$

Так как магнитный поток, пронизывающий контур, в рассматриваемом случае изменяется по гармоническому закону, то и ЭДС индукции также будет меняться со временем по гармоническому закону.

Максимальное значение ЭДС  $\varepsilon_0 = B\omega S$  достигается при  $\varphi = 90^\circ$  ( $\sin \varphi = 1$ ):

$$\varepsilon_i = \varepsilon_0 \sin \omega t.$$

Если к рамке присоединить гальванометр  $\Gamma$  (или замкнуть ее на любую внешнюю цепь), то в цепи пойдет переменный ток, также изменяющийся по закону синуса (рис. 10.26)

$$I = I_0 \sin \omega t.$$

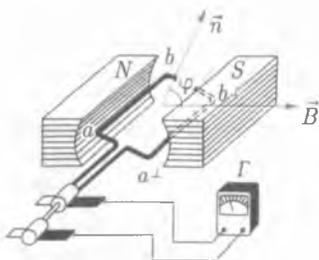


Рис. 10.25

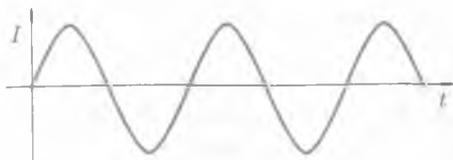


Рис. 10.26

Учитывая, что  $\omega = \frac{2\pi}{T}$ , где  $T$  — период вращения;  $\nu$  — частота

( $\nu = \frac{1}{T}$ ), получим

$$I = I_0 \sin 2\pi \nu t.$$

Чем быстрее вращается рамка, тем больше частота переменного тока. В нашей стране применяется промышленная частота  $\nu = 50$  Гц.

**Генератор переменного тока.** Как известно, электроэнергию получают на электростанциях. Наиболее распространены различные модификации тепловых (ТЭС) и гидроэлектростанций (ГЭС). На ГЭС используется потенциальная энергия падающей воды, на ТЭС — энергия, выделяющаяся при сгорании топлива. В 90-х гг. XX в. в мире появилось достаточно большое количество атомных электростанций (АЭС). Малую долю среди электростанций в настоящее время составляют те, которые работают на нетрадиционных источниках энергии, например энергии морских приливов или ветра. Создание электростанций, использующих нетрадиционные источники энергии, очень перспективно, поскольку они дают наиболее дешевую энергию и отвечают требованиям экологической безопасности.

При всем многообразии типов электростанций главное устройство на любой из них — *генератор переменного тока*. Генератор — это устройство, преобразующее какой-либо вид энергии в электрическую. На большинстве электростанций используются различные модификации *электромеханических индукционных генераторов переменного тока*. В таких генераторах механическая энергия, за счет которой вращается вал, превращается в электрическую. Устройства, вращающие вал генератора, на электростанциях различного типа различны.

Основные части индукционного генератора — это подвижный ротор 1 и неподвижный *статор* 2 (рис. 10.27) Насаженный на

вал генератора ротор представляет собой электромагнит, который вращается внутри статора. В пазах статора уложены проводящие контуры — обмотки. Ток к обмотке ротора подводится через щетки 6 и кольца 4 от специального генератора 3 постоянного тока — возбудителя 5, расположенного на том же валу.

При вращении ротора обмотки вращаются в магнитном поле статора, при этом пронизывающий их магнитный поток периодически изменяется, что порождает вихревое электрическое поле. В результате в обмотках возникает переменная ЭДС, которая порождает электрический ток во внешней цепи.

**Трансформатор.** Как известно, электрическую энергию вырабатывают на электростанциях, которые обычно расположены на значительных расстояниях от потребителей. При этом большое значение имеет проблема потерь энергии от нагревания проводов, т. е. проблема сохранения мощности, даваемой генератором электростанции. Согласно закону Джоуля — Ленца количество теплоты, выделяемое проводником,  $Q = I^2 R t$ , поэтому для сохранения мощности следует стремиться к тому, чтобы сила тока в линиях передачи была минимальной. А это означает, что напряжение следует повышать. В местах потребления напряжение снова может быть понижено.

Устройства, служащие для повышения и понижения напряжения, называют **трансформаторами**.

Трансформатор состоит из двух (в некоторых случаях — больше) индуктивно связанных обмоток (рис. 10.28). Одна из этих обмоток — первичная — подключена к источнику переменного напряжения. Ко вторичной обмотке подключают потребителей. Обмотки трансформатора надеты на общий замкнутый наборный сердечник, изготовленный из специальной трансформаторной стали.

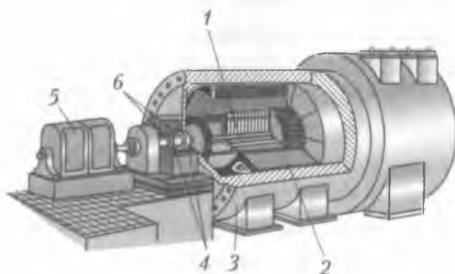


Рис. 10.27

Если к обмотке с меньшим числом витков приложить напряжение  $U_1$ , то вследствие электромагнитной индукции в катушке с большим числом витков возникает напряжение  $U_2 > U_1$ , и наоборот. В первом случае трансформатор является *повышающим*, во втором — *понижающим*.

В основе действия трансформатора лежит явление электромагнитной индукции. Когда переменный ток проходит через первичную обмотку, в сердечнике трансформатора появляется изменяющийся магнитный поток. Этот поток возбуждает индукционный ток в обмотках. Особенности трансформаторного сердечника таковы, что почти весь магнитный поток собирается внутри него. Значение магнитного потока одинаково во всех сечениях сердечника, мгновенное значение ЭДС индукции  $e_i$  в любой момент времени одинаково в каждом из витков обеих обмоток. Если  $n_1$  — число витков в первичной обмотке, а  $n_2$  — во вторичной, то их отношение равно отношению ЭДС индукции, возникающей в соответствующих обмотках:

$$e_1 = en_1, e_2 = en_2,$$

откуда

$$\frac{n_1}{n_2} = \frac{e_1}{e_2}.$$

Сопротивление обмоток трансформатора делают малым. В этом случае значение ЭДС будет примерно равно напряжению:

$$e_1 \approx U_1, e_2 \approx U_2.$$

Поскольку мгновенные значения ЭДС в обмотках изменяются в одинаковой фазе, то их отношение с достаточной степенью точности можно заменить отношением напряжений на концах первичной и вторичной обмоток:

$$\frac{n_1}{n_2} = \frac{e_1}{e_2} = \frac{U_1}{U_2} = k.$$

Отношение напряжений на первичной и вторичной обмотках называют коэффициентом трансформации  $k$ . Если  $k < 1$ , то трансформатор *повышающий*, если  $k > 1$ , — *понижающий*.

Мощность в цепи первичной обмотки  $P_1 = U_1 I_1$  приблизительно равна

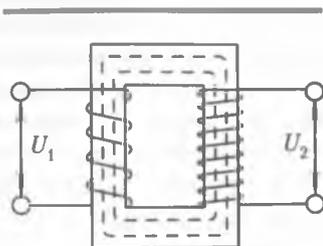


Рис. 10.28

мощности в цепи вторичной обмотки  $P_2 = U_2 I_2$  (при условии, что в цепь вторичной обмотки включена нагрузка, близкая к номинальной для данного трансформатора):  $P_1 = P_2$ , или  $U_1 I_1 = U_2 I_2$ . Поэтому во сколько раз трансформатор повышает напряжение, во столько же раз он уменьшает силу тока:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{I_2}{I_1}.$$

В случае же если трансформатор понижающий, то при уменьшении напряжения во столько же раз увеличивается сила тока.

Таким образом, подавая напряжение с электростанции на ЛЭП повышают напряжение, уменьшая силу тока. Затем, когда ток подходит к потребителям, с помощью понижающего трансформатора понижают напряжение, увеличивая при этом силу тока.

Для повышения КПД трансформатора следует уменьшить потери на нагревании сердечника и проводов катушек. Поэтому сердечник изготавливают из отдельных пластин, которые собирают в замкнутую раму. При таком устройстве потери на нагревание обмоток трансформатора и сердечника обычно не превышают 2...3%, т.е. трансформатор является одним из самых экономичных электрических приборов.

Современные технологии позволяют производить трансформаторы, КПД которых достигает 97...98% и выше.

Трансформатор изобрел русский ученый И. Ф. Усагин (1882).

**Передача электрической энергии.** Одно из преимуществ электрической энергии состоит в том, что ее можно передавать на большие расстояния с относительно малыми потерями. Потери электрической энергии при передаче, как отмечалось ранее, обусловлены выделением теплоты в проводах линии.

Из закона Джоуля—Ленца следует, что для понижения потерь электроэнергии на нагревание проводов необходимо уменьшить их сопротивление или силу тока в них.

Но для уменьшения сопротивления проводов требуется увеличить их поперечное сечение, а это ведет к дополнительному расходу дорогостоящего цветного металла. Более эффективно уменьшение силы тока в проводах, ведь потери энергии пропорциональны квадрату силы тока. Значит, уменьшив ее в 100 раз, можно сократить потери в  $100^2 = 10\,000$  раз. Уменьшить силу тока возможно, повышая напряжение переменного тока с помощью трансформатора.

Поэтому передачу электроэнергии на большие расстояния осуществляют только при высоком напряжении. Генераторы перемен-

ного тока обычно вырабатывают напряжение не более 16...20 кВ. На электростанциях ставят повышающие трансформаторы, от которых энергия поступает в линию электропередачи (ЛЭП).

Для потребителей электрической энергии напряжение необходимо понизить. Это делают в несколько этапов с помощью понижающих трансформаторов. Сначала напряжение понижают до 35 кВ. Линии электропередачи такого напряжения идут, например, к крупным производственным предприятиям. Затем напряжение понижают до 5 кВ и передают к отдельным цехам и небольшим предприятиям. Наконец, напряжение понижают до 220 В и подают в осветительную сеть.

В настоящее время ведутся теоретические и экспериментальные работы по снижению сопротивления ЛЭП с использованием явления сверхпроводимости, разрабатываются так называемые криогенные линии электропередачи.

В последние годы построены и продолжают строиться крупнейшие электростанции. Среди них Красноярская ГЭС мощностью 6 млн кВт, Братская ГЭС мощностью 4,5 млн кВт, Саяно-Шушенская ГЭС мощностью 6,4 млн кВт и др.

Как было отмечено ранее, электроэнергия вырабатывается в основном на ГЭС и ТЭС. Но в настоящее время разрабатываются и более совершенные способы получения электроэнергии с помощью фотоэлементов, термоэлементов, полупроводниковых преобразователей. Быстрыми темпами строятся атомные электростанции. Первая в мире АЭС была построена в СССР в 1954 г. в г. Обнинске (Московская область), ее мощность составляла всего 5 тыс. кВт; Курская АЭС имеет мощность уже 1 млн кВт (см. подробнее гл. 21).

Ученые ищут возможность прямого получения электроэнергии в первую очередь с помощью перспективного магнитогидродинамического метода, заключающегося в следующем. Сжигая топливо при определенных условиях, создают плазму, которую пропускают между полюсами магнита. В магнитном поле разноименно заряженные частицы под действием сил Лоренца отклоняются в разные стороны и попадают на специальные пластины — электроды. При замыкании электродов в цепи возникает ток.

Электростанции, расположенные в разных регионах страны, соединяют высоковольтными линиями электропередачи и образуют вместе с подключенными к ним потребителями электроэнергию Единую энергосистему (ЕЭС). Создание ЕЭС в стране имеет важное значение, так как потребление электрической энергии в течение суток неравномерно. Оно значительно больше днем, ког-

да работают станки и технологическое оборудование промышленных предприятий, и вечером, когда электроэнергия расходуется на освещение и электробытовые приборы (телевизоры, электроплиты и т. п.). В ночное время потребление электрической энергии резко падает. Но по техническим и экономическим условиям выработка электроэнергии должна быть непрерывной, и энергосистемы, объединяющие электрические сети регионов, относящихся к различным часовым поясам, позволяют передавать ее из тех мест, где в данный момент потребление ее незначительно, туда, где оно максимально.

В целях сбережения электрической энергии в нашей стране, да и во всем мире, введено так называемое «летнее» и «зимнее» время, позволяющее более продуктивно использовать светлую часть суток и получить значительный экономический эффект.



## ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ВЫВОДЫ

1. Магнитным полем называют такую материальную среду, которая, занимая какую-либо часть пространства, вызывает действие особых сил, называемых магнитными, на находящиеся в нем движущиеся электрические заряды и проводники с током.

2. Форма материального взаимодействия между электрическими токами, между токами и магнитами и между магнитами, называется магнетизмом.

3. Для количественной характеристики магнитного поля в каждой его точке вводят вектор магнитной индукции  $\vec{B}$ . Магнитная индукция — векторная величина, являющаяся силовой характеристикой магнитного поля. Индукцию магнитного поля выражают в теслах (Тл).

4. Магнитные поля, в каждой точке которых действуют одинаковые по величине и направлению магнитные силы, называются однородными.

5. Графически магнитное поле изображают в виде линий магнитной индукции. Линии магнитной индукции являются замкнутыми, и поэтому магнитное поле называют вихревым. Направление линий магнитной индукции определяют по правилу буравчика. Если поступательное движение буравчика совместить с направлением тока, то вращательное движение укажет направление линий магнитной индукции.

6. Индукция магнитного поля в точке на расстоянии  $R$  от прямолинейного проводника с током вычисляется по формуле

$$B = \mu_0 \mu \frac{I}{2\pi R},$$

где  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м — магнитная постоянная.

В центре кругового тока радиуса  $R$  индукция магнитного поля

$$B = \mu_0 \mu \frac{I}{2R}.$$

Для длинного соленоида с числом витков  $N$  и длиной  $l$  магнитная индукция магнитного поля в точках его оси, достаточно удаленных от концов соленоида,

$$B = \mu_0 \mu n I,$$

где  $n = N/l$  — число витков на единицу длины соленоида.

7. Закон Ампера утверждает: сила  $F$ , действующая на проводник с током в магнитном поле, пропорциональна индукции  $B$  поля, силе тока  $I$  в проводнике, длине  $l$  той части проводника, которая находится в магнитном поле, и синусу угла  $\alpha$ , образованного направлениями тока и вектора магнитной индукции:

$$F = IlB \sin \alpha.$$

8. Для двух взаимодействующих параллельных токов закон Ампера принимает вид

$$F = \frac{\mu_0 \mu I_1 I_2}{2\pi r} l.$$

9. Напряженность магнитного поля — векторная величина, определяемая по формуле

$$\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu_0 \mu}$$

и выражаемая в амперах на метр (А/м).

10. Выделим в магнитном поле некоторую поверхность площадью  $S$ . Считая поле однородным, обозначим  $\alpha$  угол, образованный вектором индукции  $\vec{B}$  и нормалью  $\vec{n}$  к плоскости контура. В этом случае величину

$$\Phi = BS \cos \alpha$$

называют магнитным потоком сквозь данную поверхность.

11. Величину  $P_m = IS$  называют магнитным моментом. Магнитный момент характеризует магнитные свойства замкнутого контура с током.

12. Работа по перемещению проводника с током в магнитном поле пропорциональна силе тока в проводнике и изменению магнитного потока, пронизывающего контур, по которому течет ток

$$A = I \Delta \Phi.$$

13. Геомагнитное поле и пояса радиации образуют магнитосферу нашей планеты. Влетая в магнитосферу Земли, заряженная частица испытывает действие силы Лоренца

$$F_{\Lambda} = qvB \sin \alpha,$$

где  $q$  — заряд частицы;  $v$  — ее скорость;  $B$  — индукция геомагнитного поля;  $\alpha$  — угол, образованный направлениями вектора скорости  $\vec{v}$  частицы и вектора индукции  $\vec{B}$  геомагнитного поля.

14. Способность веществ намагничиваться характеризует магнитная проницаемость  $\mu$ . У большинства веществ  $\mu$  мало отличается от единицы, они делятся на парамагнетики ( $\mu > 1$ ) и диамагнетики ( $\mu < 1$ ). В то же время существует группа веществ, у которых  $\mu$  достигает нескольких тысяч и даже десятков тысяч. Такие вещества называются ферромагнетиками. Для каждого ферромагнетика существует определенная температура (точка Кюри), при которой он размагничивается и превращается в парамагнетик.

15. Электромагнитная индукция — возникновение ЭДС в проводнике, движущемся в магнитном поле, или в замкнутом проводящем контуре при изменении его потокосцепления вследствие движения контура в магнитном поле или изменения самого поля.

16. Когда замкнутый электропроводящий контур пронизывает изменяющийся магнитный поток, в контуре возбуждается ЭДС индукции и наводится индукционный ток, причем ЭДС индукции пропорциональна скорости изменения магнитного потока через данный контур:

$$E_i = - \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}.$$

Знак «-» означает, что ЭДС индукции направлена против изменения магнитного потока. Согласно правилу Ленца, ЭДС индукции рождает в замкнутом контуре такой ток, собственное магнитное поле которого препятствует изменению магнитного потока, пронизывающего контур.

17. Правило Ленца выражает закон сохранения и превращения энергии в явлении электромагнитной индукции.

18. Направление индукционного тока в проводнике определяется с помощью правила правой руки: если расположить правую руку так, чтобы линии индукции магнитного поля входили в ладонь, а отогнутый под прямым углом большой палец совпал с направлением движения проводника, то четыре вытянутых пальца покажут направление индукционного тока, возникающего в этом проводнике.

19. Процесс возникновения ЭДС индукции в цепи, по которой течет изменяющийся ток, называют самоиндукцией. ЭДС самоиндукции

$$E_c = -L \frac{\Delta I}{\Delta t},$$

где коэффициент  $L$  называют индуктивностью проводника и выражают в генри (Гн).

20. Индуктивность — скалярная физическая величина, численно равная потоку, создаваемому единичным током:

$$\Phi = LI.$$

Если  $|I| = 1$ , то  $|L| = |\Phi|$ .

21. Энергия магнитного поля пропорциональна индуктивности цепи и квадрату силы тока в ней:

$$E_m = \frac{LI^2}{2}.$$



## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ

1. Что называют магнитным полем? Чем оно создается и на что действует?
2. Как устанавливают взаимосвязь между электрическим и магнитным полями?
3. Какую физическую величину называют вектором магнитной индукции? В каких единицах выражается магнитная индукция?
4. Что представляют собой линии индукции магнитного поля? Как можно наблюдать картину линий магнитной индукции?
5. В чем состоит принципиальное отличие магнитного поля от электростатического?
6. Почему магнитное поле называют вихревым?
7. Что такое магнитная проницаемость среды? Что она характеризует?

8. Какое магнитное поле называют однородным?
9. В чем состоит правило буравчика? Для чего его применяют?
10. Что такое напряженность магнитного поля и как она связана с магнитной индукцией?
11. Что представляют собой радиационные пояса Земли?
12. Как записывают закон Ампера, определяющий силу, с которой магнитное поле действует на элемент тока? На проводник с током? Как называют эту силу?
13. В чем заключается правило левой руки?
14. Что такое магнитный момент? От чего он зависит?
15. Что такое магнитный поток? В каких единицах он измеряется?
16. Что представляет собой сила Лоренца?
17. Поясните рисунками и опишите эксперименты, в которых обнаруживается явление электромагнитной индукции. В чем сущность этого явления? Как оно объясняется на основе электронной теории?
18. Поясните рисунками и опишите эксперименты, в которых устанавливается зависимость направления индукционного тока от характера изменения магнитного потока. Как формулируют правило Ленца и правило правой руки?
19. Какая формула выражает основной закон электромагнитной индукции?
20. Установите границы применимости основного закона электромагнитной индукции.
21. Что называется явлением самоиндукции?
22. Напишите формулы, по которым определяется ЭДС самоиндукции. В чем заключается их физический смысл?
23. Что называют индуктивностью проводника? От чего зависит индуктивность контура? Каков физический смысл индуктивности?
24. Может ли ЭДС самоиндукции возникнуть при неизменной силе тока в проводнике?
25. По какой формуле определяют энергию магнитного поля проводника с током?



Раздел IV

**МЕХАНИЧЕСКИЕ  
И ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ  
КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ**

### 11.1. Гармоническое колебание и его основные характеристики

Колебательным движением (*колебанием*) называется процесс при котором система, многократно отклоняясь от своего состояния равновесия, каждый раз вновь возвращается к нему. Если это возвращение совершается через равные промежутки времени, то колебание называется *периодическим*.

Колебательные движения широко распространены в природе, технике, окружающей нас жизни: биение сердца, волнение водной или растительной поверхности, дыхание, вибрация натянутой струны, морские приливы и отливы, суточные и годовые изменения температуры воздуха, тепловое движение ионов в узлах кристаллической решетки твердых тел, переменный ток и его электромагнитное поле, движение электронов в атоме и т. д. Как видим, это самый распространенный вид движения.

Несмотря на большое разнообразие колебательных процессов как по физической природе, так и по степени сложности, все они совершаются по некоторым общим закономерностям и могут быть сведены к совокупности простейших периодических колебаний, называемых гармоническими.

**Периодические изменения во времени физической величины, происходящие по закону синуса или косинуса, называются гармоническими колебаниями.**

С основными закономерностями и характеристиками гармонического колебания познакомимся на примере равномерного движения материальной точки по окружности. Пусть материальная точка  $M$  движется против часовой стрелки по окружности радиусом  $A$  с постоянной угловой скоростью  $\omega$  (рис. 11.1). Тогда ее про-

екция  $N$  на вертикальный диаметр будет совершать периодические колебания около положения равновесия  $O$ , а смещение этой проекции  $x = ON$  изменяется в пределах от  $+A$  до  $-A$ , также совершая периодические колебания. Абсолютное значение максимального смещения  $A$  называется **амплитудой колебания**.

Значение смещения в любой момент времени  $t$  определяется соотношением, вытекающим непосредственно из рис. 11.1:

$$x = A \sin \varphi. \quad (11.1)$$

При описании колебательных процессов физические величины  $T$ ,  $\nu$ ,  $\omega$  и  $\varphi$  принято называть иначе, чем их называли при изучении физических основ механики:  $T$  называется периодом колебания;  $\nu$  — частотой колебания;  $\omega$  — круговой, или циклической, частотой;  $\varphi$  — фазой колебания.

**Фазой колебания**,  $\varphi = \omega t$ , называется аргумент тригонометрической функции в уравнении гармонического колебания. Физический смысл фазы состоит в том, что *фаза колебания определяет смещение в любой момент времени, т. е. определяет состояние колебательной системы*. Действительно, например, при  $\varphi = \pi/6$  смещение  $x = A/2$ , при  $\varphi = \pi$   $x = 0$ , при  $\varphi = 3/2\pi$   $x = -A$  и т. п. Фазам, различающимся между собой на значение, кратное  $2\pi$ , соответствуют одинаковые смещения. Изменение фазы на  $2\pi$  радиан соответствует промежутку времени в один период  $T$  (см. формулу (11.3)).

Минимальный промежуток времени  $T$ , через который движение тела полностью повторяется, называется **периодом колебания**. За это время совершается одно полное колебание. Иными словами, период колебания  $T$  — время одного полного колебания. Период  $T$  измеряют в секундах (с).

Число колебаний  $\nu$  за единицу времени называют **частотой колебаний**. Единицей измерения частоты является герц (Гц):

$1 \text{ Гц} = \frac{1}{\text{с}} = \text{с}^{-1}$ . Если система совершает колебания с частотой 1 Гц, это значит, что она совершает одно колебание в секунду. Частота и период связаны соотношением:

$$\nu = \frac{1}{T}. \quad (11.2)$$

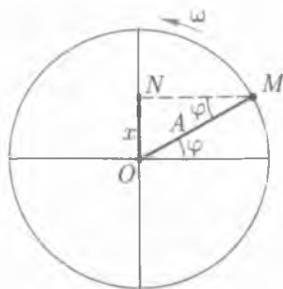


Рис. 11.1

Частота колебания измеряется также в циклах в секунду. Циклическая (или круговая) частота колебаний  $\omega$  — число полных колебаний, происходящих за  $2\pi$  секунд. Единица циклической частоты — радиан в секунду  $\left(\frac{\text{рад}}{\text{с}}\right)$ .

Так как период вращения материальной точки  $T$ , число ее оборотов в секунду  $\nu$ , угловая скорость  $\omega$  и угол  $\varphi$  поворота радиуса связаны между собой соотношением

$$\varphi = \omega t = (2\pi/T)t = 2\pi\nu t, \quad (11.3)$$

то формулу (11.1) можно написать еще так:

$$x = A \sin \omega t; \quad (11.4)$$

$$x = A \sin(2\pi/T)t; \quad (11.5)$$

$$x = A \sin 2\pi\nu t. \quad (11.6)$$

Соотношения (11.1) — (11.6) являются разновидностями уравнения гармонических колебаний. Как видим, изменение колеблющейся величины со временем происходит по закону синуса (или косинуса, если точка  $M$  проецируется на горизонтальный диаметр). Смещение  $x$  положительно, когда направлено вверх от положения равновесия, и отрицательно, когда направлено вниз.

На рисунке 11.2 приведен пример графика зависимости  $x(t)$  при гармонических колебаниях. Отмечены амплитуда  $A$  и период  $T$  колебаний.

Уравнения (11.1 — 11.4) написаны в предположении, что в начальный момент времени ( $t = 0$ ) фаза колебаний была равна нулю. Если же в начальный момент фаза уже имела некоторое значение, то

$$x = A \sin(\varphi + \varphi_0) = A \sin(\omega t + \varphi_0),$$

где  $\varphi_0$  — начальная фаза колебания. Поскольку выбор начального момента отсчета времени произволен, будем (при рассмотрении одного-единственного колебания), как правило, полагать  $\varphi_0 = 0$ .

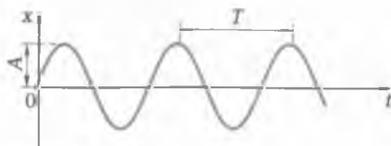


Рис. 11.2

## 11.2. Динамика колебательного движения

Исходя из закона Ньютона ( $\vec{F} = m\vec{a}$ ), для определения силы, вызывающей гармоническое колебание, нам необходимо определить его ускорение.

Для этого воспользуемся некоторыми свойствами равномерно-го движения по окружности, которое также является периодическим движением. Докажем, что при равномерном движении по окружности проекция ускорения пропорциональна модулю смещения относительно положения равновесия, причем проекция ускорения и проекция смещения имеют противоположные знаки.

Напомним, что при равномерном движении по окружности тело движется с ускорением, направленным к центру окружности, причем модуль ускорения  $a = \omega^2 R$ , где  $\omega$  — угловая скорость;  $R$  — радиус окружности.

Выберем систему координат, как показано на рис 11.3. Пусть в данный момент координаты тела равны  $x$  и  $y$ . Тогда  $x = R \cos \alpha$ ,  $a_x = -a \cos \alpha$ .

Следовательно,  $\frac{a_x}{x} = -\frac{a}{R}$ . Воспользовавшись тем, что  $a = \omega^2 R$ , получаем

$$a_x = -\omega^2 x. \quad (11.7)$$

Тогда, учитывая формулу (11.7), можно записать, что

$$F = ma = -m\omega^2 x = -kx, \quad (11.8)$$

где

$$k = m\omega^2. \quad (11.9)$$

Следовательно, сила, вызывающая гармонические колебания, пропорциональна смещению и направлена в сторону, противоположную смещению. Эта сила стремится вернуть материальную точку в положение равновесия, поэтому ее называют *возвращающей силой*. Возвращающей силой может быть, например, сила упругости, определяемая по закону Гука  $\vec{F} = -k\vec{x}$ . Эта сила полностью характеризует движение тела вблизи положения равновесия, т. е.

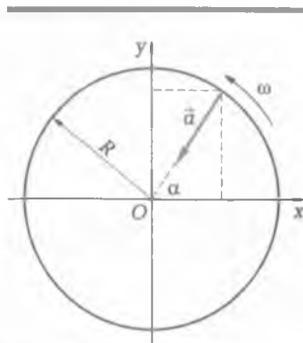


Рис. 11.3

при малых амплитудах колебаний. С увеличением амплитуды колебаний может наступить ангармоничность, пропорциональная квадрату амплитуды. Таким образом, гармоническое колебание вызывается действием упругой силы.

Возвращающие силы могут иметь и иную природу. В этих случаях они называются *квазиупругими силами*, т. е. силами, не упругими по своей природе, но аналогичными им по виду зависимости от смещения. Например, квазиупругие силы являются причиной гармонических колебаний математического и физического маятников.

**Математический маятник.** *Математический маятник* — это физическая абстракция, под которой понимают точечное тело, подвешенное на упругой бесконечно длинной и невесомой нити. Практически аналогом математического маятника является система, состоящая из шара и подвеса, при этом диаметр шара значительно меньше длины нити, к которой он подвешен.

Пусть смещение маятника будет небольшим ( $\varphi = 8 \dots 10^\circ$ ). Как видно из рис. 11.4, сила тяжести  $mg$  при отклонении маятника от положения равновесия на угол  $\varphi$  раскладывается на две составляющие: возвращающую силу  $F_n$ , которая направлена к положению равновесия, и силу, направленную вдоль нити и уравновешиваемую реакцией нити. Возвращающая сила

$$F_n = -mg \sin \varphi. \quad (11.10)$$

Из рис. 11.4 видно, что  $\sin \varphi = x/l$ , тогда

$$\vec{F}_n = -k\vec{x}, \quad (11.11)$$

где

$$k = mg/l. \quad (11.12)$$

В формулах (11.9) и (11.12) речь идет об одном и том же коэффициенте пропорциональности, поэтому можем написать, что  $m\omega^2 = mg/l$ , откуда следует, что  $\omega^2 = g/l$ , но так как  $\omega = 2\pi/T$ , то  $4\pi^2/T^2 = g/l$  и окончательно получим

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}. \quad (11.13)$$

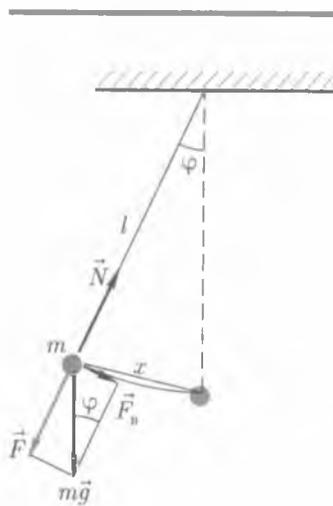


Рис. 11.4

Из формулы (11.13) видно, что при малых отклонениях период колебаний математического маятника пропорционален квадратному корню из длины маятника, обратно пропорционален квадратному корню из ускорения силы тяжести и не зависит от амплитуды и массы маятника.

Если известны масса материальной точки и коэффициент  $k$ , то, пользуясь формулой (11.9), можно определить круговую (циклическую) частоту и период колебаний тела, подвешенного на упругой нити:

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}; \quad (11.14)$$

$$T = 2\pi/\omega = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}}. \quad (11.15)$$

Формула (11.15) определяет период колебаний груза на пружине.

### 11.3. Виды колебаний

**Свободные колебания.** *Свободными (или собственными) колебаниями* называют колебания, возникающие в системе под действием внутренних сил, после того как система была выведена каким-либо образом из положения равновесия и затем предоставлена самой себе. *Внутренними силами* называют силы, действующие между силами внутри рассматриваемой системы.

Колебания тела, подвешенного на пружине и выведенного однократно из положения равновесия, например колебания груза, подвешенного на нити и однажды отклоненного на некоторый угол, а также колебания качелей после однократного толчка, являются примерами свободных колебаний (рис. 11.5).

Система, в которой могут совершаться колебания, называется *колебательной системой*.

Для того чтобы в системе совершались свободные колебания, необходимо выполнение двух условий:

- 1) система должна находиться вблизи положения устойчивого равновесия;

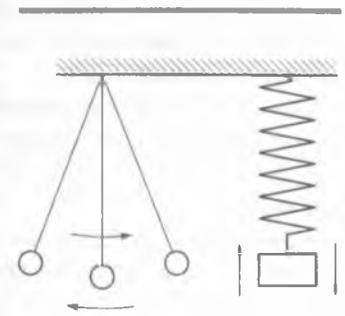


Рис. 11.5

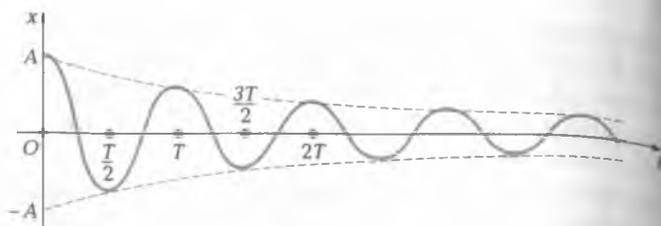


Рис. 11.6

2) силы трения или силы сопротивления должны быть достаточно малыми.

**Затухающие колебания.** Реальные гармонические колебания не происходят без потерь энергии. Механическая энергия в процессе колебаний непрерывно уменьшается, переходя во внутреннюю энергию. Амплитуда колебаний постепенно уменьшается, и маятник останавливается, т.е. колебания постепенно затухают.

*Затухающими* называют колебания, энергия и амплитуда которых уменьшается с течением времени. Механическая энергия колеблющейся системы убывает за счет действия сил трения и других сил сопротивления.

В затухающих колебаниях никогда не повторяются значения физических величин, характеризующих такие колебания (например, смещения, скорости и ускорения), и поэтому они являются непериодическими колебаниями.

График зависимости координаты тела от времени при затухающих колебаниях изображен на рис. 11.6.

**Вынужденные колебания. Резонанс.** Колебания, совершающиеся под действием внешней периодической силы, называются *вынужденными* (например, колебания иглы швейной машины, поршней в цилиндре двигателя внутреннего сгорания, ножа электробритвы).

Вынужденные колебания являются незатухающими, так как работа внешней, периодически изменяющейся с течением времени силы над системой обеспечивает приток энергии к системе извне.

Сила, вызывающая вынужденные колебания, называется *вынуждающей силой*. Эта сила действует на тела системы со стороны других тел, не входящих в эту систему.

*Частота* вынужденных колебаний всегда равна частоте периодической вынуждающей силы.

Амплитуда вынужденных колебаний не уменьшается со временем, даже если в системе присутствует трение, потому что потери механической энергии, обусловленные трением, восполняются за счет работы внешних сил.

Опыты показывают, что амплитуда вынужденных колебаний тем больше, чем ближе частота вынуждающей силы к собственной частоте колебаний.

Явление резкого возрастания амплитуды вынужденных колебаний при совпадении частоты внешней силы с собственной частотой системы называется резонансом.

На рис. 11.7 показана резонансная кривая, т.е. зависимость амплитуды  $x_{\max}$  вынужденных колебаний от частоты  $\nu$  вынуждающей силы. Резонанс проявляется в том, что функция  $x_{\max}(\nu)$  имеет максимум при  $\nu = \nu_0$ . Кривая 1 соответствует малой силе трения в системе, а кривая 2 — большой силе трения.

Явление резонанса можно объяснить на основе закона сохранения энергии. При резонансе направление внешней силы в течение всего периода совпадает с направлением вектора скорости колеблющегося тела, поэтому сила совершает положительную работу, увеличивая при этом амплитуду колебаний тела.

Резонанс используется не только в механических явлениях (например, раскачивание качелей), но и в акустике (для анализа и усиления звуков), в радио- и электротехнике (на резонансе основана работа радиоприемников, телевизоров), оптике и ядерной физике. На явлении резонанса основано устройство частотомера — прибора для измерения частоты переменного тока.

Часто при резонансе дребезжит корпус радиоприемника, преждевременно изнашиваются фундаменты, на которых устанавливаются ритмично работающие машины. Явление резонанса может быть причиной разрушения мостов и зданий. Поэтому, например, при переходе через мост воинским частям запрещается идти в ногу, а двигатели в автомобилях устанавливаются на специальных амортизаторах для уменьшения вибрации.

**Автоколебания.** Прислушиваясь к ходу часов, можно отметить повторяющиеся через равные промежутки вре-

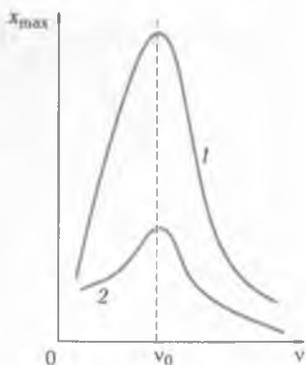


Рис. 11.7

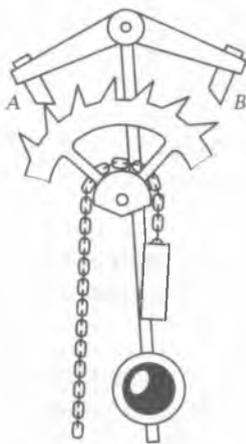


Рис. 11.8

связана. При каждом качании выступ *A* скобы пропускает один зуб шестерни, а выступ *B* задерживает очередной зуб. При этом часть энергии гири передается скобе и, следовательно, маятнику. Гиря медленно опускается, а маятник качается без затухания. Аналогично работает часовой механизм будильника или наручных часов, только в качестве источника энергии в них вместо поднятой гири используют спиральную пружину.

#### 11.4. Распространение колебательного движения в различных средах

**Волновой процесс. Поперечные и продольные волны.** Если в упругую среду поместить колеблющееся тело (источник колебаний), то соседние с ним частицы среды также придут в колебательное движение. Колебания этих частиц посредством сил упругости будут переданы соседним частицам среды и т. д. Через некоторое время процесс колебаний охватит всю среду. Однако колебания частиц будут совершаться с различными фазами: чем дальше расположена частица от источника колебаний, тем позднее она начнет колебаться и тем больше будет запаздывать по фазе ее колебание.

Распространение колебаний в упругой среде называется **волновым процессом**, или **механической волной**.

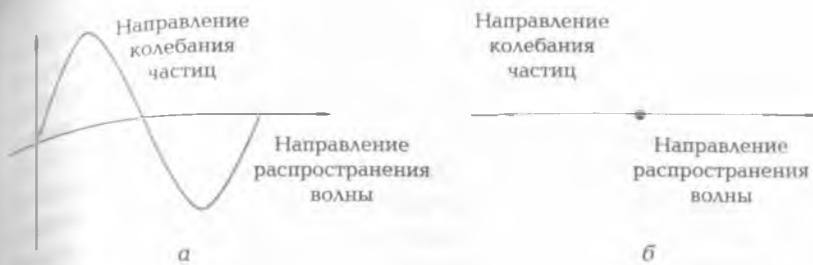


Рис. 11.9

Примером волнового процесса могут служить волны на поверхности воды, расходящиеся от места падения камня. Направление распространения волны (колебания) называется *лучом*. Волна называется *поперечной*, если частицы среды колеблются перпендикулярно лучу (рис. 11.9, а). Если они колеблются вдоль луча (рис. 11.9, б), то волна называется *продольной*. Подчеркнем, что частицы среды не перемещаются вместе с волной, а колеблются около своих положений равновесия.

Являются ли волны, распространяющиеся в среде, продольными или поперечными — зависит от упругих свойств среды.

Если при сдвиге одного слоя среды относительно другого возникают упругие силы, стремящиеся возвратить сдвинутый слой в положение равновесия, то в среде могут распространяться *поперечные волны*. Такой средой является твердое тело. Если в среде не возникают упругие силы при сдвиге параллельных слоев друг относительно друга, то поперечные волны не могут образовываться. Например, в жидкостях и газах поперечные волны не распространяются (последнее не относится к поверхностному слою жидкости, в котором могут распространяться и поперечные волны, носящие, однако, более сложный характер: в них частицы движутся по замкнутым круговым или эллиптическим траекториям).

Если в среде возникают силы упругости при деформации сжатия или растяжения, то в такой среде могут распространяться *продольные волны*. Например, жидкость или газ при сжатии вызывают увеличение давления, сила которого играет роль силы упругости при деформации сжатия. В жидкости и газе распространяются только продольные волны, тогда как в твердом теле продольные волны могут существовать наряду с поперечными.

**Интерференция волн.** Если в упругой среде существует несколько источников колебаний, то исходящие от них волны распространяются независимо друг от друга и после взаимного пере-

сечения расходятся, не имея никаких следов произошедшей встречи. Это положение называется *принципом суперпозиции* (лат. *superposo* — кладу наверх). Его иллюстрацией может служить распространение волн, вызванных двумя брошенными на поверхность воды камнями.

В месте встречи волн колебания среды, вызванные каждой волной, складываются друг с другом. Результат сложения (результативная волна) зависит от соотношения фаз, периодов и амплитуд встречающихся волн. Большой практический интерес представляет случай сложения двух (или нескольких) волн, имеющих постоянную разность фаз и одинаковое направление распространения. Такие волны и создающие их источники называются *когерентными*. Сложение когерентных волн называется *интерференцией* (от лат. *inter* — взаимно и *ferio* — ударяю).

**Принцип Гюйгенса — Френеля. Дифракция волн.** До настоящего времени мы рассматривали движение волн, происходящее только в некотором определенном направлении (вдоль одной линии). Это имеет место, например, в стержнях, воздушных трубах, волноводах и т. д. В общем случае от источника колебаний, находящегося в сплошной среде, волны распространяются во всех направлениях. Поверхность, на всех точках которой в данный момент времени одинаковую фазу, называется *фронтом волны*. Форма волнового фронта зависит от формы источника колебаний и свойств среды. При точечном источнике колебаний  $S$  волновой фронт в однородной среде имеет форму сферы; лучи, являющиеся радиусами  $R$  этой сферы, перпендикулярны волновому фронту (рис. 11.10, а).

Очевидно, что  $R = vt$ , где  $v$  — скорость волны;  $t$  — время ее распространения. Волны, образующие сферический фронт, называются *сферическими*. Сферический волновой фронт в изотропной

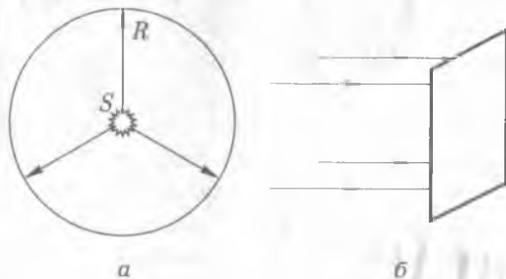


Рис. 11.10

среде является фазовой, или волновой, поверхностью, т. е. поверхностью, все точки которой колеблются в одинаковой фазе.

Если фронт волны представляет собой плоскость, то волна называется *плоской*. В этом случае лучи параллельны между собой (рис. 11.10, б). Небольшой участок сферического волнового фронта, находящегося на достаточном удалении от источника колебаний, можно практически считать плоским (пренебрегая кривизной фронта).

В неоднородной среде, где скорость волны неодинакова в различных направлениях, волновой фронт может иметь весьма сложную форму.

При решении задач о распространении волн часто бывает необходимо построить волновой фронт для некоторого момента времени. Это можно сделать с помощью метода, называемого *принципом Гюйгенса* (предложен в 1690 г. голландским физиком Х. Гюйгенсом), сущность которого состоит в следующем.

Пусть волновой фронт, перемещающийся в однородной среде, занимает в данный момент времени положение 1 (рис. 11.11).

Требуется найти его положение через  $\Delta t$  с. Согласно *принципу Гюйгенса каждая точка среды, до которой дошло возмущение, сама становится источником вторичных волн*. Это значит, что из нее, как из центра, начинает распространяться новая сферическая волна. Чтобы построить вторичные волны, вокруг каждой точки исходного фронта опишем сферы радиусом  $\Delta y = v\Delta t$ , где  $v$  — скорость волны. Вторичные волны взаимно гасятся во всех направлениях, кроме направления исходного фронта (указаны на рис. 11.11 стрелками). Другими словами, *колебания сохраняются только на внешней огибающей вторичных волн*. Построив эту огибающую, получим искомое положение 2 волнового фронта.

Принцип Гюйгенса применим и к неоднородной среде. В этом случае значения  $v$ , а следовательно, и  $\Delta y$  неодинаковы в различных направлениях.

Рассмотрим в качестве примера использования принципа Гюйгенса случай падения плоской волны на преграду с отверстием, раз-



Рис. 11.11

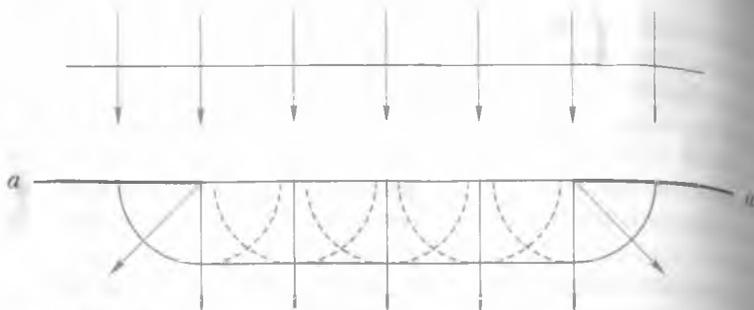


Рис. 11.12

меры которого больше длины волны (рис. 11.12). Когда волновой фронт дойдет до преграды  $aa$ , каждая точка отверстия станет источником вторичных волн. Построив эти волны (достаточно построить полусферы в направлении движения фронта) и проведя их огибающую, получим фронт волны, прошедшей через отверстия. Он будет плоским только в своей средней части; у границ отверстия происходит загибание волнового фронта (а следовательно, и лучей) за преграду. Это явление называется *дифракцией волн* (от лат. *diffractus* — разломанный).

Однако объяснение дифракции волн с точки зрения принципа Гюйгенса является неполным, так как он ничего не говорит об амплитудах волн, распространяющихся в различных направлениях, и, следовательно, оставляет открытым вопрос о распределении интенсивности вдоль волнового фронта. Отмеченный недостаток принципа Гюйгенса устранил в 1815 г. французский физик О. Френель, дополнив этот принцип положением об интерференции вторичных волн.

Согласно Френелю волну, приходящую в любую точку  $P$  первоначального источника  $S$ , можно рассматривать как результат интерференции вторичных волн, приходящих в эту точку от множества элементарных вторичных источников  $\Delta S_i$  некоторого волнового фронта  $F$  (рис. 11.13). Тогда интенсивность волны в точке  $P$  определится путем суммирования всех вторичных волн (с учетом размера  $\Delta S_i$ , вторичных источников, их расстояния  $r_i$  до точки  $P$  и угла  $\alpha_i$  между направлениями  $r_i$  и нормалью  $\vec{n}$  к  $\Delta S_i$ ).

Принцип Гюйгенса с дополнением Френеля получил название *принципа Гюйгенса — Френеля*.

**Звуковые волны.** Частным случаем упругих волн являются звуковые и сейсмические волны. Сейсмические волны — это волны в земной коре, возникающие вследствие землетрясений.

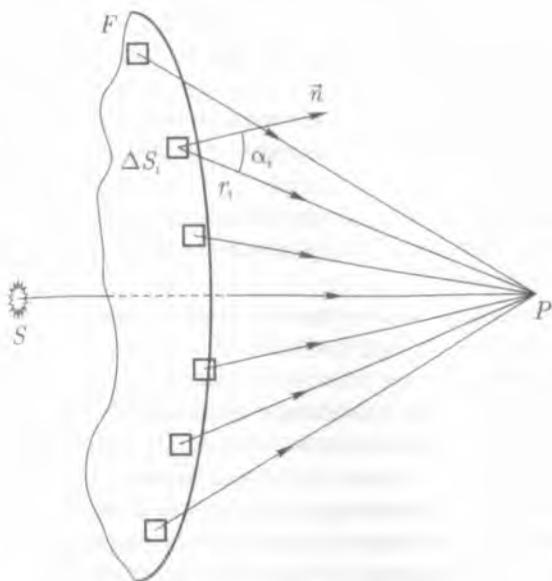


Рис. 11.13

(подземных толчков из-за сдвига пластов пород, взрывов и т. д.). С их помощью изучают строение Земли, проводят разведку полезных ископаемых.

Звук представляет собой макроскопические волны, образованные упорядоченными малыми колебаниями вещества.

Упругие волны в воздухе частотой от 16 Гц до 20 кГц вызывают у человека звуковые ощущения. Волны частотой меньше 16 Гц называют *инфразвуковыми*, а частотой выше 20 кГц — *ультразвуковыми*. Колебания сверхвысоких частот порядка  $10^9 \dots 10^{13}$  Гц называются *гетерзвукми*.

Область физики, в которой изучают звуковые явления и их связь с другими явлениями физики, называется *акустикой*.

Акустика изучает волны частотой от 1 до  $10^{13}$  Гц. Физическая природа волны в этом диапазоне едина, однако в зависимости от частоты волнам присущи некоторые особенности. Например, при высоких частотах длина волн столь мала, что становится сравнимой с размерами комплексов молекул и даже крупных молекул. Поэтому такие короткие волны особенно интенсивно взаимодействуют с веществом, в котором они распространяются.

Для возникновения и распространения звуковых волн необходимо прежде всего наличие упругой среды: газообразной, жидкой

или твердой. В жидких и твердых телах звуковая волна может быть как продольной, так и поперечной, в газообразных — только продольной.

Скорость распространения звука зависит от упругих свойств среды, ее плотности и температуры. Скорость звука не зависит от частоты.

Макроскопический характер движения в поле звуковой волны позволяет не учитывать микроскопического строения среды и считать среду сплошной.

По принятой в физике классификации звуки подразделяются на музыкальные звуки (тоны) и шумы.

**Музыкальные звуки** — это сложное колебание. Известно, что любое сложное колебание можно разложить на ряд гармонических колебаний, частоты которых в целое число раз больше частоты основного тона (теорема Фурье).

**Шумы** вызываются аperiodическими колебаниями.

**Акустическим спектром** называется разложение сложного звука на гармонические колебания с учетом их амплитуды и частоты. Акустический спектр музыкального звука является **линейчатый** (рис. 11.14, а). Простой тон (гармоническое колебание) можно получить от камертона.

Спектр шумов является **сплошным** (рис. 11.14, б).

Речь возникает в голосовом аппарате. При спокойном дыхании воздух свободно проходит через голосовую щель. Во время речи колебания воздуха из легких приводят в колебательное движение голосовые связки, что вызывает колебания воздушного потока и образование продольных волн (автоколебательная система).

Термин «звук» применяется также для обозначения того ощущения, которое вызывает волна в органах слуха человека.

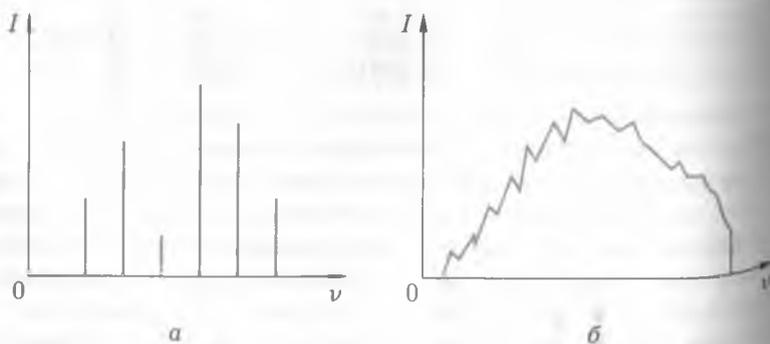


Рис. 11.14

Нужно иметь в виду, что, с одной стороны, звук — это физический процесс распространения упругих волн в среде, а с другой — психофизиологический процесс, обусловленный указанными выше физическими явлениями.

По этому признаку существует деление на физическую акустику и физиологическую акустику.

Звук имеет три физиологические и физические характеристики: высоту, громкость и тембр.

*Высота тона* зависит от степени натянутости голосовых связок, их формы, длины колеблющейся части и в меньшей степени от давления проходящего воздуха.

Физически высоту тона определяет частота. Чем она больше, тем выше тон. Для сравнения весь диапазон звуковых частот делят на октавы. В каждой октаве отношение максимальной частоты к минимальной равно двум.

*Тембр* — это своеобразная окраска звука, возникающая в полости глотки, носа, груди и в дыхательном горле. Каждая полость действует как резонатор, усиливая характерные для данного человека частоты, создавая индивидуальный тембр.

Физически тембр зависит от числа обертонов, их частоты и интенсивности сравнительно с основными тонами, т. е. от формы сложного колебания и его гармонического спектра.

*Громкость звука* — это уровень вызываемого слухового ощущения, зависящий от частоты и интервала колебаний голосовых связок.

Физически громкость есть функция двух переменных: силы звука и чувствительности уха.

*Сила звука  $I$*  — это интенсивность, измеряемая в Вт/м<sup>2</sup>.

Чувствительность уха характеризует его способность к адаптации. Она зависит от силы звука и частоты. Так, при изменении частоты от 16 до 1 000 Гц чувствительность уха возрастает, в диапазоне 1 ... 3 кГц она максимальна и постоянна, а при частоте выше 3 кГц — убывает.

## 11.5. Ультразвук и его использование в технике и медицине

**Ультразвук и его генерирование.** Ультразвук представляет собой высокочастотные упругие механические колебания частиц твердой, жидкой или газообразной среды, неслышимые человеческим ухом. Частота колебаний ультразвука более 20 000 Гц (с<sup>-1</sup>) выше порога слышимости.

Верхний предел частоты колебаний (до  $10^9$  Гц) определяется межмолекулярными расстояниями и поэтому зависит от агрегатного состояния вещества, в котором распространяется ультразвуковая волна.

Для генерирования и приема ультразвука используют устройства, называемые ультразвуковыми излучателями и приемниками. Наибольшее распространение получили электромеханические излучатели, преобразующие электрические колебания в механические.

**Виды ультразвука.** Различают непрерывный и импульсный ультразвук. Непрерывным ультразвуком принято называть непрерывный поток ультразвуковых волн. Этот вид излучения используют главным образом в медицине для воздействия на мягкие ткани и суставы. Импульсный ультразвук представляет собой прерывистое излучение, т.е. ультразвук посылается отдельными импульсами через определенные промежутки времени. Этот вид ультразвука чаще всего используется в технике, а также, как более щадящий, для лиц пожилого возраста, при сильных болях, в острый период заболевания.

**Некоторые свойства ультразвука.** Зависимость скорости распространения ультразвуковых волн и их поглощение от состояния среды используется для изучения молекулярных свойств вещества. Исследования такого рода являются предметом молекулярной акустики. Важную роль ультразвук играет в гидроакустике. На принципе отражения ультразвуковых импульсов от препятствий, возникающих на пути их распространения, строится работа эхолота, гидролокатора. Отражение ультразвуковых волн на границе двух сред позволяет определить расположение и размер неоднородных включений, полостей и т.п. Зная скорость распространения ультразвука, определяют глубину залегания исследуемого объекта.

**Применение ультразвука в технике.** Метод ультразвуковой дефектоскопии (т.е. контроль качества изделий без их разрушения) позволяет исследовать изделия больших размеров (до 5-10 м), что объясняется слабым затуханием ультразвуковых колебаний в большинстве веществ. Существуют два метода дефектоскопии: эхометод и теневой.

Эхометод (рис. 11.15, а) основан на излучении источником 1 регистрации приемником 2 ультразвуковой волны, отраженной от нижней границы изделия 3. При теневом методе дефектоскопии (рис. 11.15, б) излучатель 1 ультразвука располагается с одной стороны исследуемой детали 3, а приемник 2 ультразвука — с другой. Наибольшее распространение метод находит для контроля тонких изделий (труб, листового проката) толщиной до 50 мм.

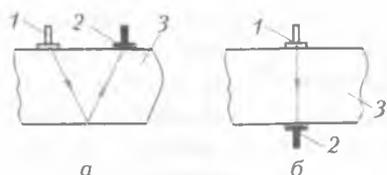


Рис. 11.15

Если на пути ультразвукового импульса встречается дефект (пузырьки воздуха или неметаллическое включение), то в зависимости от размеров дефекта вся энергия импульса или часть ее отражается. При этом импульс, отраженный от противоположной поверхности изделия, приходит к приемнику позже, чем импульс, отраженный от дефекта. Зная время, за которое импульс прошел расстояние от дефекта до приемника, можно определить глубину залегания дефекта, а амплитуда отраженного импульса позволяет оценить величину дефекта.

Основным недостатком метода ультразвуковой дефектоскопии является необходимость плотного контакта излучателя и приемника с исследуемым изделием. Если контакт недостаточно плотен из-за наличия на поверхности шероховатостей или неровностей, то возможна ошибка контроля (особенно при теновом методе).

Кроме металлургии, где с помощью ультразвуковых методов осуществляется контроль изделий, ультразвуковые дефектоскопы широко используются на железнодорожном транспорте (для проверки рельсов), что значительно уменьшает вероятность аварии.

**Ультразвуковая пайка.** Применение ультразвука позволило решить довольно важную технологическую задачу — соединение проводов алюминия или алюминиевых сплавов. Пайка алюминия обычными методами невозможна, так как на поверхности алюминия, соприкасающейся с кислородом, образуется окисный слой толщиной около 0,001 мкм, который не удаляется обычными флюсами.

Ультразвуковой метод пайки позволяет получать соединения столь высокой прочности, что разрыв образцов (например, спаянной проволоки) происходит не в месте соединения.

**Ультразвуковая обработка материалов.** Обработка материалов ультразвуком привела к созданию новой технологии, так как до появления ультразвуковых методов считалось, что твердые тела можно обрабатывать только инструментами, изготовленными из еще более твердых веществ.

Принцип ультразвуковой обработки твердых металлов основан на введении между рабочей поверхностью излучателя и обраба-

тываемой поверхностью специальной абразивной суспензии, состоящей из зерен с острыми гранями, которые оказывают на обрабатываемый материал шлифующее или долбящее действие. Созданные в последнее время ультразвуковые станки для механической обработки позволяют выполнять углубления или отверстия любой формы в таких сверхтвердых материалах, как керамика, кварц, титан, вольфрам, алмаз. Конструкция таких станков аналогична конструкции сверлильных станков, только вместо сверла у них ультразвуковая головка.

**Ультразвуковая очистка деталей.** Очищающее действие ультразвуковых колебаний основано на явлении кавитации. Ультразвуковые колебания вызывают появление кавитационных пузырьков, способствующих очистке поверхностей деталей. Методы ультразвуковой очистки позволяют удалять любые загрязнения: масло, жир, мелкую металлическую стружку, остатки материалов, образовавшиеся после шлифования и полирования, и др.

Одно из важнейших применений метода ультразвуковой очистки — предупреждение образования накипи на котлах, используемых в энергетических установках. В процессе работы котлов, применяемых на тепловых и атомных электростанциях, образуется накипь, которая сильно снижает теплоотдачу и уменьшает КПД электростанции. Если же вода подвергается ультразвуковой обработке, то вместо твердой накипи образуется хорошо смываемый осадок. Котлы очищают с помощью специального прибора, генерирующего колебания низкой ультразвуковой частоты.

**Применение ультразвука в медицине.** Для лечебных целей используется ультразвук частотой от 800 000 до 3 000 000 колебаний в секунду (от 800 кГц до 3 МГц). Генерирование ультразвука осуществляют ультразвуковыми излучателями. Наибольшее распространение получили электромеханические излучатели. Применение ультразвука в медицине связано с особенностями его распространения и характерными свойствами. По физической природе ультразвук, как и звук, является механической (упругой) волной. Однако длина волны ультразвука существенно меньше длины звуковой волны. Чем больше различные акустические сопротивления, тем сильнее отражение и преломление ультразвука на границе разнородных сред. Так происходит на границе биологических тканей и воздуха. К тому же воздух сильно поглощает ультразвук, поэтому должен быть безвоздушный контакт ультразвукового излучателя с кожей пациента. Отражение ультразвуковых волн зависит от угла падения на зону воздействия — чем больше угол падения, тем больше коэффициент отражения, поэтому ультразвук

звуковой излучатель должен прикасаться к коже всей своей поверхностью. Глубина проникновения ультразвука зависит от его частоты и особенностей (акустической плотности) самих тканей.

Медико-биологические приложения ультразвука можно в основном разделить на два направления: методы диагностики и исследования и методы воздействия.

Первое направление включает локационные методы с использованием главным образом импульсного излучения. Это эхоэнцефалография — определение опухолей и отека головного мозга; ультразвуковая кардиография — измерение размеров сердца в динамике; ультразвуковая локация — определение размеров глазных сред; ультразвуковой эффект Доплера — изучение характера движения сердечных клапанов и измерение скорости кровотока. С диагностической целью по скорости ультразвука находят плотность сросшейся или поврежденной кости.

Ко второму направлению относится ультразвуковая физиотерапия. Воздействие ультразвуком (осуществляется как механическое, так и тепловое воздействие) на пациента производят с помощью специальной излучательной головки аппарата. Обычно для терапевтических целей применяют ультразвуки частотой 800 кГц со средней интенсивностью около  $1 \text{ Вт/см}^2$  и менее. Между излучательной головкой и кожей пациента помещают какую-нибудь жидкость, например масло, так как даже небольшая прослойка воздуха может препятствовать проникновению ультразвука в организм.

В хирургии применяют так называемый «ультразвуковой скальпель», способный рассекать не только мягкие, но и костные ткани.

Способность ультразвука дробить тела, помещенные в жидкость, и создавать эмульсии используется в фармацевтической промышленности при изготовлении лекарств. При лечении таких заболеваний, как туберкулез, бронхиальная астма, катар верхних дыхательных путей, применяют аэрозоли различных лекарственных веществ, полученные с помощью ультразвука.

В настоящее время применяется метод «сваривания» поврежденных или трансплантируемых костных тканей с помощью ультразвука (ультразвуковой остеосинтез).

Губительное воздействие ультразвука на микроорганизмы используется для стерилизации.

Интересно применение ультразвука для слепых. Благодаря ультразвуковой локации с помощью портативного прибора «Ориентир» можно обнаруживать предметы и определять их характер на расстоянии до 10 м.

Перечисленные примеры не исчерпывают всех медико-биологических применений ультразвука, перспектива расширения этих приложений поистине огромна.

**Действие ультразвука на живые организмы.** Ультразвуковые волны, как отмечалось ранее, находятся за пределами слышимости. Несмотря на это, сами того не замечая, мы встречаемся с ультразвуками на каждом шагу. Например, наряду со слышимыми звуками, ультразвуки издают тикающие часы, телефонный звонок, летящий самолет, движущиеся автомобили, трамвай, работающие станки и т.п. Ультразвуки в частотной шкале занимают область от 20 кГц до 1 000 МГц. При частотах более 1 000 МГц начинается область гиперзвуков, пока мало изученных и не прошедших широкого практического применения.

С введением новых технологических процессов, современного ультразвукового оборудования все большее число людей подвержено влиянию ультразвука. Как ультразвуковые колебания воздействуют на человека? Ученые установили, что на человека оказывают действие ультразвуковые колебания только большой интенсивности — те, кто попал в зону сильного ультразвукового излучения, жалуются на недомогание и легкое головокружение, у них появляется тошнота.

Использование ультразвуков — нередкое явление в мире животных. С древних времен людей удивляло необыкновенное чутье животных, птиц, рыб, насекомых, их умение находить дорогу к гнездам, видеть невидимое, слышать неслышимое, безошибочно ориентироваться в окружающей обстановке. Удалось выяснить, что органом ориентации в пространстве у млекопитающих служат лабиринты внутреннего уха, с помощью которого создаются схемы или образы перемещений животного. Это «шестое» чувство в определенной степени присуще и человеку (оно особенно развито у таежных и степных охотников, пастухов). Появилась новая область знаний — **биоакустика**, изучающая звуковое общение и акустическую ориентацию животных.

Летучая мышь свободно ориентируется в полной темноте, не натываясь на препятствия, на лету обнаруживает и ловит насекомых, отличает летящего комара от несущейся по ветру соринки, съедобное насекомое от несъедобного. Летучая мышь излучает направленные ультразвуковые сигналы, которые, отражаясь от предметов, воспринимаются ею в виде эха. Количество сигналов изменяется в зависимости от расстояния между летучей мышью и предметами. С уменьшением расстояния до предмета количество сигналов повышается (при расстоянии до предмета 20 м количество сигналов повышается).

летучая мышь издает 5—8 сигналов в секунду, при 1 м — около 60 сигналов). Долгое время считалось, что летучие мыши охотятся без промаха, так как их жертвы лишены слуха и поэтому им трудно спастись. На опыте это не подтвердилось. Некоторые виды ночных бабочек — излюбленное лакомство летучих мышей — чрезвычайно чутко реагируют на ультразвуковые сигналы, которыми их «ощупывают» ночные хищники, и скрываются от нападения. Бабочки улавливают ультразвук с помощью особых органов, значение которых первоначально биологам было неизвестно.

Ультразвуковое «видение» свойственно и дельфинам, которые продолжают удивлять исследователей многообразием и развитием своих восприятий. У них чрезвычайно хорошо развит голосовой и слуховой аппарат, что позволяет им издавать и воспринимать знаки в широком диапазоне частот — от нескольких сотен до нескольких десятков тысяч герц. Именно поэтому так разнообразны звуки, издаваемые ими: они напоминают то визг и свист, то лай и щелканье, а иногда и скрип. С музыкальной точки зрения голос дельфина перекрывает все диапазоны баритона, тенора, сопрано и даже летучей мыши, доходя до 160—180 кГц. Голос дельфина охватывает диапазон звуков, никем из живых существ не превзойденный.

Дельфины не только пользуются звуколокацией, но и с помощью ультразвуковых сигналов «переговариваются» между собой: из бесчисленного множества звуков легко различают «голоса» своих сородичей или звуки, исходящие от организмов, служащих им пищей.



## ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ВЫВОДЫ

1. Движение, характеризующееся некоторой повторяемостью во времени, называется **колебательным**.

2. Любое колебательное движение характеризуется **периодом**  $T$ , частотой  $\nu$  и амплитудой  $A$ .

**Период колебаний** — наименьший промежуток времени, через который значение колеблющейся величины начинает повторяться.

**Частота колебаний** — физическая величина  $\nu$ , равная числу полных циклов колебаний, совершаемых за единицу времени.

Период и частота — величины взаимнообратные, т. е.  $T = 1/\nu$ .

**Амплитуда колебаний** — наибольшее значение  $A$ , которого достигает какая-либо физическая величина  $x$ , совершающая гармонические колебания.

3. Колебания, происходящие по закону синуса (или косинуса), называют гармоническими. Их уравнение в общем виде  $x = A \sin(\omega t + \varphi_0)$ , где  $x$  — расстояние колеблющейся точки от положения равновесия;  $A$  — амплитуда колебаний;  $\omega$  — циклическая частота, связанная с периодом и частотой колебаний соотношением  $\omega = 2\pi/T = 2\pi\nu$ ;  $\varphi_0$  — начальная фаза для данного конкретного случая;  $\omega t + \varphi_0$  — фаза колебания, являющаяся физической величиной, характеризующей состояние колебательной системы в данный момент времени.

4. Только упругие или квазиупругие силы являются причиной гармонических колебаний.

5. Математический маятник (идеализированная модель) — материальная точка, подвешенная на невесомой нерастяжимой нити и совершающая в вертикальной плоскости колебания под действием силы тяжести.

С некоторым приближением колебания всякого тела можно описать, используя выражения для периода колебаний математического маятника:  $T = 2\pi\sqrt{l/g}$ , где  $l$  — длина маятника;  $g$  — ускорение силы тяжести. Изохронность маятника, открытая Галилеем, позволяет использовать маятник в различных областях человеческой деятельности.

6. Полная энергия гармонического колебания постоянна и пропорциональна квадрату амплитуды и квадрату круговой частоты колебания.

7. Процесс распространения колебаний в упругой среде называют волновым процессом или механической волной. Возникающие при этом волны могут быть продольными и поперечными. Продольные волны распространяются в любых средах, тогда как поперечные — только в твердых телах.

8. Каждая волна ведет себя независимо от других волн, т. е. распространяется так, как будто никаких других волн не существует.

9. Если два источника колебаний генерируют колебания одинаковой частоты, одинаковой фазы или постоянной разности фаз (когерентные источники), то можно наблюдать интерференцию (сложение) волн.

10. В основе всякого звука лежит колебательный процесс. Колебания источника звука возбуждают вынужденные колебания среды, которые воспринимаются ухом человека.

11. Звуки, в которых нельзя различить высоту, называют шумами. Если высота звука легко различима, то такие звуки носят название музыкальных. Объективной характеристикой звука являются

ляется его интенсивность, тогда как громкость звука является его субъективной характеристикой.

12. Звуковые волны обладают свойствами механических колебаний и волн, но звуковым волнам присущи и такие их особенности, как громкость, тембр, высота звука, его интенсивность.

13. Чем больше плотность среды, тем больше скорость распространения в ней звука.

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ

1. Какое движение называется колебательным? Какими параметрами оно характеризуется?
2. Какие колебания называются гармоническими? Приведите примеры.
3. Как период колебаний связан с частотой?
4. Каков физический смысл фазы колебаний?
5. Изменится ли период колебаний какого-либо тела, если его из воздуха поместить в воду?
6. Запишите уравнение гармонического колебания, объясните физический смысл входящих в это уравнение величин.
7. Чему равна полная энергия колебаний маятника?
8. Каков период колебаний маятника Фуко в Исаакиевском соборе в Санкт-Петербурге, если длина маятника 98 м?  
*Ответ:  $T = 20,4$  с.*
9. Какой процесс называют волновым? В какой среде он наблюдается?
10. В каких средах распространяются продольные и поперечные волны?
11. Какими параметрами (величинами) характеризуется волна? Дайте их определение.
12. Какие источники называются когерентными? Что такое интерференция волн?
13. Какие волны называют звуковыми?
14. Какие звуки носят название музыкальных? Что такое тон, обертоны?
15. Чем определяются громкость звука, его высота и тембр?
16. Что называют интенсивностью (силой) звука, громкостью? Как связаны громкость и сила звука?
17. Может ли звук сильного взрыва на Луне быть слышен на Земле?
18. Какие колебания относят к ультразвуковым?
19. Воспринимают ли органы слуха человека ультразвуковые колебания?
20. Какое действие на организм человека может оказывать мощное ультразвуковое излучение?
21. Почему летучие мыши даже в полной темноте не задевают препятствия?

## 12.1. Колебательный контур. Свободные электромагнитные колебания

**Колебательный контур.** Колебательный контур представляет собой замкнутую электрическую цепь, состоящую из катушки индуктивности  $L$ , емкости  $C$  и сопротивления  $R$ . Если индуктивность, емкость и сопротивление сосредоточить в отдельных участках цепи, то такой контур называется *контуром с сосредоточенными параметрами*. Если активным сопротивлением пренебречь, то контур называется *идеальным*. Рассмотрим работу такого контура (рис. 12.1).

Пусть конденсатор  $C$  в момент времени  $t_0 = 0$  заряжен (рис. 12.1, а). Тогда напряжение  $U_c$  на конденсаторе максимально, ток в катушке  $I = 0$ , магнитное поле отсутствует. Это начальное

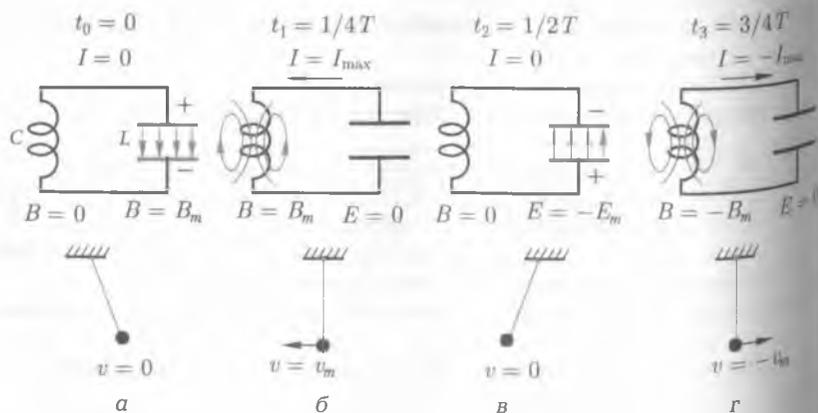


Рис. 12.1

момент колебаний. Далее конденсатор разряжается на катушку. Разряд происходит постепенно, так как в катушке возникает ЭДС самоиндукции, препятствуя разрядке конденсатора. В конце первой четверти колебания ( $t_1 = 1/4T$ , рис. 12.1, б)  $U_c = 0$ , сила тока достигает максимума  $I_{\text{max}}$ , а ЭДС самоиндукции всю первую четверть препятствует возрастанию силы тока, но  $E = 0$  в момент  $t_1 = 1/4T$ . Энергия электрического поля конденсатора преобразовалась в энергию магнитного поля катушки.

Во второй четверти (рис. 12.1, в) магнитное поле начнет уменьшаться, возникает ЭДС самоиндукции, поддерживающая ток. В конце второй четверти конденсатор перезарядится, сила тока упадет до нуля. Энергия магнитного поля катушки превратится в энергию электрического поля конденсатора.

В третьей четверти (от  $T/2$  до  $3T/4$ , рис. 12.1, г) энергия электрического поля конденсатора вновь превратится в энергию магнитного поля катушки, а в четвертой (от  $3T/4$  до  $T$ ) — наоборот.

Возникшие в идеальном контуре колебания являются незатухающими и относятся к свободным. Рассмотренные колебания называются **электромагнитными**.

Свободные электромагнитные колебания заключаются в периодических изменениях в колебательном контуре заряда и разности потенциалов конденсатора и силы тока в контуре. Можно сказать иначе: это периодические изменения энергии электрического и магнитного полей.

Колебания называются свободными потому, что энергия, однажды подведенная к контуру, более не пополняется. Частота таких колебаний определяется параметрами контура  $L$  и  $C$ . Так как энергия электрического поля конденсатора полностью переходит в энергию магнитного поля катушки (контур идеальный), то

$$CU_m^2 / 2 = LI_m^2 / 2. \quad (12.1)$$

Для амплитудных значений напряжения и тока справедливо соотношение  $U_m = I_m \omega L$ . Подставив его в формулу (12.1), получим

$$CI_m^2 \omega^2 L^2 / 2 = LI_m^2 / 2,$$

откуда следует, что

$$\omega = 1 / \sqrt{LC}. \quad (12.2)$$

Учитывая, что  $\omega = 2\pi/T$ , получим формулу Томсона

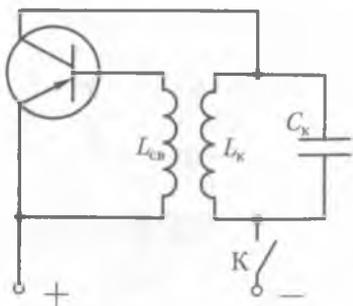


Рис. 12.2

$$T = 2\pi\sqrt{LC},$$

(12.3)

а для частоты

$$\nu = 1/2\pi\sqrt{LC}.$$

(12.4)

**Генератор высокой частоты.** Свободные, быстро затухающие электромагнитные колебания практического значения не имеют. Чтобы эти колебания были незатухающими, необходимо компенсировать

потери энергии в контуре. Но как это осуществить? Чисто механическим путем невозможно сотни тысяч раз в секунду и притом в нужный момент подзарядить конденсатор или увеличить силу тока в катушке. Однако этого можно достичь с помощью автоматического устройства — генератора высокой частоты.

Необходимым элементом генератора высокой частоты является транзистор, который последовательно соединяют с колебательным контуром и батареей питания (рис. 12.2).

При этом эмиттер подключают к положительному полюсу батареи, а коллектор — к отрицательному. Базу транзистора соединяют с катушкой  $L_{св}$ , которая индуктивно связана с катушкой  $L_к$  контура. Поэтому в процессе электромагнитных колебаний в контуре поступающий на базу потенциал периодически меняет свой знак относительно потенциала эмиттера.

Когда на базу подается отрицательный потенциал, транзистор пропускает ток, который в этот момент совпадает по направлению с током в контуре и усиливает его за счет энергии батареи. Когда же в контуре меняется направление на обратное, на базу поступает положительный потенциал. Транзистор размыкает цепь. Ток в цепи прекращается и не препятствует перезарядке конденсатора в контуре.

Таким образом, за счет периодически поступающих порций энергии от батареи питания в контуре поддерживаются незатухающие электромагнитные колебания.

**Токи высокой частоты.** С помощью генератора незатухающих электромагнитных колебаний можно получить переменные токи высокой частоты (30 МГц и выше).

Когда такой ток течет по проводнику, в нем возникают быстропеременные магнитные поля. Эти поля индуцируют в том же проводнике вихревые переменные токи, особенность которых

заключается в том, что на оси проводника они направлены навстречу основному току, а у поверхности проводника совпадают с ним по направлению. В результате ток высокой частоты неравномерно распределяется по поперечному сечению проводника. В центре сечения плотность тока близка к нулю и возрастает от центра к поверхности. При достаточно высокой частоте ток практически идет только по тонкому наружному слою проводника. Такое явление называют *скин-эффектом* (от англ. *skin* — кожа).

Токи высокой частоты находят широкое практическое применение. Например, их используют для быстрого прогрева и плавления металлических заготовок в электромагнитных печах. Закалка стальных деталей также осуществляют с помощью токов высокой частоты. Деталь на короткое время помещают внутрь катушки, по которой пропускают высокочастотный ток. Поверхностный слой детали разогревается, а внутри металл остается холодным. При отключении тока в катушке внутренняя холодная часть отнимает теплоту у сильно разогретого поверхностного слоя. В результате поверхность детали быстро охлаждается и закаливается. Глубину прогрева детали можно регулировать временем ее выдержки в катушке или частотой тока. После такой закалки поверхность детали становится твердой и прочной. В то же время в ее внутренней области металл сохраняет упругость.

Для прогрева диэлектриков их помещают между пластинами конденсатора колебательного контура. Быстропеременное электрическое поле приводит в колебание диполи диэлектрика и прогревает его.

Высокочастотные электромагнитные колебания находят широкое применение в медицине. В частности, к распространенному методу лечения относится терапия быстропеременным электрическим полем (УВЧ-терапия). При УВЧ-терапии частота колебаний поля достигает порядка 40 ... 50 МГц.

## 12.2. Электромагнитные волны

**Основы теории электромагнитного поля Максвелла.** В 1860-х гг. английский физик Дж. Максвелл разработал теорию единого электромагнитного поля, согласно которой переменное электрическое поле порождает переменное магнитное поле, а переменное магнитное порождает переменное электрическое поле. Эти вторичные переменные поля имеют вихревой характер: силовые

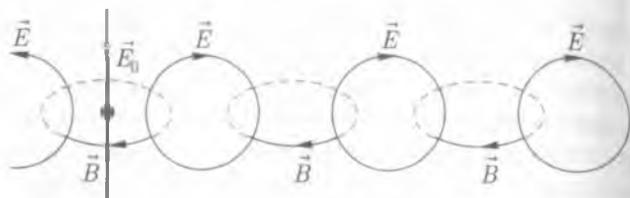


Рис. 12.3

линии порождающего поля concentрически охвачены силовыми линиями порождаемого поля. В результате образуется система «переменных» между собой электрических и магнитных полей. Некоторое представление о характере переменного электромагнитного поля может дать рис. 12.3.

Прямая линия  $\vec{E}_0$  изображает одну из силовых линий первичного переменного электрического поля; расположенные в горизонтальной плоскости окружности  $\vec{B}$  изображают силовые линии вторичных переменных магнитных полей, а вертикальные окружности  $\vec{E}$  — силовые линии вторичных переменных электрических полей. Постоянные электрические и магнитные поля являются лишь частным случаем единого электромагнитного поля.

Будучи первоначально связаны с зарядами и токами, переменные электрические и магнитные поля могут затем существовать независимо от зарядов и токов (отдельно от них) и, порождая друг друга, перемещаться в пространстве со скоростью

$$v = 1 / \sqrt{\epsilon_0 \epsilon \mu_0 \mu}, \quad (12.5)$$

или, если подставить численные значения величин  $\epsilon_0$  и  $\mu_0$ , получим

$$v = 3 \cdot 10^8 / \sqrt{\epsilon \mu} \text{ (м/с)}. \quad (12.6)$$

Таковыми переменными электромагнитными полями, отделившись от породивших их токов, являются радиоволны, свет, рентгеновские лучи и гамма-излучение (фотоны).

Согласно формуле (12.6) в вакууме ( $\epsilon = 1$  и  $\mu = 1$ ) электромагнитные поля распространяются со скоростью  $3 \cdot 10^8$  м/с, что, как известно, соответствует скорости света в вакууме, определенному экспериментальным путем.

**Природа и свойства электромагнитных волн.** Распространение электромагнитного поля в пространстве называется электр-

ромагнитной волной. Экспериментальное изучение электромагнитных волн началось более чем через двадцать лет после предсказания Дж. Максвеллом их существования. В 1884 г. Г. Герц сумел получить электромагнитную волну и поставить эксперименты, ставшие впоследствии классическими. С помощью этих экспериментов ученый сумел подтвердить правильность теории Дж. Максвелла. Он же впервые описал некоторые свойства электромагнитных волн.

Вслед за появлением работ Г. Герца начались интенсивные научные изыскания, давшие толчок к стремительному прогрессу в этой области.

Диапазон частот известных электромагнитных волн чрезвычайно широк, но все они имеют общие свойства:

- в среде перемещаются с конечной, максимальной для данной среды, скоростью  $v = c / \sqrt{\epsilon\mu}$ . Все электромагнитные волны распространяются с одной и той же скоростью. Это дает возможность характеризовать данное излучение либо только длиной волны  $\lambda$ , либо только частотой  $\nu$ . Строго говоря, это справедливо только для вакуума. В воздухе волны разной длины распространяются с несколько различными скоростями. В других средах разница в скоростях несколько больше. Это свойство дает нам возможность использовать стеклянные призмы для разложения видимого света в спектр колебаний разных длин волн, каждое из которых имеет свою характерную окраску;
- характеризуются двумя силовыми характеристиками: вектором напряженности  $\vec{E}$  электрического поля и вектором напряженности  $\vec{B}$  магнитного поля;
- все электромагнитные волны являются поперечными;
- взаимодействуют с веществом (поглощаются и рассеиваются);
- на границе раздела двух сред, в которых скорость распространения электромагнитных волн различна, происходит отражение и преломление этих волн;
- для электромагнитных волн наблюдаются явления интерференции, дифракции и поляризации, как для любых волновых процессов. Они переносят определенную энергию;
- самая большая скорость распространения электромагнитных волн — в вакууме, она составляет примерно  $3 \cdot 10^8$  м/с;

- металлы непроницаемы для электромагнитных волн, на границе металла с диэлектриком происходит отражение волн.

Излучение — это процесс возбуждения электромагнитной волны электрической колебательной системой. Электромагнитные волны в принципе излучает любая электрическая цепь переменного тока. К этим цепям относится и **закрытый колебательный контур** (см. § 12.1). Однако излучение его крайне мало. Это объясняется тем, что электрическое поле сконцентрировано между обкладками конденсатора, а магнитное — вокруг витков катушки, причем размеры конденсатора и катушки малы по сравнению с длиной волны, соответствующей частоте колебаний контура ( $\lambda = c/\nu$ ). Для получения излучения необходимо раздвинуть обкладки конденсатора и растянуть витки катушки так, чтобы переменные электрические и магнитные поля были распределены в объеме, линейные размеры которого сравнимы с длиной волны соответствующей частоте колебательного контура.

Такой контур называется **открытым колебательным контуром** (или антенной). Требования к нему можно сформулировать так: участки с противофазными колебаниями должны быть раздвинуты на расстояние, кратное  $\lambda/2$  ( $\lambda$  — длина волны, испускаемой контуром).

Поясним на конкретном примере. Пусть по витку катушки индуктивности идет ток. Направление тока на двух сторонах витка будет противоположным, и тогда при интерференции волн, излучаемых этими участками проводника, произойдет взаимное ослабление волн, находящихся в противофазе. Чтобы этого не произошло, необходимо увеличить расстояние между излучателями, работающими в противофазе, до  $\lambda/2$  или больше в кратное число раз. Тогда при интерференции будет усиление волн.

Емкость и индуктивность открытого контура в отличие от закрытого рассредоточены по всей цепи, поэтому пользоваться формулой Томсона нельзя. Простейшим примером открытого контура является прямой проводник (электрический вибратор). Минимальная длина вибратора  $l$  равна  $\lambda/2$ . Но  $\lambda = c/\nu$ , следовательно,  $l = c/2\nu$ . Тогда

$$\nu = c/2l.$$

Эта формула является расчетной при определении частот собственных колебаний для электрического вибратора. Любой современный радиопередатчик содержит открытый колебательный контур — антенну.

**Спектр электромагнитных излучений.** Как уже отмечалось, электромагнитные излучения с различными длинами волн (от радиоволн до гамма-излучения) имеют одну физическую природу. Все виды электромагнитного излучения в большей или меньшей степени проявляют свойства интерференции, дифракции и поляризации, характерные для волн. Вместе с тем все виды электромагнитного излучения в большей или меньшей мере обнаруживают квантовые свойства, так как по мере увеличения частоты излучения волновые свойства становятся все слабее, при этом излучение начинает в большей степени проявлять квантовые свойства.

На рис. 12.4 приведена шкала электромагнитных волн (спектр электромагнитных излучений) с указанием длин  $\lambda$  и частот  $\nu$  различных излучений.

Общим для всех электромагнитных излучений являются механизмы их возникновения: электромагнитные волны с любой длиной волны могут возникать при ускоренном движении электрических зарядов или при переходах молекул, атомов или атомных ядер из одного квантового состояния в другое. Гармонические колебания электрических зарядов сопровождаются электромаг-

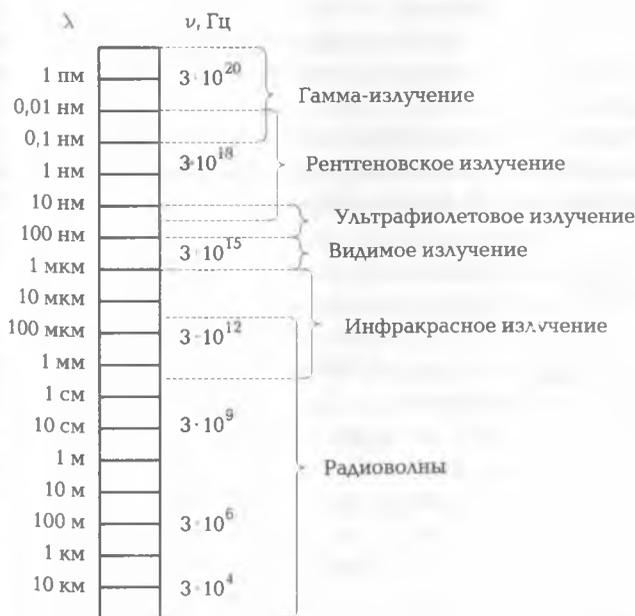


Рис. 12.4

нитным излучением, имеющим частоту, равную частоте колебаний зарядов.

Применение электромагнитных волн определяется свойствами волн разных диапазонов. Несмотря на то что границы между этими диапазонами достаточно условны, свойства волн разных диапазонов чрезвычайно разнообразны.

Рассмотрим применение излучений основных диапазонов.

**Радиоволны.** При колебаниях электрических зарядов, происходящих с частотами от  $3 \cdot 10^4$  до  $6 \cdot 10^{12}$  Гц, возникают электромагнитные излучения, длины волн которых лежат в интервале от нескольких километров до нескольких миллиметров. Радиоволны применяются для радиосвязи, телевидения, радиолокации.

Сегодня уже никого не удивляет тот факт, что с помощью радиоприемника или мобильного телефона можно слышать музыку, любые другие звуки, источники которых находятся на огромных расстояниях от нас. Радиосвязь — пример использования свойств электромагнитных волн (радиоволн).

Принцип распространения радиоволн, определяется их свойствами: волны частично поглощаются диэлектриками, преломляются на границе диэлектриков, могут отражаться, например, от металлических поверхностей. Характер распространения волн зависит и от диапазона их частот.

В зависимости от длины волны выделяют четыре основных диапазона радиоволн: длинные, средние, короткие и ультракороткие (табл. 12.1).

Длинные волны в значительной степени поглощаются ионосферой и поверхностью Земли, они используются для обеспечения надежной связи на сравнительно небольших расстояниях

Таблица 12.1

Диапазон радиоволн	Частота, Гц	Длина волны, м
Длинные	$3 \cdot 10^4 - 3 \cdot 10^5$	$10^4 - 10^3$
Средние	$3 \cdot 10^5 - 3 \cdot 10^6$	$10^3 - 10^2$
Короткие	$3 \cdot 10^6 - 3 \cdot 10^7$	$100 - 10$
Ультракороткие	$3 \cdot 10^7 - 3 \cdot 10^{12}$	$10 - 10^{-3}$

Средние волны способны огибать земную поверхность, поэтому с их помощью осуществляют связь на большие расстояния, длинные и средние волны позволяют передавать метеосводки и обеспечивать связь с подводными лодками. Короткие волны, многократно отражаясь от поверхности Земли и ионосферы, способны распространяться на значительные расстояния. На коротких волнах осуществляется радиовещание, а также, например, связь между радиолюбителями.

В отличие от коротких, ультракороткие волны способны проникать сквозь ионосферу (см. подразд. 12.3). На ультракоротких волнах осуществляется радио- и телевидение. Ультракороткие волны применяются также для космической связи и радиолокации.

**Инфракрасное излучение.** Электромагнитные излучения с длиной волны, меньшей 1—2 мм, но большей  $8 \cdot 10^{-7}$  м, т.е. лежащие между диапазоном радиоволн и диапазоном видимого света, называются **инфракрасным излучением**. Впервые данная область спектра была исследована в 1800 г. английским астрономом У. Гершелем (1738—1822).

Ученый поместил термометр с зачерненным шариком за красный край спектра и обнаружил повышение температуры. Шарик термометра нагревался излучением, невидимым глазом. Это излучение назвали **инфракрасными лучами**.

Инфракрасное излучение испускают любые нагретые тела, поэтому инфракрасные волны часто называют «тепловыми лучами». Источниками инфракрасного излучения служат печи, батареи водяного отопления, электрические лампы накаливания. Следует отметить, что с повышением температуры увеличивается интенсивность и частота инфракрасного излучения.

С помощью специальных приборов инфракрасное излучение можно преобразовать в видимый свет и получать изображения нагретых предметов в полной темноте.

Инфракрасное излучение применяется для сушки окрашенных изделий, стен зданий, древесины. На регистрации инфракрасных лучей основана тепловизионная техника, позволяющая вести наблюдение в полной темноте: тепловизоры, мобильные приборы ночного видения, например тепловизионные бинокли, оптические прицелы ночного видения и др. Все перечисленные приборы преобразуют инфракрасное излучение в видимый свет.

**Видимый свет.** К видимому свету (или просто свету) относятся излучения с длиной волны от  $8 \cdot 10^{-7}$  до  $4 \cdot 10^{-7}$  м, от красного до фиолетового цвета.

Значение этого участка спектра электромагнитных излучений в жизни человека исключительно велико, так как почти все сведения об окружающем мире человек получает с помощью зрения.

Свет является обязательным условием для развития растений и, следовательно, необходимым условием для существования жизни на Земле.

**Ультрафиолетовое излучение.** В 1801 г. немецкий физик И. Риттер (1776—1810), исследуя спектр, открыл, что за его фиолетовым краем имеется область, создаваемая невидимыми глазом лучами. Эти лучи воздействуют на некоторые химические соединения (например, происходит разложение хлорида серебра, свечение кристаллов сульфида цинка и некоторых других кристаллов).

Невидимое глазом электромагнитное излучение с длиной волны меньше, чем у фиолетового света, называют *ультрафиолетовым излучением*. К ультрафиолетовому излучению относят электромагнитные волны длиной от  $4 \cdot 10^{-7}$  до  $1 \cdot 10^{-8}$  м.

Способность ультрафиолетового излучения уничтожать болезнетворные бактерии широко применяется в медицине. В качестве источников ультрафиолетового излучения используются газоразрядные лампы. Трубки таких ламп изготавливают из кварца, прозрачного для ультрафиолетовых лучей; поэтому эти лампы называют кварцевыми.

Ультрафиолетовое излучение в составе солнечного света вызывает биологические процессы, приводящие к потемнению кожи человека — загару.

В настоящее время достаточно широкое распространение получили косметические приборы, в которых применяется ультрафиолетовое излучение, например для искусственного загара. Но загорая в солярии, необходимо помнить, что слишком длительное и интенсивное воздействие ультрафиолетовых лучей на кожу может привести не только к ожогам, но и развитию различных видов рака кожи. По этой же причине не рекомендуется долго загорать на пляже под лучами солнца в полуденные часы, когда ультрафиолетовое излучение наиболее интенсивно.

Ультрафиолетовое излучение широко используется в детекторах валют. Для проверки подлинности купюр их помещают под источник ультрафиолетового излучения, при этом на настоящих купюрах становятся видимыми специальные знаки, которые не видны при обычных условиях.

**Рентгеновское излучение.** Если в вакуумной трубке между нагретым катодом, испускающим электроны, и анодом приложить постоянное напряжение в несколько десятков тысяч вольт, то

электроны будут сначала разгоняться электрическим полем, а затем резко тормозиться в веществе анода при взаимодействии с его атомами. При торможении быстрых электронов в веществе или при переходах электронов на внутренних оболочках атомов (рис. 12.5) возникают электромагнитные волны с длиной волны меньше, чем у ультрафиолетового излучения. Это излучение в диапазоне длин волн от  $10^{-14}$  до  $10^{-7}$  м, открытое в 1895 г. немецким физиком В. Рентгеном (1845—1923), названо в его честь **рентгеновским излучением**.

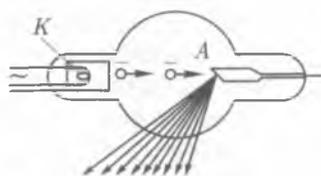


Рис. 12.5

Рентгеновские лучи невидимы глазом. Они проходят без существенного поглощения через значительные слои вещества, непрозрачного для видимого света. Обнаруживают рентгеновские лучи по их способности вызывать свечение некоторых кристаллов и действовать на фотопленку.

Рентгеновское излучение нашло широкое применение в медицине. Действие рентгеновских аппаратов основано на том, что рентгеновские лучи могут проникать сквозь различные вещества, в том числе биологические ткани. Причем разные вещества по-разному поглощают рентгеновские лучи. Применение современной компьютерной техники позволяет получать с помощью компьютерных томографов трехмерные изображения внутреннего строения организма, что существенно облегчает диагностику заболеваний.

Рентгеновское излучение используют в медицине не только для диагностики, но и для лечения ряда заболеваний, когда пациента дозированно облучают.

В технике с помощью рентгеновских лучей осуществляют контроль внутренней структуры различных изделий, сварных швов.

**Гамма-излучение.** Гамма-излучением называют электромагнитное излучение, испускаемое возбужденными атомными ядрами и возникающее при взаимодействии элементарных частиц. Это самое коротковолновое электромагнитное излучение ( $\lambda \leq 10^{-10}$  м), особенностью которого являются ярко выраженные корпускулярные свойства. Поэтому гамма-излучение обычно рассматривают как поток частиц — гамма-квантов. В области длин волн от  $10^{-10}$  до  $10^{-14}$  м диапазоны рентгеновского и гамма-излучений перекрываются, в этой области рентгеновские и гамма-кванты по своей природе тождественны и различаются лишь происхождением (часто это излучение называют *радиоактивным*).

*Радиоактивное излучение* оказывает сильное поражающее действие на живые организмы и может привести к повреждению и даже гибели клеток, нарушению клеточного деления, вызывая изменения в генетическом аппарате клеток.

Однако облучение живых организмов может оказывать и определенную пользу, например при лечении злокачественных опухолей. Метод лучевой терапии основан на повышенной чувствительности к облучению быстрорастущих молодых клеток злокачественного происхождения.

**Вынужденные электромагнитные колебания.** Свободные колебания в колебательном контуре всегда затухают, так как соотнесенная контуру энергия расходуется в основном на нагревание проводников. Для того чтобы колебания стали незатухающими, колебательный контур должна периодически поступать энергия. Это можно осуществить, если включить последовательно с конденсатором и катушкой источник тока, ЭДС которого периодически изменяется с течением времени (рис. 12.6), например по гармоническому закону:

$$e = \xi_m \sin \omega t,$$

где  $\xi_m$  — амплитудное значение ЭДС;  $\omega$  — угловая частота, с которой изменяется ЭДС.

В этом случае в цепи возникают *вынужденные гармонические колебания силы тока, заряда и напряжения на конденсаторе с частотой  $\omega$ , равной частоте, с которой изменяется ЭДС.*

Выясним, от каких величин зависит амплитуда колебаний силы тока в контуре. Для этого проведем опыт, схема которого приведена на рис. 12.7. В цепь последовательно включены: источник переменного напряжения, частоту которого можно плавно изменять, конденсатор емкостью  $C$ , реостат, катушка индуктивности  $L$  и амперметр.

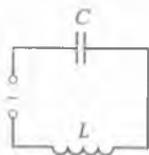


Рис. 12.6

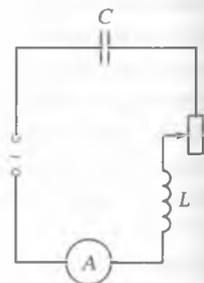


Рис. 12.7

Увеличивая частоту колебаний напряжения, мы будем наблюдать, как изменяется в цепи сила тока, измеряемая амперметром. Сначала сила тока постепенно возрастает, и при некоторой частоте она достигает максимального значения. Дальнейшее увеличение частоты колебаний напряжения приводит к уменьшению силы тока. Следовательно, существует частота колебаний внешнего напряжения, при которой амплитуда силы тока имеет наибольшее значение. Опыт показывает, что эта частота приблизительно равна собственной частоте  $\omega_0$  свободных колебаний в контуре:

$$\omega \approx \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}.$$

На рис. 12.8 представлена зависимость амплитуды силы тока  $I_T$  от частоты  $\omega$  колебаний внешнего напряжения для трех значений сопротивления  $R_1$ ,  $R_2$  и  $R_3$  реостата.

Из рис. 12.8 видно, что с уменьшением сопротивления ( $R_1 < R_2 < R_3$ ) амплитуда силы тока увеличивается.

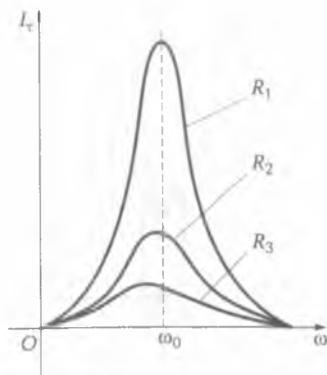


Рис. 12.8

Явление возрастания амплитуды силы тока в колебательном контуре при приближении частоты внешнего переменного напряжения к собственной частоте колебательного контура называют **резонансом**.

Резонанс используют в радиотехнике, например при осуществлении радиосвязи. Каждая радиостанция работает на определенной частоте. Настройка радиоприемника на некоторую радиостанцию состоит в том, чтобы добиться совпадения частот передающего и приемного устройств. При этом в приемнике возникают колебания силы тока и напряжения, амплитуды которых достигают наибольшего значения, что обеспечивает хорошую слышимость передачи.

### 12.3. Радиоизлучение и радиоприем

**Опыты Герца.** В 1888 г. немецкий физик Г. Герц осуществил излучение и фиксацию электромагнитных волн. Таким образом,

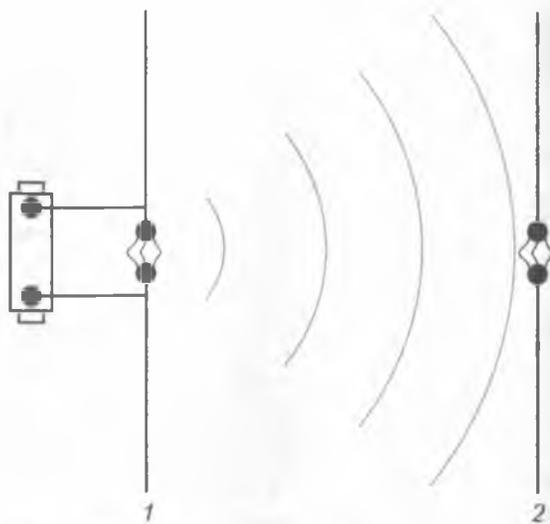


Рис. 12.9

теоретические выводы Дж. Максвелла получили убедительное подтверждение.

Для своего опыта Г. Герц использовал вибратор, представляющий собой систему двух стержней, вертикально расположенных один над другим. Между стержнями сохранялся небольшой искровой промежуток, а на каждом из противоположных концов стержней располагался металлический шар. Стержни соединялись гибкими проводниками с полюсами индуктора, который являлся источником напряжения. На некотором расстоянии от вибратора параллельно ему был расположен резонатор, устроенный аналогично вибратору (рис. 12.9). Вибратор Герца действовал подобно колебательному контуру. Его емкость определялась размерами и взаимным расположением шаров, а индуктивность создавалась стержнями вибратора.

Электромагнитное излучение открытого вибратора 1 (см. рис. 12.9) Герц регистрировал с помощью второго вибратора 2, имеющего такую же частоту собственных колебаний, что и излучающий вибратор, т. е. настроенного в резонанс с излучателем и потому называемого *резонатором*. Когда электромагнитные волны достигали резонатора, в нем возникали электрические колебания, сопровождающиеся проскакиванием искры через искровой промежуток.

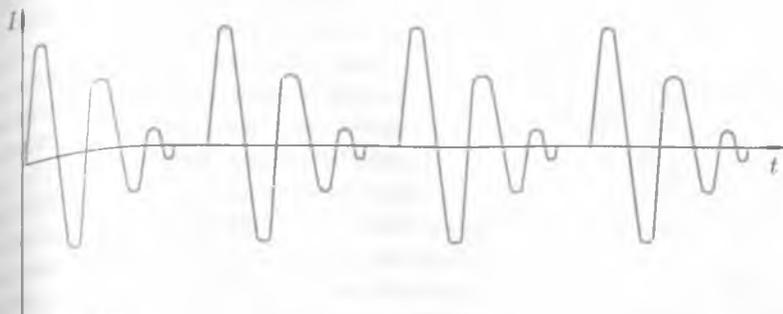


Рис. 12.10

Пользуясь вибратором и резонатором, Г. Герц в 1887 – 1891 гг. экспериментально исследовал структуру и закономерности распространения электромагнитных волн. Он, в частности, установил, что электромагнитные волны являются поперечными и обладают свойствами, присущими любым другим волнам: отражаются от преград (металлических), преломляются на границе раздела двух сред (диэлектрических) и интерферируют друг с другом.

Существенный недостаток вибратора Герца состоял в том, что частота подачи энергии от индукционной катушки в контур была значительно меньше частоты собственных колебаний контура. Поэтому электрические колебания вибратора Герца представляли собой серии затухающих колебаний, следующие одна за другой через небольшой промежуток времени (рис. 12.10).

Опыты Г. Герца сыграли огромную роль в развитии теории электромагнитного поля и вскоре стали известны ученым всего мира. Однако сам Г. Герц, наблюдая слабое действие электромагнитных волн на резонатор, не видел пути практического применения своего открытия. Такой путь был найден выдающимся русским инженером и ученым А. С. Поповым.

**Изобретение радио.** В 1889 г. русский ученый А. С. Попов, выступая с лекцией перед офицерами военно-морского флота в Кронштадте, говорил: «Человеческий организм не имеет еще такого органа чувств, который замечал бы электромагнитные волны в эфире. Если изобрести такой прибор, который заменил бы нам электромагнитные чувства, то его можно было бы применить и в передаче сигналов на расстояние».

Все дальнейшие годы своей жизни А. С. Попов посвятил созданию и совершенствованию такого прибора, и 7 мая 1895 г. он

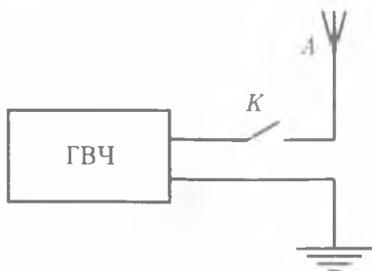


Рис. 12.11

цепь радиопередатчика и представляющим собой генератор высокой частоты — ГВЧ (рис. 12.11).

При замыкании ключа антенна А радиопередатчика излучала электромагнитные волны. При размыкании излучение прекращалось. Для кодирования информации А. С. Попов воспользовался азбукой Морзе. Короткий сигнал означал точку, длинный — тире.

**Космические источники радиоизлучения.** Как уже отмечалось электромагнитные волны, охватывающие диапазон частот от  $3 \cdot 10^4$  до  $6 \cdot 10^{12}$  Гц, называют радиоволнами.

Исследования показали, что на радиосвязь большое влияние оказывает физическое состояние верхней атмосферы, а также рельеф земной поверхности. Особенностью верхней атмосферы является сильная ионизация воздуха на высоте более 80 км. Поэтому верхние слои атмосферы называют **ионосферой**. Ионосфера практически прозрачна только для ультракоротких радиоволн. Именно этот диапазон представляет своеобразное радиоокно в космос.

Ученые «прослеживают» Вселенную с помощью радиотелескопов. Радиотелескопы весьма разнообразны по своей конструкции. Для приема сантиметровых и миллиметровых волн используют параболические конструкции, в фокусе которых устанавливается антенну-облучатель. Принятый ею радиосигнал передается в отдельное помещение. Там он усиливается и записывается с помощью специального устройства на равномерно движущейся бумажной ленте.

Встречаются также радиотелескопы в виде плоской рамы с укрепленными на ней многочисленными стержнями-диполями. В Пулковской обсерватории имеется радиотелескоп в форме дуги, а на Северном Кавказе Вселенную «прослушивает» гигантский кольцевой радиотелескоп РАТАН-800.

Самым ярким радиообъектом неба является Солнце. В радиоизлучении Солнца различают две составляющие: постоянную и переменную. В постоянной составляющей можно выделить три компонента, которые различаются длиной волны и интенсивностью: метровые, дециметровые и сантиметровые радиоволны. Метровые генерируются в короне, дециметровые — в переходной зоне, а сантиметровые — в хромосфере, причем плотность потока излучения растет с увеличением частоты. Постоянную составляющую принято называть радиоизлучением *спокойного Солнца*.

Переменная составляющая связана с активными областями Солнца (пятна, факелы, флоккулы, вспышки), ее называют радиоизлучением *возмущенного Солнца*.

Особый интерес представляет радиоизлучение *пульсаров*, открытых в 1967 г. английским астрофизиком Хьюишем и его коллегами. Радиоизлучение этих объектов отличается строгой ритмичностью импульсов с периодом от сотых долей секунды до нескольких секунд. Анализ принятых импульсов показал, что источники столь необычного радиоизлучения имеют размеры примерно 10 км.

История этого открытия весьма поучительна. Когда коллеги Хьюиша обнаружили первый источник дискретного радиоизлучения и сопоставили все имеющиеся о нем данные, их охватило предчувствие назревающей сенсации. С одной стороны, строгая ритмичность сигналов, а с другой — исключительно малые размеры источника невольно наводили на мысль о его искусственном происхождении. Но ученые не спешили с окончательными выводами. Осторожность оказалась оправданной. Вслед за первым радиопульсаром были обнаружены еще несколько подобных объектов. Стало ясно, что выявлено новое, не известное ранее явление природы. В ходе дальнейших исследований выяснилось, что пульсар — это крохотная нейтронная звезда, излучающая быструю последовательность радиоимпульсов. Помимо громадной плотности нейтронные звезды обладают еще двумя особыми свойствами: это быстрое вращение и сильное магнитное поле.

Согласно современной теории каждый радиопульсар наделен своеобразным «радиомаяком», дающим узконаправленное излучение. При этом вместе со звездой вращается и ее радиолуч. Наземными средствами регистрируются только те пульсары, радиолуч которых периодически задевает Землю.

Исключительно важными являются радионаблюдения межзвездной среды. Особенно это касается распределения в ней нейтрального водорода. Нейтральный водород является основным

компонентом диффузной материи в космосе. Для облаков газа характерно радиоизлучение на волне 21 см.

**Радиолокация.** Способность радиоволн отражаться от различных препятствий находит широкое практическое применение. *Посылку радиоимпульса и его прием после отражения от какого-либо тела называют радиолокацией.*

Специально предназначенная для этой цели установка — радиолокатор — состоит из мощного ультракоротковолнового радиопередатчика и настроенного на ту же частоту радиоприемника, имеющих общую приемно-передающую антенну.

Радиолокатор посылает в пространство узконаправленные радиоимпульсы через строго определенные промежутки времени. Встречая на своем пути какой-либо предмет, например летящий самолет, радиоволна отражается от него и возвращается к радиолокатору. За это время антенна автоматически переключается на прием радиоимпульса. Расстояние  $d$  до самолета определяется по промежутку времени  $\Delta t$ , прошедшего между посылками и приемом радиоимпульса. Так как скорость  $c$  распространения радиоволн известна, то это расстояние

$$d = c\Delta t/2. \quad (12.7)$$

Если самолет приближается к радиолокатору, то частота принимаемой после отражения от него радиоволны повышается на малое, но все же заметное значение. Наоборот, если самолет удаляется, то частота уменьшается. По изменению частоты радиоимпульса можно судить о направлении и скорости полета самолета.

Радиолокаторы надежно работают при любой погоде. Ни облака, ни осадки не оказывают влияния на посылку и прием радиосигналов. Поэтому радиолокация обеспечивает безопасность движения самолетов и кораблей ночью, в тумане и других неблагоприятных условиях.

Радиолокаторы установлены на всех аэродромах и авианосцах. Они контролируют посадку и взлет самолетов. Ими снабжены все крупные военные объекты. Радиолокация позволяет обнаруживать не только самолет, но и летящую на большой высоте ракету. Ступенчатый от самолета или ракеты сигнал автоматически фиксируется на экране осциллографа, за которым наблюдает дежурный оператор.

Радиолокация широко используется и в научных исследованиях. С помощью радиолокаторов в любое время суток можно обнаружить метеоры, определить их высоту, скорость, время сущ-

ствования. По этим данным оцениваются их масса и плотность. В 1946 г. была впервые осуществлена радиолокация Луны. Позже проводилась радиолокация Венеры, Меркурия, Марса и Юпитера. Это позволило проверить и уточнить расстояния в Солнечной системе, полученные методом измерения параллаксов.

Развитие космической радиолокационной техники быстро прогрессирует. Например, с помощью специальной радиолокационной аппаратуры, установленной на автоматических межпланетных станциях, удалось исследовать рельеф поверхности Венеры, которая скрыта от телескопических наблюдений мощным слоем облаков.

Трудно перечислить все области народного хозяйства, науки, техники, культуры, где радио в той или иной форме находит свое применение.

## ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ВЫВОДЫ

1. Замкнутую электрическую цепь, содержащую катушку индуктивности и конденсатор, называют идеальным колебательным контуром. Если сообщить конденсатору электрический заряд, то в контуре возникают свободные электромагнитные колебания. Они представляют собой периодические изменения электрического поля конденсатора и магнитного поля катушки. При этом между конденсатором и катушкой происходит периодический обмен энергией.

2. Период свободных электромагнитных колебаний

$$T = 2\pi\sqrt{LC},$$

где  $L$  — индуктивность катушки;  $C$  — емкость конденсатора.

3. В процессе электромагнитных колебаний в контуре происходит необратимое превращение электрической энергии в теплоту. Поэтому свободные электромагнитные колебания являются быстро затухающими. Для получения незатухающих колебаний к контуру подключают дополнительную цепь, содержащую батарею питания, а также трехэлектродную лампу или транзистор. Такое устройство позволяет автоматически подзаряжать конденсатор, компенсируя потери энергии и поддерживая тем самым электромагнитные колебания в контуре.

4. С помощью генератора незатухающих электромагнитных колебаний получают токи высокой частоты, которые применяют в технике и медицине.

5. Совокупность взаимно порождающих друг друга переменных электрического и магнитного полей называют электромагнитным полем. Это поле способно распространяться в окружающем пространстве в виде электромагнитных волн.

6. Скорость распространения электромагнитных волн в вакууме является фундаментальной постоянной  $c = 3 \cdot 10^8$  м/с.

7. Существование **электромагнитных волн** в природе было предсказано английским физиком-теоретиком Дж. Максвеллом в 1865 г. Через 23 года (в 1888 г.) электромагнитное излучение было экспериментально обнаружено немецким физиком Г. Герцем, а еще спустя 8 лет (в 1896 г.) русский инженер и ученый А. С. Попов осуществил первую в мире радиопередачу и тем самым доказал возможность практического использования электромагнитных волн.

8. Диапазон электромагнитных волн  $\Delta\lambda = 1000 \dots 0,001$  м называют радиодиапазоном. Радиоволны излучаются специальным проводником-антенной, индуктивно связанной с колебательным контуром радиопередатчика. Для трансляции по радио низкочастотных звуковых колебаний в радиопередающем устройстве осуществляется их наложение на колебания высокой частоты. В цепи радиоприемника колебания высокой частоты замыкаются на конденсатор, а колебания низкой частоты — на катушки телефона или громкоговорителя.

9. Космическое радиоизлучение принимают с помощью радиотелескопов. В 1967 г. было открыто радиоизлучение очень малых по объему, но обладающих большой плотностью звезд. Принимаемое радиоизлучение этих звезд носит ритмический, пульсирующий характер, что послужило поводом назвать такие звезды **пульсарами**. Источником космического радиоизлучения на волне 21 см являются протяженные облака межзвездного водорода.

10. Посылку радиоимпульса и его прием после отражения от какого-либо тела называют радиолокацией. С помощью радиолокации можно обнаружить летящий самолет, ракету и т. д. Радиолокация Луны, Венеры, Меркурия, Марса и Юпитера позволяет уточнить расстояние до этих небесных тел, полученные методом измерения параллаксов.



## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ

1. Как устроен колебательный контур? Как он работает? Каково его назначение?

2. Чем обусловлено быстрое затухание свободных электромагнитных колебаний в контуре?
3. Почему свободные электромагнитные колебания в колебательном контуре являются затухающими?
4. Как связана собственная частота контура с емкостью и индуктивностью элементов, составляющих этот контур?
5. Как изменится период электромагнитных колебаний в контуре, если индуктивность катушки увеличить в 9 раз, а емкость уменьшить в 4 раза?

*Ответ:* в 1,5 раза увеличится.

6. Корабль, терпящий бедствие, передает сигнал SOS на волне длиной 600 м. На какой частоте работает его радиопередатчик?

*Ответ:*  $\nu = 5 \cdot 10^5$  Гц.

7. Какие электромагнитные колебания называются незатухающими?
8. Как осуществить незатухающие колебания? Каков принцип работы генератора незатухающих колебаний?
9. Какова связь между электрическими и магнитными полями? Какие поля носят название электромагнитных?
10. От чего и как зависит скорость распространения электромагнитных волн?
11. В чем принципиальное различие между открытым и закрытым колебательными контурами?
12. Можно ли применить формулу Томсона к открытому колебательному контуру? Почему?
13. В чем заключается сущность опытов А. С. Попова?
14. Электромагнитные колебания какого диапазона используют в радиосвязи?
15. Из каких основных частей состоят передатчик и приемник радиоволн?
16. Вращая ручку настройки радиоприемника, какой параметр колебательного контура вы изменяете?
17. Что представляет собой источник необычного радиоизлучения, называемый пульсаром? Почему его так назвали?
18. На какой волне радиоизлучения ведут наблюдения межзвездной среды? Почему?
19. В чем заключается принцип радиолокации? Где применяют радиолокацию?
20. При радиолокации Луны посланный сигнал вернулся через 2,5 с. На каком расстоянии от Земли находилась в этот момент Луна?

*Ответ:*  $l = 37,5 \cdot 10^8$  м.

21. На каких волнах производят передачу телевизионных программ? Почему?

22. Почему затухают свободные колебания в колебательном контуре?
23. Как можно получить вынужденные электромагнитные колебания в цепи?
24. От чего зависит частота вынужденных колебаний?
25. При каком условии амплитуда вынужденных колебаний имеет максимальное значение?
26. Что называют резонансом в колебательном контуре?
27. Приведите примеры применения резонанса в колебательном контуре.

### 13.1. Развитие представлений о природе света

*Оптика* (от греч. *optos* — зрительный) — раздел физики, в котором изучаются вопросы о природе света, закономерностях световых явлений, а также процессы взаимодействия света с веществом.

**Корпускулярная и волновая теории света.** В течение последних трех столетий представление о природе света претерпело весьма существенное изменение. В конце XVII в. сформировались две принципиально различные теории о природе света: *корпускулярная теория*, разработанная И. Ньютоном, и *волновая теория*, разработанная Х. Гюйгенсом. Согласно корпускулярной теории, свет есть поток материальных частиц (корпускул), летящих с большой скоростью от источника света. Согласно волновой теории, свет представляет собой волну, исходящую от источника света и распространяющуюся с большой скоростью в «мировом эфире» — неподвижной упругой среде, непрерывно заполняющей всю Вселенную. Обе теории удовлетворительно объясняли закономерности, присущие некоторым световым явлениям, например законы отражения и преломления света. Однако такие явления, как интерференция, дифракция и поляризация света, не укладывались в рамки этих теорий.

До конца XVIII в. подавляющее большинство физиков отдавало предпочтение корпускулярной теории И. Ньютона. В начале XIX в. благодаря исследованиям английского физика Т. Юнга (1801) и французского физика О. Френеля (1815) волновая теория была в значительной мере развита и усовершенствована. В ее основу лег принцип Гюйгенса — Френеля. Волновая теория Гюйгенса — Френеля успешно объяснила почти все известные в то

время световые явления, в том числе интерференцию, дифракцию и поляризацию света, в связи с чем эта теория получила общее признание, а корпускулярная теория И. Ньютона была отвергнута. Слабым местом волновой теории являлся гипотетический «мировой эфир», реальность существования которого являлась весьма сомнительной.

Однако в 60-х гг. XIX в., когда Дж. Максвелл разработал теорию единого электромагнитного поля, необходимость в «мировом эфире» как особом носителе световых волн отпала: выяснилось, что свет представляет собой электромагнитные волны и, следовательно, их носителем является электромагнитное поле. Видимому свету соответствуют электромагнитные волны длиной от 760 до 380 нм, создаваемые колебаниями зарядов, входящих в состав атомов и молекул. Таким образом, волновая теория о природе света эволюционировала в электромагнитную.

**Электромагнитная и квантовая теории света.** Электромагнитная теория света утверждает, что *всякое световое излучение является электромагнитными волнами.*

Одним из важнейших экспериментальных доказательств справедливости электромагнитной теории света послужили опыты Физо (1849), Фуко (1850) и Майкельсона (1881): экспериментальное значение скорости распространения света совпало с теоретическим значением скорости распространения электромагнитных волн, полученным из электромагнитной теории Максвелла. Другим не менее важным подтверждением электромагнитной теории явились опыты П.Н. Лебедева (1899): измеренное им световое давление на твердые тела оказалось равным давлению электромагнитной волны, рассчитанному на основе теории Максвелла.

Представление о волновой (электромагнитной) природе света оставалось незыблемым вплоть до конца XIX в. Но к этому времени накопился достаточно обширный материал, не согласующийся с существовавшими представлениями и даже противоречащий им. Изучение данных о спектрах свечения химических элементов, люминесценции, фотоэлектрическом эффекте и некоторых других явлениях привело к необходимости предположения, что *излучение, распространение и поглощение электромагнитной энергии носят дискретный (прерывистый) характер*, т. е. свет испускается, распространяется и поглощается не непрерывно, как это следовало из волновой теории, а *квантами* (порциями). Исходя из этого предположения немецкий физик М. Планк в 1900 г. создал квантовую теорию электромагнитных процессов, а А. Эйнштейн в 1905 г. разработал квантовую теорию света, согласно

которой свет представляет собой поток световых частиц — фотонов.

Эта теория позволяет объяснить все оптические явления и объединяет как волновые, так и корпускулярные свойства света, делая существование «мирового эфира» совершенно ненужным. Таким образом, в начале XX в. возникла новая теория о природе света — квантовая теория, — возрождающая в известном смысле корпускулярную теорию И. Ньютона.

Однако фотоны существенно (качественно) отличаются от обычных материальных частиц: фотон в вакууме движется с одной и той же скоростью, равной скорости света, обладает конечной массой; он никогда не сможет остановиться или изменить свою скорость — для фотона нет состояния покоя. Фотоны могут поглощаться атомами вещества, передавать им свою энергию, а также излучаться атомом. Квантовая теория коренным образом отличается от теории И. Ньютона, а также от волновой теории. По современным воззрениям,

**свет — это совокупность электромагнитных волн в диапазоне частот  $(3,75 \dots 7,5) \cdot 10^{14}$  Гц.**

В некоторых явлениях (интерференция, дифракция, поляризация света) обнаруживаются волновые свойства света, эти явления описываются волновой теорией. В других явлениях (фотоэффект, люминесценция, атомные и молекулярные спектры) доминируют корпускулярные свойства света, такие явления описываются квантовой теорией. Таким образом, волновая (электромагнитная) и корпускулярная (квантовая) теории не отвергают, а дополняют друг друга, отражая тем самым *двойственный характер свойств света*. Здесь мы встречаемся с наглядным примером диалектического единства противоположностей: свет является и волной и частицей.

## 13.2. Отражение и преломление света

Эксперимент и теория показывают, что в различных прозрачных средах свет распространяется с различными скоростями, меньшими скорости света в вакууме. Среда, во всех точках которой скорость распространения света одинакова, называется оптически однородной. Рассмотрим явления отражения и преломления монохроматического света на плоской границе раздела двух различных, оптически однородных сред.

Пусть плоский фронт световой волны  $OA$  падает на границу раздела двух сред (рис. 13.1), скорости света в которых равны  $c_1$  и  $c_2$  ( $c_2 < c_1$ ). Связанные с этим фронтом световые лучи 1 и 2 составляют с нормалью к границе раздела угол  $\alpha$  (угол падения). На границе раздела двух сред свет частично отражается (лучи 3 и 4), а частично проходит (преломляется) во вторую среду (лучи 5 и 6). Применяя принцип Гюйгенса — Френеля, построим фронты отраженной и преломленной волн.

В точку  $B$  свет приходит позднее, чем в точку  $O$ , на время  $t = AB/c_1$ . За это время из точки  $O$  (как из вторичного источника света) в первой среде успевает распространиться полусферическая волна радиусом  $r_1 = c_1 t = c_1 \frac{AB}{c_1} = AB$ , а во второй среде —

полусферическая волна радиусом  $r_2 = c_2 t = c_2 \frac{AB}{c_1}$ . От всех остальных

точек границы  $OB$  (кроме самой точки  $B$ ) также распространяются вторичные полусферические волны, радиусы которых окажутся убывающими от  $O$  к  $B$  (эти вторичные волны на рисунке не показаны). Огибающая всех волновых полусфер первой среды дает фронт отраженной волны  $BD$ , а огибающая всех волновых полусфер второй среды — фронт преломленной волны  $BE$ .

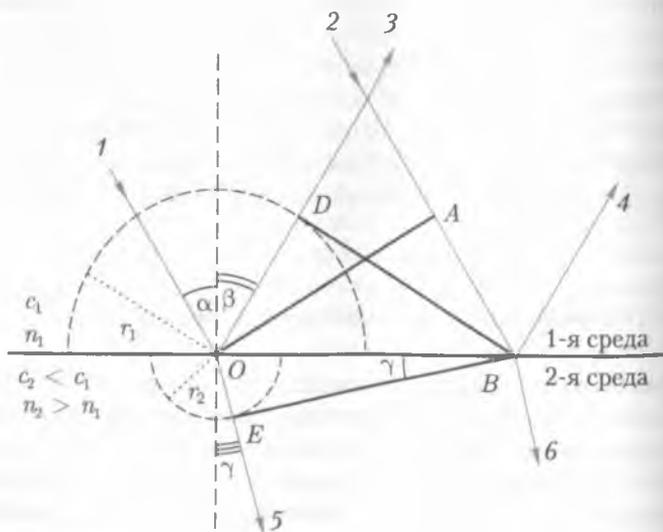


Рис. 13.1

Из рис. 13.1 видно, что  $\triangle OAB = \triangle BDO$  (как прямоугольные, имеющие общую гипотенузу и одинаковые катеты  $OD = r = \approx AB$ ). Поэтому  $\angle AOB = \angle DBO$ . Но  $\angle AOB = \alpha$ , а  $\angle DBO = \beta$  (как углы со взаимно-перпендикулярными сторонами), следовательно,

$$\alpha = \beta. \quad (13.1)$$

Угол  $\beta$  называется *углом отражения*.  
Соотношение (13.1) выражает

**закон отражения света: падающий и отраженный лучи лежат в одной плоскости с перпендикуляром, проведенным к границе раздела сред в точке падения; угол падения равен углу отражения.**

Возвращаясь к рис. 13.1, учтем, что

$$\frac{r_1}{r_2} = \frac{c_1}{c_2} = \frac{AB}{OE}; \quad AB = OB \sin \alpha; \quad OE = OB \sin \gamma.$$

Тогда получим

$$\boxed{\frac{\sin \alpha}{\sin \gamma} = \frac{c_1}{c_2}}. \quad (13.2)$$

Угол  $\gamma$  называется *углом преломления*.  
Соотношение (13.2) выражает

**закон преломления света: падающий и преломленный лучи лежат в одной плоскости с перпендикуляром к границе раздела сред, проведенным в точке падения; отношение синуса угла падения к синусу угла преломления равно отношению скорости света в первой среде к скорости света во второй среде.**

Из формулы (13.2) следует, что при  $\alpha = 0$   $\gamma = 0$  (так как  $c_1/c_2 \neq 0$ ), т.е. луч, падающий нормально на границу раздела сред, не преломляется.

Обозначим  $c_1 = \frac{c}{n_1}$ , а  $c_2 = \frac{c}{n_2}$ , где  $c$  — скорость света в вакууме, а  $n_1$  и  $n_2$  — безразмерные величины, называемые *абсолютными показателями преломления* первой и второй сред соответственно. Абсолютный показатель преломления (или просто показатель преломления) является важной оптической характеристикой среды: он показывает, во сколько раз скорость света в данной среде меньше скорости света в вакууме. Очевидно, что абсолютный показатель преломления больше единицы.

Учитывая, что показатели преломления двух сред обратно пропорциональны скоростям распространения света в этих средах, можно записать закон преломления в виде

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \gamma} = \frac{c_1}{c_2} = \frac{n_2}{n_1} = n_{21}, \quad (13.3)$$

где  $n_{21} = n_2/n_1$  называется *относительным показателем преломления второй среды относительно первой*.

Среда с меньшим показателем преломления называется оптически менее плотной, а среда с большим показателем — оптически более плотной.

Таким образом, можно сказать, что среда, во всех точках которой оптическая плотность (показатель преломления) одинакова, является оптически однородной.

Если свет проходит из оптически более плотной среды (с показателем преломления  $n_1$ ) в оптически менее плотную среду (с показателем преломления  $n_2 < n_1$ ), например из стекла в воздух, то согласно формуле (13.3) угол падения  $\alpha$  будет меньше угла преломления  $\gamma$  (рис. 13.2, а). Поэтому при некотором угле падения ( $\alpha = A$ ) угол преломления окажется равным  $90^\circ$ , т. е. преломленный луч будет скользить вдоль границы раздела сред, не входя во вторую среду (рис. 13.2, б). Угол  $A$  называется *предельным углом падения*. При  $\alpha > A$  свет полностью отразится в первую среду (рис. 13.2, в). Это явление носит название *полного отражения света*.

Согласно формуле (13.3)

$$\frac{\sin A}{\sin 90^\circ} = \frac{n_2}{n_1} = n_{21},$$

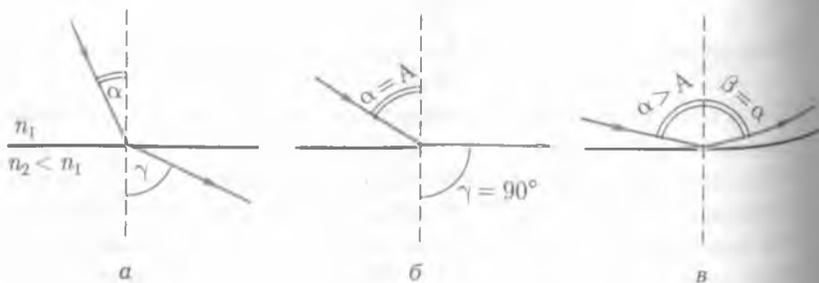


Рис. 13.2

$$\sin A = n_{21}. \quad (13.4)$$

Из этих соотношений можно определить относительный показатель преломления двух сред (по измеренному значению угла  $A$ ), а также абсолютный показатель преломления одной из сред, если показатель преломления другой среды известен.

### 13.3. Оптические приборы

**Линзы.** *Линзой* называют прозрачное для света тело, ограниченное двумя сферическими поверхностями.

На рис. 13.3, а—е показаны различные виды линз и принцип их получения из полных сферических тел. Как видно из рисунка, радиусы сферических поверхностей линз могут быть различными. Линзы изготовляют из любого прозрачного вещества, но наибольшее применение получили стеклянные линзы.

Прямую  $C_1C_2$ , проходящую через центры сферических поверхностей, ограничивающих линзу, называют *главной оптической осью*, а радиусы  $R_1$  и  $R_2$  сферических поверхностей, образующих линзу, — *радиусами кривизны линзы*. Если одна из поверхностей линзы плоская, то ее можно считать сферической с бесконечно большим радиусом кривизны ( $R = \infty$ ). В дальнейшем будем изучать только линзы с равными радиусами кривизны ( $R_1 = R_2$ ).

Толщина линз может быть различной. Рассмотрим линзы, толщина которых много меньше радиуса кривизны и расстояния их до предмета. Такие линзы называют *тонкими*.

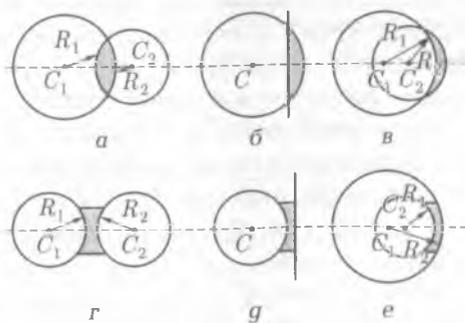


Рис. 13.3

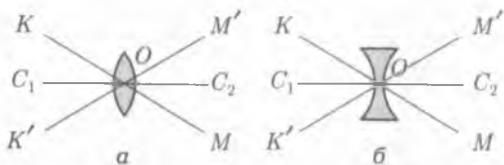


Рис. 13.4

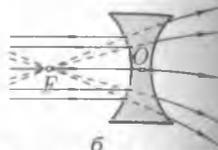
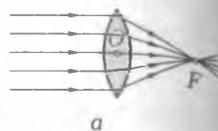


Рис. 13.5

В зависимости от назначения различают *собирающие* и *рассеивающие линзы*. У собирающей линзы (рис. 13.4, а; рис. 13.3, а—в) середина толще, чем края, независимо от формы поверхностей, а у рассеивающей, наоборот, толщина в середине меньше, чем по краям (см. рис. 13.3, г—е). Показатель преломления линз должен быть больше, чем у окружающей среды.

Точку  $O$ , расположенную в центре каждой линзы на главной оптической оси, называют оптическим центром линзы (см. рис. 13.4). Через оптический центр линзы кроме главной оптической оси можно провести любое количество побочных оптических осей ( $KM$  и  $K'M'$ ). Главная и побочные оси обладают той особенностью, что луч света, прошедший в их направлении, выходит из линзы непреломленным.

Причина, по которой выпуклые линзы в воздухе собирают, а вогнутые рассеивают свет, кроется в том, что выпуклая линза по оптическим свойствам аналогична двум трехгранным призмам, сложенным основаниями (рис. 13.5, а), а вогнутая линза — двум трехгранным призмам, сложенным вершинами (рис. 13.5, б). Каждая призма отклоняет лучи к своему основанию.

В случае собирающей линзы пучок лучей, параллельный главной оптической оси, собирается в одной точке  $F$ , а в случае рассеивающей линзы — расходится и собирается в продолжении этих лучей. Точку  $F$  называют главным фокусом линзы. У собирающей линзы он действительный (см. рис. 13.5, а), а у рассеивающей — мнимый (см. рис. 13.5, б), так как образуется не самими лучами, а их продолжениями.

Параллельный пучок лучей  $O'O$ , направленный вдоль одной из побочных осей, после преломления соберется в точке  $F_1$ , называемой побочным фокусом линзы (рис. 13.6). Плоскость  $\Phi$ , проходя-

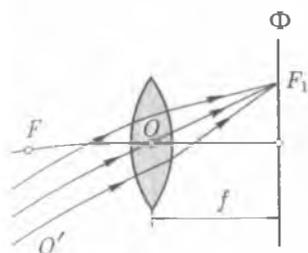


Рис. 13.6

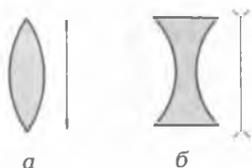


Рис. 13.7

щую через главный и побочный фокусы линзы перпендикулярно главной оптической оси, называют фокальной плоскостью линзы.

Каждая линза имеет два главных фокуса и две фокальные плоскости, отстоящие от оптического центра линзы на одинаковых расстояниях. Обозначим через  $f$  фокусное расстояние линзы (расстояние от фокуса линзы до ее оптического центра). Фокусное расстояние линзы — это основная ее характеристика. Чем больше фокусное расстояние, тем слабее линза преломляет лучи. С уменьшением фокусного расстояния преломляющая способность линзы возрастает.

Величину, которая характеризует преломляющие свойства линзы, называют *оптической силой линзы*:

$$D = 1/f. \quad (13.5)$$

Единицу оптической силы — диоптрию (дптр) — определяют из формулы (13.5). В СИ за 1 дптр принимают оптическую силу линзы, фокусное расстояние которой равно 1 м:

$$1 \text{ дптр} = 1 \text{ м}^{-1}.$$

Оптическая сила линзы зависит от кривизны ее поверхности  $R$  и показателя преломления  $n$  вещества, из которого изготовлена линза:

$$D = 2(n - 1)/R.$$

При определении  $D$  значение  $R$  для выпуклой линзы принимают положительным, а для вогнутой — отрицательным.

**Построение изображения в линзах.** Как мы установили, свойства линзы определяются положением ее фокусов. Следовательно, зная расстояние от предмета или источника света до линзы, фокусное расстояние, можно определить и расстояние до изображения. Для того чтобы построить изображение предмета и най-

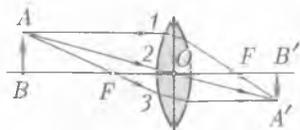


Рис. 13.8

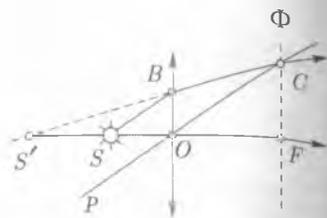


Рис. 13.9

ти его положение относительно линзы, нет необходимости рассматривать ход лучей внутри линзы. Собирающую линзу обычно представляют символом, показанным на рис. 13.7, а, а рассеивающую — символом, представленным на рис. 13.7, б. Выберем несколько лучей, при пересечении которых после их преломления найдем одну из точек изображения предмета (рис. 13.8).

1. Луч 1, параллельный главной оптической оси, преломившись в линзе, пройдет через ее главный фокус.

2. Луч 2 проходит через оптический центр линзы, не изменив направления.

3. Луч 3, проходящий через главный фокус линзы, преломившись, выйдет из нее параллельно главной оптической оси.

Для построения изображения любой точки предмета достаточно двух из этих трех лучей. Для построения изображения всего предмета достаточно построить изображение двух крайних точек (остальные точки находятся между ними). Некоторую трудность представляет построение изображения точки  $S$ , находящейся на оптической оси (рис. 13.9). Пусть из точки  $S$  вышел произвольный луч  $SB$  и попал на линзу в точку  $B$ . Для построения преломленного луча проведем побочную оптическую ось  $PC$ , параллельную  $SB$  до пересечения с фокальной плоскостью  $\Phi$ . Через точку  $C$  тогда должен пройти и преломленный луч  $BC$ . Так как лучи  $BC$  и  $SB$  расходятся, то изображение точки будет мнимым и окажется в точке  $S'$ .

**Формула линзы.** Построим изображение предмета  $AB$  с помощью лучей 1 и 2 (рис. 13.10) и рассмотрим полученные при этом треугольники. Из подобия треугольников  $OBA$  и  $OB'A'$ , а также треугольников  $CFO$  и  $FB'A'$  следует, что

$$\frac{|AB|}{|A'B'|} = \frac{|OB|}{|OB'|} \quad (13.6)$$

$$\frac{|OC|}{|A'B'|} = \frac{|OF|}{|FB'|}. \quad (13.7)$$

Так как  $|OC| = |AB|$ , то (13.7) можно записать в виде

$$\frac{|AB|}{|A'B'|} = \frac{|OF|}{|FB'|}. \quad (13.8)$$

Сравнив (13.8) и (13.6), заключаем, что

$$\frac{|OB|}{|OB'|} = \frac{|OF|}{|FB'|}. \quad (13.9)$$

Обозначим через  $d$  расстояние от предмета до линзы,  $f$  — расстояние от изображения до линзы и  $F$  — фокусное расстояние. Учитывая, что  $|FB'| = f - F$ , получим из (13.9)

$$d/f = F/(f - F), \text{ или}$$

$$df - dF = fF.$$

Разделив последнее равенство почленно на  $df \neq 0$ , найдем

$$\frac{1}{F} - \frac{1}{f} = \frac{1}{d}, \text{ откуда}$$

$$\boxed{\frac{1}{d} + \frac{1}{f} = \frac{1}{F}} \quad (13.10)$$

— **формула тонкой линзы** (справедлива как для собирающих, так и рассеивающих линз).

Для решения конкретных задач с использованием тонкой линзы необходимо условиться о правиле знаков при отсчете  $d$ ,  $f$  и  $F$ .

1. Если предмет, изображение и фокус действительные, то  $f$ ,  $d$ , и  $F$  подставляют в формулу (13.10) со знаком «+».

2. Если изображение мнимое, то  $f$  берут со знаком «-».

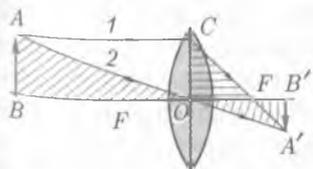


Рис. 13.10

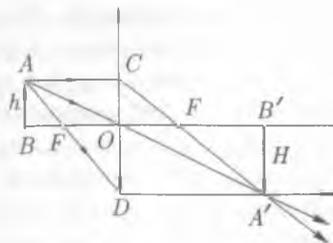


Рис. 13.11

3. Если у рассеивающей линзы фокус мнимый, то фокусное расстояние  $F$  берут со знаком «-».

4. Когда  $F$ ,  $d$  или  $f$  неизвестны, то вначале считаем их положительными. Если же в результате вычислений какая-либо из этих величин получается отрицательной, то это означает, что фокус, изображение или предмет являются мнимыми.

**Линейное увеличение линзы.** На практике иногда бывает необходимо получить увеличенное изображение предметов. В этом случае линзу характеризуют линейным увеличением  $\Gamma$  — отношением линейного размера  $H$  изображения к линейному размеру  $h$  предмета:

$$\Gamma = H/h.$$

На рис. 13.11 линейное увеличение линзы  $\Gamma = |A'B'|/|AB|$ . Так как  $\triangle ABO$  и  $\triangle A'B'O$  подобны, то

$$\frac{|A'B'|}{|AB|} = \frac{|OB'|}{|OB|}.$$

Но в общем случае  $|OB'| = f$  и  $|OB| = d$ , отсюда

$$\frac{|A'B'|}{|AB|} = \frac{H}{h} = \frac{f}{d}, \text{ т.е.} \quad (13.11)$$

$$\Gamma = f/d. \quad (13.12)$$

Из (13.11) и (13.12) следует, что собирающая линза дает увеличение только в тех случаях, когда изображение оказывается от линзы дальше, чем предмет ( $\Gamma > 1$ ). Для рассеивающей линзы всегда  $\Gamma < 1$ , т.е. она не может дать увеличенного изображения предмета.

**Фотоаппарат.** Фотография как метод регистрации изображения предметов была изобретена в 30-х гг. XIX в. В настоящее время ее применяют в самых различных областях жизни. Большую роль играет она в науке и технике. Фотопластинка или фотопленка могут регистрировать излучение, недоступное глазу человека. Кроме того, фотопластинки обладают документальностью. Их можно хранить, как книги в библиотеке, сравнивать друг с другом, получая новые результаты с ростом качества измерительной техники. Особо большое распространение получил фотографический метод в астрономии, естественных науках и искусстве.

Изображение новых конструкций сложных линз, новых сортов стекол, применение так называемой просветленной оптики — все



Рис. 13.12

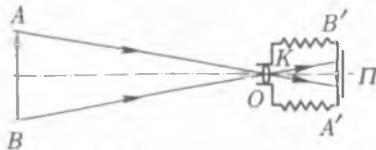


Рис. 13.13

это позволило изготавливать современные аппараты небольших размеров, с полуавтоматической или автоматической системой управления процессом фотографирования.

Фотография стала малоформатной, моментальной, цветной, стереоскопической. Улучшение чувствительности и качества фотопленок позволило во многих случаях обходиться без получения изображения больших размеров на самой пленке и соответственно уменьшить размеры камер фотоаппаратов.

Внешний вид современного любительского фотоаппарата представлен на рис. 13.12, а схематический ход лучей в этом оптическом приборе — на рис. 13.13. Объектив  $O$  фотоаппарата, представляющий собой собирающую линзу, создает изображение  $A'B'$  предмета  $AB$  на пленке  $\Pi$  у задней стенки камеры. Так как в большинстве случаев предмет находится за двойным фокусным расстоянием, то изображение получается уменьшенным, действительным и обратным (перевернутым). Перемещая объектив с помощью винтовой резьбы или изменяя размер камеры  $K$  фотоаппарата, изготовленной в виде «гармошки», можно изменять расстояние между объективом и пленкой. Время экспозиции, т. е. дозировка количества световой энергии на фотопленку, определяется затвором. Освещенность пленки меняется с помощью диафрагмы. При достаточно хорошем наружном освещении диафрагмирование объектива улучшает также и качество изображения. Дело в том, что, диафрагмируя объектив, мы закрываем края линз, которые наиболее интенсивно преломляют падающие лучи. После диафрагмирования объектив «работает» только центральной частью, давая четкое и глубокое изображение предметов.

**Проекционные аппараты.** Для получения на экране действительного, прямого, увеличенного изображения используют различные проекционные аппараты. Их широко применяют в учебном процессе, лекционной и пропагандистской работе.

На экране можно получить изображение рисунка, выполненного как на непрозрачной, так и на прозрачной основе (диапозитив)

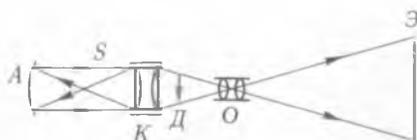


Рис. 13.14

тив). Такие комбинированные аппараты называют *эпидиаскопами*. Если же проекционный аппарат предназначен только для демонстраций изображений предметов, нанесенных на фотопленку, то он носит название *диапроектора*. В настоящее время получили широкое применение *кодоскопы* — аппараты для получения изображений предмета, нанесенных на пленку довольно больших размеров (порядка 13—20 см). Схема устройства простейшего проекционного аппарата и ход лучей показаны на рис. 13.14. Здесь *S* — источник света, *K* — конденсор, представляющий собой систему линз для концентрации света от источника до диапозитива *D*, *O* — объектив, *A* — рефлектор и *Э* — экран.

**Глаз как оптическая система.** Глаз человека — сложно устроенный орган, который можно рассматривать как некую оптическую систему.

Строение глаза показано на рис. 13.15. Форма глаза почти шарообразная, диаметр — около 2,5 см. Зрачок может сужаться и расширяться в зависимости от яркости окружающих предметов от 2 до 8 мм. Хрусталик имеет сложное строение и вместе с роговицей (плотной прозрачной оболочкой) и стекловидным телом образует оптическую систему. Основная роль в этой системе принадлежит хрусталику, состоящему из прозрачного вещества и выполняющему роль линзы с переменным радиусом кривизны.



Рис. 13.15

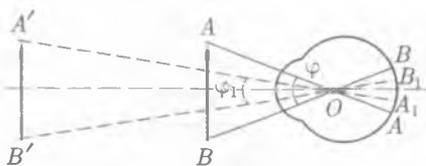


Рис. 13.16

Кольцевая мышца, охватывающая хрусталик снаружи, может автоматически изменять кривизну его поверхности, а значит, и оптическую силу глаза.

Свет через роговицу, зрачок и хрусталик попадает на сетчатку глаза. Нервные окончания сетчатки представляют световые раздражения в кору головного мозга, где и возникают зрительные представления о предметах. Глаз как оптический прибор очень похож на фотоаппарат. Роль диафрагмы здесь выполняет зрачок. Так же как в фотоаппарате, изображения на сетчатке глаза получаются действительными, уменьшенными и обратными. Мозг человека способен не только исправлять недостатки оптической системы, делая ее очень совершенной, но и позволяет видеть все предметы в натуральных положениях.

Размер изображения на сетчатке глаза определяется углом зрения  $\varphi$ , образованным прямыми, проведенными из оптического центра глаза к крайним точкам предмета (рис. 13.16). При большом  $\varphi$  изображение на сетчатке достаточно велико, в восприятии принимает участие большое количество окончаний светочувствительного нерва и человек различает детали рассматриваемого предмета.

Угол зрения определяется размерами предмета и расстоянием до него. Наибольший угол зрения, при котором предмет еще воспринимается как точка, называют предельным углом зрения (составляет от  $30''$  до  $1'$ ).

Глаз, не напрягаясь, видит объекты зрения, находящиеся на расстоянии 6 м и далее. Для более близких предметов плоскость их четкого изображения уже не совпадает с сетчаткой и хрусталик должен менять свое фокусное расстояние. Он обладает гибкостью, эластичностью и может изменять оптическую силу глаза от 58 до 12 дптр. Способность оптической системы глаза создавать отчетливые изображения предметов, находящихся на различных расстояниях, называют *аккомодацией*. Меньше всего глаз устает при рассматривании далеких предметов, т.е. тогда когда он аккомодирован из бесконечность. У задумавшегося человека глаза самопроизвольно аккомодируются на бесконечность.

Способность глаза приспосабливаться к различной степени яркости наблюдаемых предметов называют *адаптацией*. Так, ночью чувствительность глаза в несколько миллиардов раз больше, чем днем. Глаз обладает зрительной инерцией. Это свойство зрения имеет большое значение. Его используют в телевидении, оно является основой современного кино. Действительно, изображения на экране сменяют друг друга со скоростью около 20 кадров в секунду. Во время замены кадра киноплёнки объектив киноаппарата закрыт. Экран не освещен, однако в силу инерции зрения мы этого не замечаем (*стробоскопический эффект*). Таким способом и создается эффект движения тел на экране. Для того чтобы лучше рассмотреть предмет (увеличить угол зрения), необходимо, видимо, приблизить его к глазу. Однако приближение предмета на расстояние около 20—25 см не только сильно утомляет глаза, но и не позволяет рассмотреть детали предмета.

**Очки.** Для людей с нормальным зрением расстояние наилучшего зрения  $L$  составляет около 25 см. У близоруких людей (в основном от рождения или от неправильного длительного светового режима) фокальная плоскость оптической системы глаза находится перед сетчаткой и  $L < 25$  см, а у дальнозорких — за сетчаткой и  $L > 25$  см. Если близорукость не устранили в самом раннем детстве (так называемая «ложная близорукость»), то ее, так же как и дальнозоркость, устраняют с помощью очков. Людям близоруким помогают очки с рассеивающими линзами (рис. 13.17, а), дальнозорким (обычно после 40 лет) — с собирающими линзами (рис. 13.17, б). Очки перемещают фокальную плоскость на сетчатку

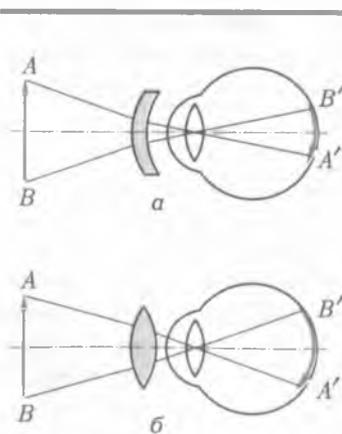


Рис. 13.17

ку глаза, не изменяя оптической силы всей системы. Зрение двумя глазами создает объемность воспринимаемого образа.

**Лупа.** Если человек хочет рассмотреть какие-то мелкие детали предмета или мелкие предметы, то он старается поднести их как можно ближе к глазам, т.е. хочет, с точки зрения оптики, увеличить угол зрения.

Однако существует предел accommodation глаза, и как бы мы ни старались увидеть больше, чем видно из расстояния наилучшего зрения, нам это не удастся без перенапряжения глаза.

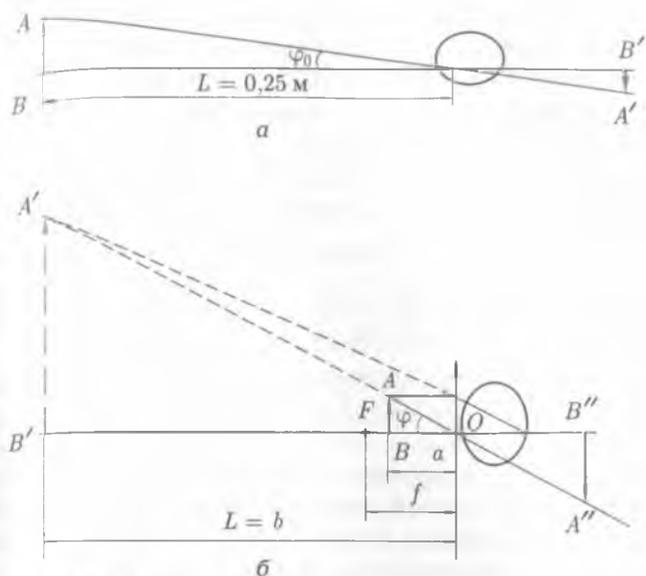


Рис. 13.18

Рассмотреть маленький предмет нам помогает простейший оптический прибор, названный *лупой*. Лупа представляет собой двояковыпуклую линзу с малым фокусным расстоянием (обычно не более 10 см). Ее располагают близко к глазу, а предмет помещают недалеко от фокальной плоскости лупы между фокусом и самой лупой.

На рис. 13.18, а показаны небольшой предмет  $AB$ , помещенный на расстоянии наилучшего зрения  $L$ , и его изображение на сетчатке глаза  $A'B'$ . Предмет наблюдают под углом зрения  $\varphi_0$ . На рис. 13.18, б показан тот же предмет  $AB$ , но помещенный недалеко от фокальной плоскости лупы.

При расчетах, связанных с лупой, практически можно считать, что  $f \approx a$ . Здесь  $a$  — расстояние от оптического центра лупы до предмета. Лупа дает в этом случае увеличенное, прямое и минимальное изображение  $A'B'$ , которое и рассматривается глазом под углом  $\varphi$ . Изображение расположено на расстоянии  $b$  от оптического центра лупы, равного расстоянию наилучшего зрения  $L$ . Совершенно очевидно, что углы зрения в обоих случаях неодинаковы. Так как  $\varphi > \varphi_0$ , то и изображение  $A''B''$  предмета на сетчатке больше, чем его изображение  $A'B'$ , видимое невооруженным глазом.

Угловое и линейное увеличения лупы. Угловым увеличением лупы называют число, показывающее, во сколько раз угол  $\varphi$ , под которым глаз видит изображение предмета в приборе, больше угла зрения  $\varphi_0$ , под которым предмет виден невооруженным глазом.

$$S = \varphi / \varphi_0.$$

Ввиду того что углы  $\varphi$  и  $\varphi_0$  очень малы,

$$S \approx \text{tg } \varphi / \text{tg } \varphi_0.$$

Из рис. 13.18, б следует, что  $\text{tg } \varphi = |AB|/a$  и  $\text{tg } \varphi_0 = |AB|/L$ . Если  $a \approx f$  и тогда окончательно имеем

$$S = \frac{|AB| \cdot L}{|AB| \cdot a} = \frac{L}{a} = \frac{L}{f}. \quad (13.13)$$

Отсюда следует, что угловое увеличение при постоянном расстоянии наилучшего зрения зависит лишь от фокусного расстояния лупы. Однако  $f$  можно менять только в небольших пределах: при очень маленьких фокусных расстояниях лупы (очень выпуклой лупе) предмет придется так близко подносить к ней, что его практически нельзя будет увидеть. Увеличение лупы колеблется от  $2\times$  до  $4\times$  (знак  $\times$  означает кратность увеличения).

Сравним (13.13) с выражением (13.12) для линейного увеличения линзы. Из рис. 13.18, б видно, что  $L = b$  и  $a \approx f$  и для лупы

$$\Gamma = S.$$

Это означает, что линейные размеры предмета с помощью лупы можно увеличивать в 2—40 раз.

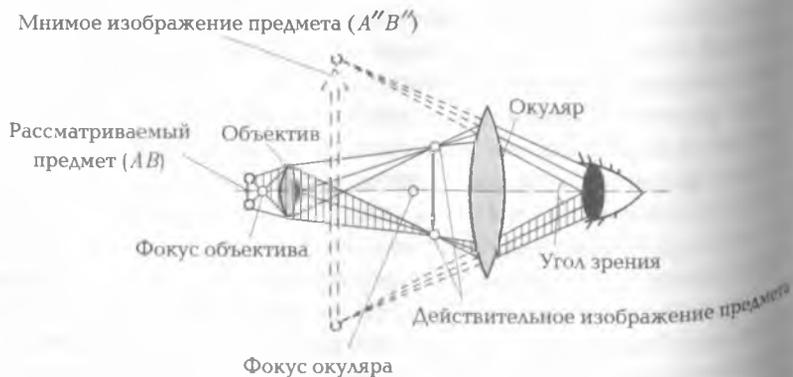


Рис. 13.19

**Микроскоп.** Прибор, с помощью которого можно получать большие увеличения, называют *микроскопом*. Он состоит из оптических линз большой силы (рис. 13.19).

Одна из линз — объектив — дает увеличенное, действительное, обратное изображение объекта, которое затем рассматривают через другую линзу — окуляр. Окуляр в этом случае выполняет роль лупы, дающей, как известно, изображение увеличенное, мнимое и прямое относительно изображения объектива, увеличенное, мнимое и обратное относительно объекта.

Изучаемый объект располагают чуть дальше фокуса объектива, но практически можно считать  $a \approx f_{об}$ . Расположение промежуточного изображения относительно окуляра должно быть тем же, что и при рассмотрении предмета лупой.

Обычные микроскопы дают увеличение в 200—300 раз. Для получения больших увеличений применяют электронные микроскопы. Это очень сложные устройства, в которых предмет «освещают» не обычным светом, а пучком электронов, который также можно рассматривать как волну с не очень большими частотами. Увеличения, создаваемые электронными микроскопами, составляют 30 тыс. раз. Полученные с помощью микроскопа фотографии еще больше увеличивают, и таким образом общее увеличение может составить до 1 млн раз.

Рассмотрев оптическую схему микроскопа и применив формулы (13.12) и (13.13), можно найти выражение для линейного увеличения микроскопа в виде

$$\Gamma = \frac{L\Delta}{f_1 f_2}, \quad (13.14)$$

где  $\Delta$  — расстояние от объектива до изображения, практически равное расстоянию от объектива до переднего фокуса окуляра. Ввиду того что фокусное расстояние окуляра мало,  $\Delta$  приблизительно равно расстоянию от объектива до окуляра, или длине тубуса микроскопа.

Следовательно, в формуле (13.12)  $b = \Delta$ , а  $a = f_1$  — фокусному расстоянию объектива (линзы). В (13.13) мы положили, что  $b = L$  — расстоянию наилучшее зрения, а  $a = f_2$  — фокусному расстоянию окуляра (лупы). В итоге заключаем, что

линейное увеличение микроскопа равно произведению увеличения объектива на увеличение окуляра; оно тем больше, чем меньше фокусные расстояния объектива и окуляра.

**Телескоп.** В 1609 г. Г. Галилей с помощью зрительной трубы сконструированной и изготовленной им самим, наблюдал звезды. Этот год считается годом изобретения телескопа, а заслуга его изобретения приписывается Галилею, хотя независимо от него несколько ранее рядом ученых уже были построены зрительные трубы.

Телескоп Галилея состоял из трубы, на концах которой были смонтированы объектив в виде выпуклой собирающей линзы и окуляр в виде вогнутой рассеивающей линзы (рис. 13.20). Угловое увеличение телескопа Галилея было относительно небольшим (порядка 30), а примененная там оптическая схема сохранилась теперь только в театральных биноклях.

**Телескоп** — это прибор, предназначенный для наблюдения далеких объектов, которые не могут быть приближены к глазу. Ввиду колоссальности расстояний до небесных тел можно считать, что поток света от них идет в виде параллельных лучей и, следовательно, объектив работает как собирающая линза. Изображение, создаваемое объективом, действительное, обратное и уменьшенное.

Окуляр, действующий как лупа, дает изображение, рассматриваемое глазом. Изображение, полученное с помощью окуляра мнимое, увеличенное и прямое. То, что в глазу мы получаем перевернутое изображение небесного тела, нас не должно смущать, так как понятия «низ» и «верх» для небесных тел чисто условные. Объектив дает изображение предмета в своей фокальной плоскости, а окуляр располагается так, чтобы это изображение находилось и в его главном фокусе. В этом случае расстояние между объективом и окуляром равно сумме фокусных расстояний объектива  $f_{об}$  и окуляра  $f_{ок}$ , т.е. длина  $L$  трубы телескопа

$$L = f_{об} + f_{ок}.$$

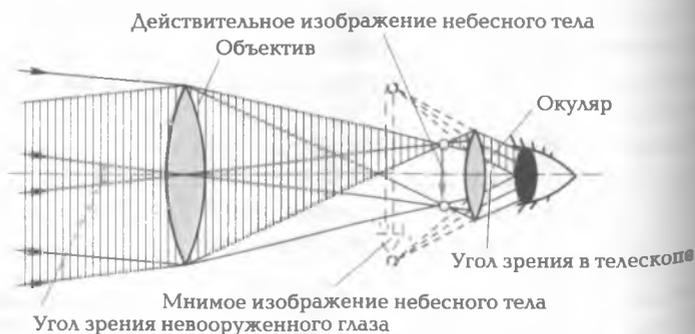


Рис. 13.20

*Увеличение телескопа.* В телескопе наблюдатель видит объект под углом  $\varphi$ , а для невооруженного глаза угол зрения составляет  $\varphi_0$ . В конечном итоге угловое увеличение телескопа определяется как

$$S = \frac{f_{об}}{f_{ок}}. \quad (13.15)$$

Говоря об угловом увеличении, получаемом с помощью телескопов, следует иметь в виду, что это понятие можно применять только к случаю визуальных наблюдений так называемых протяженных объектов, к которым относятся Солнце, Луна, планеты, галактики, туманности, но не звезды.

Может возникнуть впечатление, что согласно соотношению (13.15) можно получить очень большие изображения небесных объектов. Особенно это привлекательно при наблюдении планет. Однако это не так. Фокусное расстояние окуляра можно уменьшить только до известных пределов. Окуляры с очень маленьким  $f_{ок}$  имеют и очень малые размеры; такой окуляр пропускает очень мало света.

Увеличение фокусного расстояния объектива повлечет за собой увеличение его размеров, а следовательно, и массы. Самые крупные линзовые объективы имеют диаметр порядка 1 м.

Звезды находятся на очень больших расстояниях от Земли. Достаточно сказать, что ближайшая звезда отстоит от Земли на расстоянии в  $2,7 \cdot 10^5$  раз больше, чем расстояние от Земли до Солнца. Даже в самый крупный телескоп настоящего и будущего никогда не удастся увидеть звезду в виде диска — любая звезда в телескоп наблюдается в виде светящейся точки или дифракционного кружка.

*Одно из основных назначений телескопа* состоит в увеличении угла зрения.

Поэтому мы не только можем увидеть на Солнце, Луне и планетах некоторые детали, не видимые невооруженным глазом, но и различаем многие звезды, составляющие двойные и кратные системы.

*Другое назначение телескопа* состоит в том, чтобы собрать объективом как можно больше света.

Чем больше диаметр объектива, тем больше он собирает света. При визуальных наблюдениях в глаз попадает во столько раз больше света, во сколько раз площадь объектива больше площади зрачка глаза.

Если невооруженным глазом мы видим одновременно на небе 6 тыс. звезд, то телескоп регистрирует их уже более 2 млрд.

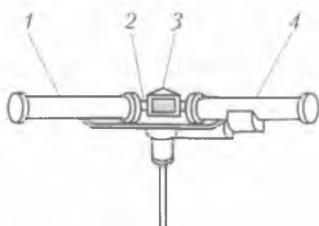


Рис. 13.21

В заключение отметим, что визуальный метод наблюдения небесных тел в астрофизике заменен фотографическим и фотоэлектрическим методами. Последний метод предусматривает регистрацию излучения с помощью фотозащитных элементов, имеющих еще большую чувствительность, чем фотопластинки (фотопленка). Итак,

**микроскоп** — физический прибор, где создают возможно большие линейные увеличения объекта, тогда как в телескопе — угловые увеличения.

**Спектроскоп.** Прибор для разложения сложного света и наблюдения спектров называется *спектроскопом*. Спектроскоп (рис. 13.21) состоит из двух труб — коллиматорной 1 и зрительной 4, укрепленных на подставке 2, и стеклянной призмы 3 под крышкой. На одном конце коллиматорной трубы имеется щель для выделения узкого пучка света, на другом ее конце — линза для превращения расходящегося пучка света в параллельный пучок. Параллельный пучок света, выходящий из коллиматора, попадает на грань стеклянной призмы. Показатель преломления света зависит от его длины волны; поэтому пучок света, состоящий из волн с разной длиной волны, разлагается на параллельные пучки света разного цвета, идущие по разным направлениям. Линза зрительной трубы фокусирует каждый из параллельных пучков и дает таким образом изображение щели (рис. 13.22). Разноцветные изображения щели образуют разноцветную полосу — спектр.

Спектр можно наблюдать через окуляр, используемый в качестве лупы. Если нужно получить фотографию спектра, то фотопленку или фотопластинку помещают в том месте, где получается действительное изображение спектра. Прибор для фотографирования спектров называется *спектрографом*.

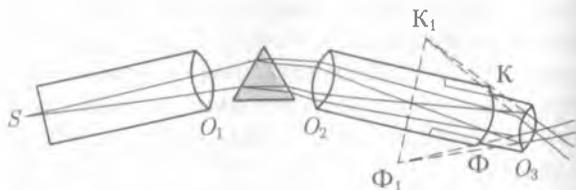


Рис. 13.22

**Оптическая спектроскопия как метод изучения состава вещества.** *Оптическая спектроскопия* — раздел оптики, изучающий химический состав веществ на основе исследования их оптических спектров. Основными приборами для изучения оптических спектров являются спектроскоп и спектрограф.

Метод определения химического состава вещества по его спектру называется *спектральным анализом*. Различают качественный спектральный анализ, с помощью которого устанавливаются химические элементы, входящие в состав вещества, и количественный, позволяющий по интенсивности спектральных линий химического элемента определить его количественное содержание в исследуемом образце.

Достоинствами спектрального анализа являются его высокая чувствительность и быстрота получения результатов. Например, с помощью спектрального анализа можно обнаружить наличие химического элемента, масса которого в данном образце не превышает  $10^{-10}$  г. Кроме того, данный анализ позволяет определять химический состав отдельных тел, например звезд.

Спектральный анализ является основным методом контроля состава вещества в металлургии, машиностроении и атомной промышленности. Он позволяет контролировать составы сплавов и примесей, вводимых в металлы для получения материалов с заданными свойствами. Кроме того, данный вид анализа широко применяется для определения химического состава образцов руды и минералов в геологии, при анализе состава почвы, различных находок в археологии, красок при реставрационных работах, в криминалистике и т. д.

Спектральный анализ позволяет определять химический состав небесных тел, удаленных от Земли на расстояние в миллионы световых лет, газовых облаков в межзвездном пространстве, температуру звезд. По смещению спектральных линий можно установить скорость движения небесных тел, в частности, именно благодаря изучению спектров галактик было обнаружено, что наша Вселенная расширяется.

**Дисперсия света.** Наука о строении и составе небесных тел — *астрофизика*, а также физика твердого тела, жидкостей и газов и многие области техники и естественных наук обязаны своим существованием открытию, сделанному И. Ньютоном в 1666—1667 гг. Наблюдая звезды в телескоп своей конструкции, Ньютон обнаружил радужную окраску изображений. Заинтересовавшись этим явлением, он провел ряд опытов с пропусканием пучка солнечного света через стеклянную трехгранную при-

зму и обнаружил, что призма не только преломляет падающий на одну из граней пучок белок, света, но и разлагает его на семь цветов: красный, оранжевый, желтый, зеленый, голубой, синий и фиолетовый.

Разноцветную полоску, которая образуется при прохождении света через призму, Ньютон назвал *спектром* (рис. 13.23), а явление разложения света призмой — *дисперсией* (от лат. *dispersio* — рассеяние).

Для запоминания основных цветов и порядка их чередования в спектре можно воспользоваться одним из так называемых мнемонических правил: Каждый Охотник Желает Знать, Где Сидит Фазан. Первые буквы каждого слова этой фразы совпадают с первыми буквами цветов спектра.

В своих опытах Ньютон заметил также еще одну особенность. Если через призму пропускать свет какого-либо одного цвета (мономохроматическое излучение), то эти лучи испытывают преломление лишь к основанию призмы, но не разлагаются на составные цвета. Кроме того, Ньютоном было отмечено, что лучи различных цветов испытывали и различное преломление, но сами всегда располагались в одном и том порядке: большее преломление испытывали фиолетовые лучи и меньшее — красные. Это означало, что показатель преломления зависит от длины волны падающего света.

С другой стороны, длина волны и скорость ее распространения в той или иной среде взаимосвязаны:  $\lambda = \frac{c}{\nu}$ . Пусть  $n_k$  и  $n_\phi$  — показатели преломления стекла соответственно для красных и фиолетовых лучей, а  $v_k$  и  $v_\phi$  — скорости распространения этих лучей в стекле. Тогда  $n_k = c/v_k$  и  $n_\phi = c/v_\phi$ . Из опыта по разложению света следует, что  $n_k < n_\phi$  и, следовательно,  $(c/v_k) < (c/v_\phi)$ .

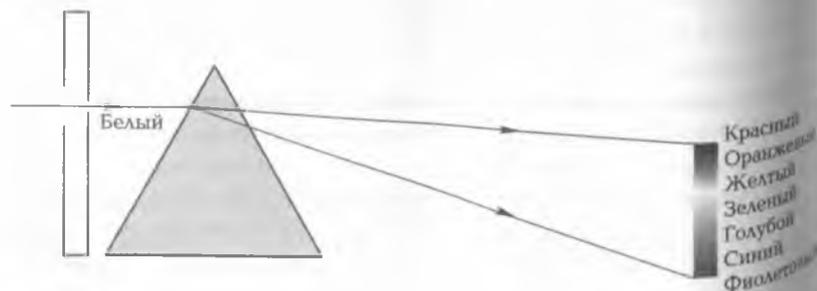


Рис. 13.23

или  $v_k > v_{\text{ф}}$ , т. е. скорость распространения красных лучей в стекле больше, чем фиолетовых.

Показатель преломления света зависит от его цвета, определяемого длиной волны (частотой), или от скорости распространения лучей в той или иной среде.

Следовательно, разложение белого цвета в спектр происходит в призме из-за различия скоростей движения составляющих этого сложного излучения в веществе призмы.

**Цвета тел.** Белый свет было бы неверно рассматривать как простую смесь цветов. Его разложение на цвета есть результат действия призмы или другого спектрального прибора. В этом смысле сложный свет похож на звук. Музыкальный аккорд есть сложный звуковой импульс, воспринимаемый нами как целое. С помощью анализаторов (резонаторов) можно выделить из него простые тона, но это совсем не значит, что музыкальный звук является простой смесью этих тонов.

Представление света как совокупности простых монохроматических волн различных цветов удобно для рассмотрения большого числа практических вопросов, но оно является лишь приближением к действительности. Именно сложным строением света и объясняется все многообразие цветов и их оттенков в природе. Все окрашенные тела кажутся нам цветными при освещении их белым светом. Действие краски схематически изображено на рис. 13.24. От верхнего слоя белый свет частично отражается (около 5%), а остальная его часть проникает в глубь краски. Атомы и молекулы вещества, из которого состоит краска и ее основа (масло, ацетон, вода и т. д.), по-разному поглощают свет разной длины волны (разного цвета): одни цвета поглощаются больше, другие — меньше. Выходящая наружу часть отраженного света и определяет цвет краски. Следовательно, если окрашенная поверхность при освещении ее белым светом нам видится голубой, это означает, что краска хорошо поглощает все цвета, кроме голубого.

Если падающий на окрашенную поверхность (например, картину) свет по своему составу отличается от дневного, то эффекты освещения могут быть совершенно другими. Даже переход от дневного света к искусственному значительно меняет соотношение цветов и оттенков предметов и особенно художественных



Рис. 13.24

произведений. Желтые и зеленые цвета кажутся при вечернем освещении более тусклыми, а синий цвет — почти черным. С этим должны считаться художники и дизайнеры при оформлении сцен, помещений для работы и отдыха, при организации представлений и парадов на открытом воздухе. С учетом зрительного эффекта должны подбираться сочетания красок для витрин, афиш, рекламных плакатов и т. д.

Цвет прозрачных тел обусловлен проходящими через них лучами. Так, красное стекло пропускает преимущественно красные лучи (и поглощает остальные), зеленое — зеленые и т. д. На этом принципе основано применение различных световых фильтров.

Глаз человека имеет наибольшую чувствительность к желто-зеленым лучам. Ввиду этого светофильтры очков должны не только ослаблять световой поток, но и не утомлять зрение их неестественным цветом.

С явлением разложения белого света на составляющие цвета мы часто встречаемся в природе. Так, возникающая после грозового дождя радуга представляет собой разложение солнечного света на спектр в естественных условиях. Разложение света происходит на крупных капельках воды, в изобилии находящихся после грозы в воздухе. Иногда зимой в морозную погоду можно наблюдать радужный ореол вокруг Луны и ламп уличного освещения. Здесь также происходит дисперсия света на кристалликах льда. Такое же явление можно наблюдать и при очень влажном воздухе, например в тумане.

**Синтез белого света.** Опыты, проведенные Ньютоном, показали, что призма при прохождении через нее белого света не окрашивает этот свет в различные цвета, а лишь разделяет его на составные части. Для того чтобы доказать это утверждение, Ньютон провел обратный опыт по синтезу белого света. На пути белого света он установил две призмы, одна из которых  $\Pi_1$  разлагала



Рис. 13.25

свет на цветовые пучки, а другая  $P_2$  собирала их. В результате вновь получился белый цвет (рис. 13.25).

Очень простой опыт по синтезу белого света можно осуществить с помощью так называемого круга Ньютона. Круг может вращаться вокруг оси, а сам он разделен на семь секторов, окрашенных во «все цвета радуги». Быстрое вращение диска создает впечатление сложения семи цветов, но диск наблюдатель видит серым. Это отличие его от белого цвета связано с тем, что спектр белого света очень сложен и в нашем случае отсутствуют промежуточные цвета: в белом же свете последовательность цветов спектра непрерывна и каждый цвет переходит в соседний плавно и постепенно.

Сложность спектрального состава света и разнообразие длин волн зрением не фиксируется, и мы всегда воспринимаем либо какой-то один определенный, либо белый цвет. Слушая сложный аккорд, составленный из нескольких нот разной высоты, опытный музыкант точно может назвать все ноты, звучавшие одновременно. Зрение же на это не способно, для него все электромагнитные колебания сливаются в единый цвет.

В 1807 г. английский физик Т. Юнг заметил, что белый цвет можно получить путем смешения трех монохроматических лучей: красного, зеленого и синего. Все остальные цвета спектра и разнообразные оттенки также можно получить комбинацией этих трех цветов, но никаким смешением других цветов нельзя получить красного, зеленого или синего.

Поэтому эти три цвета были названы основными, или первичными. Каждый монохроматический луч дает какой-либо цвет, но каждому цвету не всегда соответствует монохроматическое излучение. Это значит, что окраска лучей зависит от той пропорции, в которой смешиваются три основных цвета.

Интересно, что белый цвет можно получить смешением каких-либо цветов (желтого и синего, оранжевого и голубого, фиолетового и желто-зеленого). Такие цвета называются дополнительными. Свойства основных цветов лежат в основе современных цветных кино, телевидения и фотографирования, являющихся пока трехцветными.

Интересно отметить, что если смешать красный, зеленый и синий цвета в разных фотометрических количествах (например, каждого по 1 лм), то получится против ожидания не белый, а синий цвет. Чтобы получить белый цвет, нужно взять красный поток в 1 лм, зеленый в 4,6 лм и добавить синего всего в 0,06 лм.

### 13.4. Волновые свойства света

**Интерференция света.** Явление наложения когерентных волн в результате которого происходит устойчивое в пространстве ослабление или усиление интенсивности света в зависимости от фазовых соотношений складываемых световых волн, называется *интерференцией света*.

Интерференция света наблюдается, если источники когерентны. Источники когерентны при двух условиях:

- 1) частоты испускаемых ими волн одинаковы;
- 2) разность фаз между ними со временем не изменяется.

Реальные источники света всегда излучают некогерентные волны, так как примерно через каждые  $10^{-8}$  с ориентировка световой волны, излучаемой атомом, изменяется. Поэтому невозможно получить когерентные волны от двух независимых источников света.

Для того чтобы образовать когерентные волны, разделяют волны, идущие от одного источника. При этом между ними возникает определенная постоянная разность фаз (оба условия когерентности удовлетворяются).

Разделение пучка осуществляется различными методами: с помощью билинзы, бизеркала, бипризмы. Интерференционная картина от монохроматического света представляет собой чередование темных и светлых полос, что соответствует минимуму и максимуму интенсивности.

Введем понятие разности хода волн. *Геометрической разностью хода волн* называется разность расстояний от источников волн до точки, где происходит интерференция (рис. 13.26).

Для световых волн существенное значение имеет показатель преломления среды, так как при переходе световой волны из вакуума в вещество длина волны уменьшается:  $\lambda = \lambda_0/n$ . Поэтому

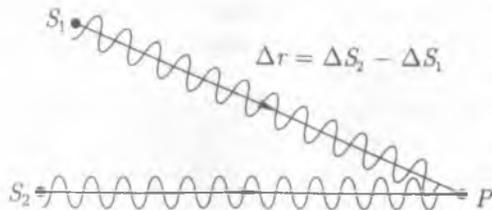


Рис. 13.26

уменьшается и пройденный путь. Для учета влияния оптической плотности среды вводят понятие оптической длины пути. Оптическая длина пути равна произведению пути световой волны в данной среде на ее абсолютный показатель преломления:

$$\varphi = rn. \quad (13.16)$$

Разность оптических длин путей двух волн называется *оптической разностью хода*:

$$\delta = \varphi_2 - \varphi_1 = nr_1 - nr_2 = n \Delta r. \quad (13.17)$$

Если оптическая разность хода волны равна четному числу половин, т. е.  $\delta = \pm 2k \frac{\lambda}{2}$ , где  $k = 1, 2, 3, \dots$ , то наблюдается усиление

интенсивности световых волн, если нечетному:  $\delta = \pm(2k + 1) \frac{\lambda}{2}$ , то ослабление.

Таким образом, появление максимума или минимума интенсивности зависит не от самой разности хода, а от соотношения между ней и длиной световой волны. Поэтому при интерференции белого света возникает так называемый интерференционный спектр.

Познакомимся с некоторыми интерференционными явлениями, возникающими при отражении света от тонких прозрачных пластин (пленок).

Пусть на тонкую пленку толщиной  $d$  падают параллельные лучи монохроматического света (рис. 13.27). Очевидно, что из некоторой точки  $C$  будут выходить два практически совпадающих когерентных луча: луч 1, отраженный от верхней поверхности

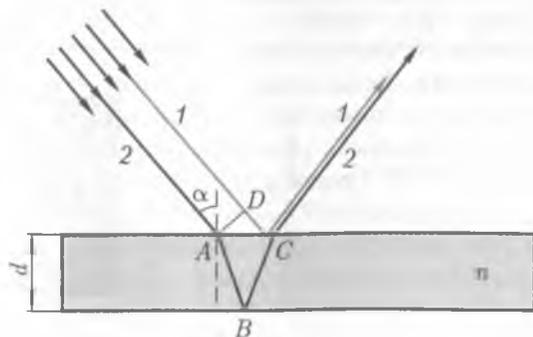


Рис. 13.27

пленки, и луч 2, отраженный от нижней ее поверхности. Поскольку, что разность хода  $\Delta l$  этих лучей зависит от величины угла падения  $\alpha$  и от толщины пленки  $d$ . Кроме того,  $\Delta l$  зависит еще и от показателя преломления  $n$  вещества пленки, так как на участке  $ABC$  луча 2 световые волны распространяются со скоростью в  $n$  раз меньшей, чем на участке  $DC$  луча 1. Это ведет к увеличению разности фаз волн, а следовательно, и разности хода лучей. Поэтому в данном случае следует рассматривать оптическую разность хода лучей:

$$\Delta l = (AB + BC)n - (CD + \lambda/2).$$

Предполагается, что показатель преломления среды, окружающей пленку, равен единице.

Член  $\lambda/2$  появляется в связи с тем, что у световой волны, отражающейся от оптически более плотной среды, фаза изменяется на  $\pi$ , а у волны, отражающейся от оптически менее плотной среды, фаза не изменяется. Поскольку луч 1 отражается (в точке  $C$ ) от оптически более плотной среды, а луч 2 отражается (в точке  $B$ ) от оптически менее плотной среды, то разность фаз этих лучей изменяется на  $\pi$ , что соответствует изменению разности хода лучей на  $\lambda/2$ .

Если разность хода равна целому числу длин волн  $\lambda$  падающего света, то лучи 1 и 2 максимально усиливают друг друга. Нетрудно заметить, что (при данном значении  $\alpha$ ) такой результат интерференции будет иметь место не только для точки  $C$ , но и для всех других точек поверхности пленки. Поэтому глазу, аккомодированному на поверхность пленки, вся пленка представится ярко освещенной. Если же  $\Delta l$  равна нечетному числу полуволен то все отраженные от ее поверхности лучи взаимно погасятся и пленка будет казаться темной.

Таким образом, при изменении угла падения  $\alpha$  пленка попеременно оказывается то светлой, то темной.

**Дифракция света.** Если между экраном  $A$  и освещающим его источником света поместить другой экран  $B$  с отверстием (рис. 13.28, а), то на экране  $A$  появится светлое пятно, ограниченное тенью (рис. 13.28, б). Границу тени можно найти геометрическим путем, полагая, что свет распространяется прямолинейно, т. е. световые лучи являются прямыми линиями (см. рис. 13.28, в). Однако более тщательное наблюдение показывает, что граница тени не является резкой; это особенно заметно в случаях, когда размер  $d$  отверстия очень мал по сравнению с расстоянием  $L$  от экрана до отверстия ( $d \ll L$ ). Тогда пятно на экране  $A$  представ-

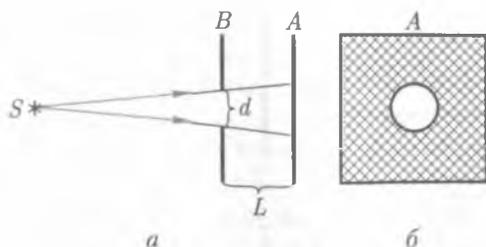


Рис. 13.28

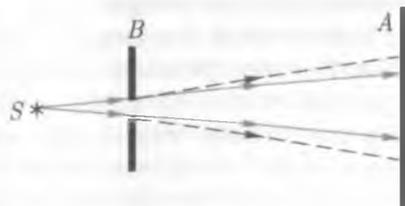
ляется состоящим из чередующихся светлых и темных колец, постепенно переходящих друг в друга и захватывающих также область геометрической тени (рис. 13.29, а). Это свидетельствует о непрямолинейности распространения света от источника  $S$ , о загибании световых лучей (волн) у краев отверстия  $B$  (рис. 13.29, б). Описанное явление непрямолинейного распространения света вблизи преграды (огибание световым лучом преграды) носит название *дифракции света*, а получающаяся на экране картина называется дифракционной. При использовании белого света дифракционная картина приобретает радужную окраску.

Отчетливые дифракционные картины получаются в случаях, когда на пути распространения света находятся очень мелкие преграды размером порядка световой волны. Следует подчеркнуть, что сравнимость размера преграды с длиной световой волны не является необходимым условием для наблюдения дифракции.

Дифракционные картины нередко возникают в естественных условиях. Так, например, цветные кольца, окружающие источник света, наблюдаемые сквозь туман или через запотевшее оконное стекло, обусловлены дифракцией света на мельчайших водяных каплях.



а



б

Рис. 13.29

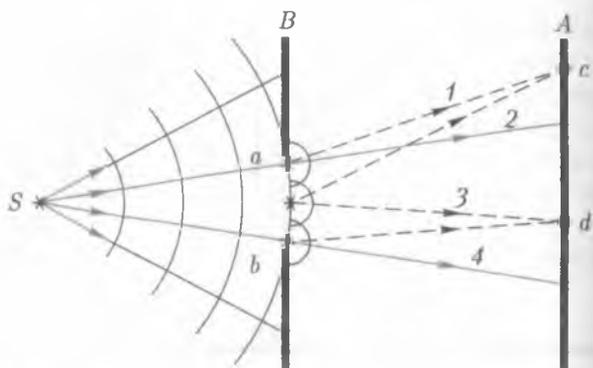


Рис. 13.30

При дифракции обнаруживаются волновые свойства света и поэтому она может быть объяснена на основе принципа Гюйгенса — Френеля следующим образом. Пусть свет от источника  $S$  падает на экран  $A$  через круглое отверстие  $ab$  в экране  $B$  (рис. 13.30). Согласно принципу Гюйгенса — Френеля каждая точка участка  $ab$  фронта световой волны (заполняющего отверстие) является вторичным источником света. Эти источники когерентны, поэтому исходящие от них лучи (волны) 1 и 2, 3 и 4 и т.д. будут интерферировать между собой. В зависимости от разности хода лучей на экране  $A$  в точках  $c$ ,  $d$  и т.д. возникнут максимумы и минимумы освещенности. Таким образом, на экране  $A$  в области геометрической тени появятся светлые места, а вне этой области — темные места, создавая описанную ранее (кольцеобразную) дифракционную картину.

Между интерференцией и дифракцией нет существенного физического различия. Оба явления заключаются в перераспределении светового потока в результате суперпозиции волн. По историческим причинам перераспределение интенсивности, возникающее в результате суперпозиции волн, возбуждаемых конечным числом дискретных когерентных источников, принято называть интерференцией волн. Перераспределение интенсивности, возникающее вследствие суперпозиции волн, возбужденных когерентными источниками, расположенными непрерывно, принято называть дифракцией. Поэтому говорят, например, об интерференционной картине от двух узких щелей и о дифракционной картине от одной щели. Природа явлений дифракции и интерференции одна и та же.

Различают два вида дифракции. Если источник света  $S$  и точка наблюдения  $P$  расположены от препятствия настолько далеко,

что лучи, падающие на препятствие, и лучи, идущие в точку  $P$ , образуют практически параллельные пучки, то говорят о дифракции в параллельных лучах, или о дифракции Фраунгофера. В противном случае имеем дело с дифракцией Френеля.

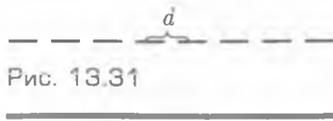


Рис. 13.31

Совокупность большого числа узких параллельных щелей, расположенных близко друг от друга, называется **дифракционной решеткой**, а расстояние  $d$  между соседними щелями — периодом решетки (рис. 13.31). Решетку, имеющую постоянный период и одинаковую ширину всех щелей, называют **регулярной**.

Дифракционные решетки изготовляют путем нанесения тонких штрихов (царапин) на поверхности стеклянной пластинки (прозрачная решетка) или металлического зеркала (отражательная решетка). Очевидно, что в таких решетках роль щелей играют промежутки между штрихами. Штрихи наносят алмазным резцом с помощью делительной машины. Лучшие дифракционные решетки имеют до 1200...1500 штрихов на миллиметр, что соответствует периоду 0,83...0,56 мкм. Посредством дифракционной решетки проводятся очень точные измерения длин световых волн.

**Поляризация света.** Свет, излучаемый отдельным атомом, представляет собой электромагнитную волну, т.е. совокупность двух поперечных взаимно-перпендикулярных волн — электрической (образованной колебаниями вектора напряженности электрического поля  $\vec{E}$ ) и магнитной (образованной колебаниями вектора магнитной индукции  $\vec{B}$ ), идущих вдоль общей прямой, называемой световым лучом ( $\vec{E} \perp \vec{B}$ ).

Луч (свет), у которого электрические колебания совершаются все время только в одной плоскости, называется **поляризованным**. Разумеется, при этом магнитные колебания совершаются в другой (перпендикулярной) плоскости, называемой **плоскостью поляризации света**. Из данного определения следует, что свет, излучаемый отдельным атомом, является поляризованным (во всяком случае в течение всего периода излучения этого атома).

Опыт и теория показывают, что химическое, физиологическое и другие виды воздействия света на вещество обусловлены главным образом электрическими колебаниями. (В этой связи отметим, что специальное название «плоскость поляризации» следовало бы дать не плоскости магнитных колебаний, как это исторически сложилось, а плоскости электрических колебаний.) Далее для упрощения рисунков, изображающих световую волну (или луч), будем говорить только об электрических колебаниях, а плоскость,

в которой они совершаются, называют плоскостью световых колебаний, или просто *плоскостью колебаний*. Тогда луч поляризованного света можно схематически изобразить так, как это сделано на рис. 13.32, а (луч перпендикулярен плоскости рисунка; векторы соответствуют амплитудным значениям напряженности электрического поля  $\vec{E}$ ).

На практике мы никогда не встречаемся со светом от одного отдельного атома, поскольку всякий реальный источник света (светящееся тело) состоит из множества атомов, излучающих беспорядочно, т.е. испускающих световые волны со всевозможными ориентациями плоскости колебаний. Эти волны налагаются друг на друга, в результате чего любому лучу, исходящему от реального (естественного) источника света, будет соответствовать множество разнообразно ориентированных плоскостей колебания (рис. 13.32, б). Такой луч (свет) является неполяризованным и называется *естественным лучом* (светом).

Обычно интенсивность излучения каждого из атомов, составляющих светящееся тело, в среднем одинакова; поэтому у естественного света амплитудные (максимальные) значения вектора  $\vec{E}$  одинаковы во всех плоскостях колебаний. В некоторых случаях амплитудные значения вектора  $\vec{E}$  у светового луча оказываются неодинаковыми для различных плоскостей колебаний; такой луч называется *частично поляризованным*. На рис. 13.32, в изображен частично поляризованный луч, у которого колебания совершаются преимущественно в вертикальной плоскости.

В отличие от естественного поляризованный свет характеризуется не только интенсивностью (зависящей от амплитуды напряженности поля  $\vec{E}$ ) и цветом (зависящим от длины волны  $\lambda$ ), но еще и положением плоскости колебаний. Поэтому, например, поляризованные лучи 1, 2 и 3 (рис. 13.33), интенсивность и цвет которых одинаковы, не тождественны друг другу.

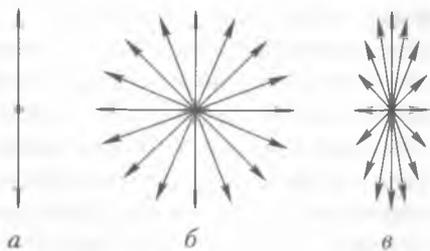


Рис. 13.32

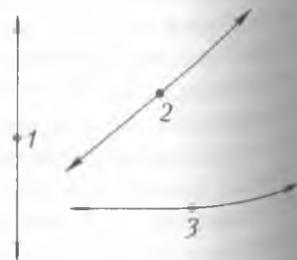


Рис. 13.33

Однако человеческий глаз не обнаруживает различия между поляризованными лучами, имеющими различную ориентацию плоскости колебания, и вообще не отличает поляризованного света от естественного.

Естественный свет можно поляризовать, т. е. превратить в поляризованный свет. Для этого надо создать такие условия, при которых колебания вектора напряженности электрического поля могли бы совершаться только вдоль одного определенного направления. Подобные условия могут иметь место, например, при прохождении естественного света через среду, анизотропную в отношении электрических колебаний. Как известно, анизотропия свойственна кристаллам. Поэтому можно ожидать поляризации света, проходящего через кристалл. Действительно, эксперимент показывает, что многие природные и искусственно созданные кристаллы поляризуют проходящий через них естественный свет.

В самых общих чертах физическая сущность процесса поляризации света, проходящего через кристалл, состоит в следующем. Согласно электромагнитной теории Максвелла переменное электрическое поле световой волны вызывает в кристаллическом диэлектрике переменный поляризационный ток, т. е. переменное смещение заряженных частиц (атомов, ионов), составляющих кристаллическую решетку.

Благодаря анизотропии кристалла возможная величина смещения его частиц, а следовательно, и сила поляризационного тока оказываются неодинаковыми для различных плоскостей кристаллической решетки. Очевидно, что световая волна, идущая в плоскости, соответствующей значительным возможным смещениям частиц, вызывает сильный поляризационный ток и потому практически полностью поглощается кристаллом. Если же световая волна идет в плоскости, соответствующей малым смещениям частиц, то она вызывает слабый поляризационный ток и проходит через кристалл без существенного поглощения.

Таким образом, из электрических колебаний естественного света, имеющих всевозможные направления, через кристалл без поглощения проходят только те, которые совершаются в плоскости, соответствующей минимуму поляризационного тока; остальные колебания в той или иной мере ослабляются, так как через кристалл проходят только их проекции на эту плоскость. В результате у света, прошедшего через кристалл, электрические колебания совершаются лишь в одной определенной плоскости, т. е. свет оказывается поляризованным.



## ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ВЫВОДЫ

1. Раздел физики, в котором изучаются вопросы о природе света, закономерностях световых явлений, а также процессы взаимодействия света с веществом, называется оптикой.

2. Первые попытки объяснения природы света были предприняты еще в глубокой древности на основе умозрительных, интуитивных представлений выдающихся мыслителей-философов.

3. И. Ньютоном была разработана корпускулярная теория света. С помощью этой теории, утверждающей, что свет — это поток частиц-корпускул, были объяснены дисперсия света, законы отражения и преломления света, закон его прямолинейного распространения.

4. Спустя несколько лет после создания корпускулярной теории Х.Гюйгенсом была предложена волновая теория света, развитая О. Френелем, согласно которой свет представляет собой поток волн. Были объяснены такие явления, как интерференция, дифракция и поляризация света, не поддававшиеся объяснению с позиций корпускулярной теории.

5. Во второй половине XIX в. английским физиком Дж.Максвеллом была создана электромагнитная теория света, по которой свет — частный случай электромагнитных волн.

6. В начале XX в. появляется квантовая теория света, объединяющая волновые и корпускулярные свойства света. Было показано, что свет — это поток квантов (фотонов), энергия которых  $\epsilon$  пропорциональна частоте электромагнитного излучения  $\nu$ :  $\epsilon = h\nu = hc/\lambda$ , где  $h$  — постоянная Планка;  $c$  — скорость света в вакууме;  $\lambda$  — длина электромагнитной волны.

7. Скорость света в какой-либо среде, согласно электромагнитной теории Дж.Максвелла, зависит от показателя преломления света в данной среде. При переходе света из одной среды в другую его цвет сохраняется, т.е. частота не меняется, а меняется длина волны.

8. Можно говорить об имеющем место дуализме природы света, или о двойственной природе света — волновой и корпускулярной.

9. Основными законами геометрической оптики являются законы отражения и преломления света, обусловленные прямолинейностью распространения света в однородной среде.

10. Законы отражения света утверждают, что лучи падающий, отраженный и перпендикуляр, восстановленный в точку падения

луча к границе двух сред, лежат в одной плоскости и угол падения равен углу отражения. На основе этих законов строят изображения в плоских и сферических зеркалах.

11. Законы преломления света гласят, что лучи падающий, преломленный и перпендикуляр, восстановленный в точку падения луча к поверхности раздела двух сред, лежат в одной плоскости и отношение синуса угла падения  $\alpha$  к синусу угла преломления  $\gamma$  есть величина постоянная для данных двух сред, равная от-

носительному показателю преломления  $n_{21}$  этих сред:  $\frac{\sin \alpha}{\sin \gamma} = n_{21}$ .

Здесь  $n_{21} = n_2/n_1$ , где  $n_2$  и  $n_1$  — соответственно показатели преломления второй и первой сред (имеется в виду, что луч света переходит

из первой среды во вторую). Важно, что  $n_{21} = \frac{n_2}{n_1} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{\sin \alpha}{\sin \gamma}$ ,

где  $v_1$  и  $v_2$  — скорости распространения света соответственно в первой и во второй средах.

12. При прохождении света из среды оптически более плотной в среду оптически менее плотную ( $n_1 > n_2$ ) в случае, если угол падения  $\alpha$  больше предельного угла  $A$ , определяемого из условия  $\sin A = n_2/n_1$ , может наблюдаться полное отражение света. В случае, если свет идет из воды в воздух (при  $n_2 \approx 1$ ), предельный угол определяется из условия  $\sin A = 1/n$ , где  $n$  — показатель преломления воды.

13. Явление, возникающее при наложении двух или нескольких когерентных световых волн, линейно поляризованных в одной плоскости, и состоящее в устойчивом во времени усилении или ослаблении интенсивности результирующей световой волны в зависимости от соотношения между фазами этих волн, называется интерференцией света. Результат интерференции света, наблюдаемый на экране или запечатленный на фотографии, называется интерференционной картиной.

14. Дифракция света — совокупность явлений, которые обусловлены волновой природой света и наблюдаются при его распространении в среде с резко выраженными неоднородностями (например, при прохождении через отверстия, щели, вблизи границ непрозрачных тел и т. д.). В узком смысле под дифракцией света понимают огибание светом малых препятствий, т. е. отклонение от законов геометрической оптики.

15. Поляризацией света называется совокупность явлений волновой оптики, в которых проявляется поперечность электромаг-

нитных волн. Электромагнитная волна называется поляризованной, если в ней из всех разнообразных колебаний выделено колебание, лежащее только в одной плоскости.



## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ

1. В чем заключается сущность корпускулярной теории света Ньютона?
2. В чем заключается сущность волновой теории света Гюйгенса? Каковы недостатки этой теории?
3. Почему волновая теория света Гюйгенса — Френеля вытеснила корпускулярную теорию Ньютона?
4. Почему явления интерференции и дифракции присущи только волновому движению?
5. Чем было вызвано появление электромагнитной теории света?
6. В чем заключается сущность квантовой теории света?
7. Если квант света обладает свойством частицы, то чем эта частица отличается от других известных вам частиц (атомов, молекул, ионов)?
8. В чем состоит физический смысл фундаментальной физической постоянной  $c$ ?
9. Сформулируйте закон отражения света.
10. Сформулируйте закон преломления света.
11. Луч переходит из оптически более плотной в оптически менее плотную среду. Какой угол больше: падения или преломления?
12. Какой показатель преломления называют абсолютным? относительным?
13. Как пойдет луч, если на границу раздела двух сред он падает под углом больше предельного?
14. Приведите примеры использования законов отражения и преломления в оптических приборах, с которыми вам приходится встречаться в повседневной практике?
15. Показатель преломления алмаза равен 2,4. Чему равна скорость света в алмазе?

Ответ:  $c = 1,25 \cdot 10^8$  м/с.

16. Какие источники света считаются когерентными?
17. Как выглядит полученная на экране картина интерференции света?
18. В каких случаях при интерференции наблюдают усиление света?
19. В чем заключается физическая сущность дифракции света?
20. Почему грампластинки при рассмотрении их в отраженном свете имеют цветную окраску?
21. Что общего между интерференцией и дифракцией света и чем они различаются?
22. На основании какого явления можно считать, что световая волна является поперечной? В чем заключается его сущность?



Раздел V

**КВАНТОВАЯ ФИЗИКА**

### 14.1. Тепловое излучение. Фотозффект

**Излучение и поглощение теплоты.** Наиболее распространенным в природе видом электромагнитного излучения является *тепловое излучение*. Оно происходит за счет энергии хаотического движения молекул и атомов тел. Поэтому в процессе теплового излучения температура тела понижается.

Для количественной характеристики теплового излучения вводится специальная величина — энергетическая светимость (излучательность)  $R_e$ . Она показывает, какую энергию расходует тело в процессе излучения с  $1 \text{ м}^2$  своей поверхности за 1 с. Размерность  $R_e$  в СИ —  $\text{Вт}/\text{м}^2$ .

Наряду с излучением существует и поглощение теплоты, которое ведет к нагреванию тела. Если потеря энергии за счет излучения компенсируется поглощением, то температура тела при отсутствии других форм передачи энергии остается постоянной. Тогда говорят, что тело находится в *тепловом равновесии*.

Для количественной характеристики поглощения теплоты также вводится специальная величина — *коэффициент поглощения*  $\alpha$ , который показывает, какую часть падающего на него излучения данное тело поглощает;  $\alpha$  — величина безразмерная.

Воображаемое тело, поглощающее все падающее на него излучение, называют *черным*. Для такого тела  $\alpha = 1$ . Воображаемое тело, отражающее все падающее на него излучение, называют *белым*. Для белого тела  $\alpha = 0$ . Все реальные тела, для которых  $0 < \alpha < 1$ , принято называть *серыми*.

Как энергетическая светимость, так и коэффициент поглощения зависят от природы и температуры тела. Например, очень близка к черному телу сажа ( $\alpha = 0,96$ ), а к белому — свежевypав-

ший снег ( $\alpha = 0,03$ ). Опыт показывает, что для тел, обладающих большим коэффициентом поглощения, характерна и высокая излучательность. К черным телам близки поверхности Солнца и звезда.

**Открытие фотоэффекта.** В 1887 г. Г. Герц обнаружил, что металлические пластинки, заряженные отрицательным зарядом, при их облучении световым потоком от дуговой лампы теряют свой заряд. При облучении тем же потоком положительно заряженной пластинки потери заряда не происходит. Было также установлено, что в ряде случаев при облучении незаряженной пластинки последняя приобретает положительный заряд. Открытое Г. Герцем явление получило название *фотоэффекта*. В том же году английский физик Дж. Томсон в опытах с катодными лучами обнаружил отрицательно заряженные частицы — электроны. Вскоре было установлено, что падающий на металлическую пластинку световой поток выбивает из нее электроны, которые, покидая пластинку, уносят с собой отрицательный заряд.

**Опыты А. Г. Столетова.** В 1888 г. исследованием фотоэффекта занялся русский физик А. Г. Столетов. Принципиальная схема прибора, с помощью которого А. Г. Столетов осуществил свои опыты, показана на рис. 14.1. В вакуумный сосуд помещены две металлические пластинки: катод  $K$  и анод  $A$ . Катод соединен с отрицательным, а анод с положительным полюсами батареи  $B$ . Световой поток через кварцевое стекло  $F$  направляется на фотокатод  $K$  и выбивает из него электроны (фотоэлектроны). Часть фотоэлектронов захватывается анодом, благодаря чему цепь замыкается, и гальванометр  $G$  показывает наличие фототока.

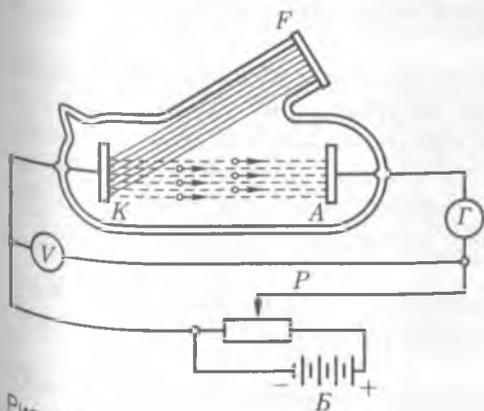


Рис. 14.1

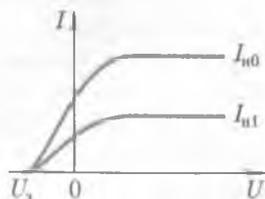


Рис. 14.2

Если с помощью потенциометра  $P$  повышать напряжение между анодом и катодом, то фототок вначале быстро возрастает (рис. 14.2), так как все большая часть фотоэлектронов захватывается анодом. Но затем этот рост замедляется и наконец прекращается совсем. Наибольший ток, который можно получить при постоянном световом потоке, называют **фототоком насыщения**  $I_{н1}$ . В этом случае все электроны, выбиваемые из катода, перехватываются анодом. Если же усилить световой поток, то увеличится число выбиваемых электронов и тогда фототок насыщения возрастет до нового значения  $I_{н0} > I_{н1}$ .

Заметим, что небольшой (нулевой) фототок имеется даже при отсутствии в цепи батареи, т. е. при коротком замыкании электродов. Он прекращается только при некотором запирающем напряжении  $U_3$ .

На основании своих опытов А. Г. Столетов пришел к следующему выводу:

**фототок насыщения пропорционален световому потоку и не зависит от приложенного напряжения.**

## 14.2. Квантовая гипотеза Планка. Уравнение Эйнштейна

**Квантовая гипотеза Планка.** Открытое Г. Герцем явление фотоэффекта никак не укладывалось в волновую теорию света. Дело в том, что сама по себе волна не способна выбивать электроны из катода. Таким действием могут обладать только частицы. Однако возвращаться к корпускулярной теории Ньютона уже не было никаких оснований.

Аналогичная трудность возникла, когда нужно было объяснить экспериментальную кривую распределения энергии в спектре черного тела. Согласно классической теории, энергия электромагнитного излучения может изменяться непрерывно, принимая любые значения. Однако все попытки связать экспериментальные законы теплового излучения с классической теорией успехом не увенчались.

Выход из создавшихся противоречий предложил немецкий физик М. Планк. В 1900 г. он выдвинул гипотезу, согласно которой

**энергия электромагнитных волн излучается и поглощается в виде отдельных порций — квантов.**

Эта смелая идея оказалась исключительно плодотворной. Впоследствии она легла в основу квантовой теории — фундамента современной физики микромира. Основываясь на таком предположении, Планк получил уравнение кривой, хорошо совпадающей с экспериментальным графиком распределения энергии в спектре черного тела. Исследование этой же гипотезы позволило Эйнштейну построить законченную теорию фотоэффекта.

**Энергия фотона.** По предложению Эйнштейна кванты электромагнитного излучения светового диапазона были названы фотонами. В соответствии с гипотезой Планка энергия фотона пропорциональна частоте  $\nu$  излучения:

$$\epsilon = h\nu \quad (14.1)$$

и обратно пропорциональна длине волны  $\lambda$ :

$$\epsilon = h \frac{c}{\lambda}. \quad (14.2)$$

Коэффициент пропорциональности в формулах (14.1) и (14.2) называют *постоянной Планка*, причем  $h = 6,62 \cdot 10^{-34}$  Дж·с.

Обладая энергией, фотон не имеет массы покоя; его нельзя «остановить». Время его существования определяется отношением расстояния, на которое он распространяется от момента излучения до момента поглощения, к его скорости, которая в вакууме остается строго постоянной. Энергию фотонов часто выражают во внесистемных единицах — электронвольтах (эВ). За 1 эВ принимается энергия, которую приобретает электрон, пройдя разность потенциалов 1 В, т. е.  $1 \text{ эВ} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл} \cdot 1 \text{ В} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$ .

Важно, что квантовые свойства электромагнитного излучения сильнее проявляются в области высоких частот, а волновые свойства в области низких частот.

**Уравнение Эйнштейна.** В соответствии с квантовыми представлениями фотоэффект получает простое истолкование. Световой поток определяется числом фотонов, падающих за единицу времени на поверхность металла. При этом каждый фотон взаимодействует только с одним электроном. Поэтому число фотоэлектронов пропорционально световому потоку.

Чтобы покинуть металл, электрон должен совершить работу выхода  $A_{\text{вых}}$ , а значит, приобрести достаточную для этого энергию за счет энергии поглощенного фотона. Опыт показывает, что работа выхода электрона из металла зависит только от особенностей самого металла. Лабораторным методом для каждого металла

определяется *красная граница фотоэффекта*. Под этим термином понимают длину волны падающего на металл излучения, начиная с которой наблюдается фотоэффект. Например, красная граница фотоэффекта для цинка  $\lambda_k = 290$  нм, что соответствует энергии фотона 4,19 эВ. Это означает, что фотоэффект на цинке наблюдается тогда, когда длина волны падающего излучения меньше 290 нм, а энергия фотонов больше 4,19 эВ. Таким образом, при фотоэффекте энергия фотонов превосходит работу выхода.

$$h\nu - A_{\text{вых}} > 0.$$

Эта разность расходуется на кинетическую энергию фотоэлектронов. Отсюда Эйнштейн получил уравнение

$$h\nu = A_{\text{вых}} + mv^2/2, \quad (14.3)$$

из которого видно, что

**скорость фотоэлектронов возрастает с увеличением частоты падающего излучения и не зависит от его плотности.**

**Внутренний фотоэффект и его особенности.** Фотоэффект, в результате которого электроны покидают облучаемое тело, называют *внешним*. До сих пор шла речь именно о внешнем фотоэффекте. Он обычно происходит при облучении металлических пластинок. Иная картина наблюдается при облучении полупроводников и некоторых диэлектриков. В этом случае электроны не покидают облучаемое тело, а остаются внутри него. Такое явление называют *внутренним фотоэффектом*. Внутренний фотоэффект увеличивает концентрацию свободных электронов в полупроводнике и уменьшает его сопротивление.

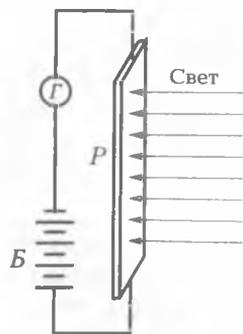


Рис. 14.3

Схема, позволяющая обнаружить внутренний фотоэффект, показана на рис. 14.3. В электрическую цепь последовательно включены батарея *Б*, гальванометр *Г* и селеновая полупроводниковая пластинка *Р*. Если пластинка закрыта непрозрачным экраном, то гальванометр показывает очень малый ток, поскольку селен обладает большим удельным сопротивлением. Уберем экран и направим на пластинку световой поток. При этом стрелка гальванометра покажет резкое увеличение силы тока. Пластины, сопротивление которых зависит от освещенности, называют фотосопротивлениями.



Рис. 14.4

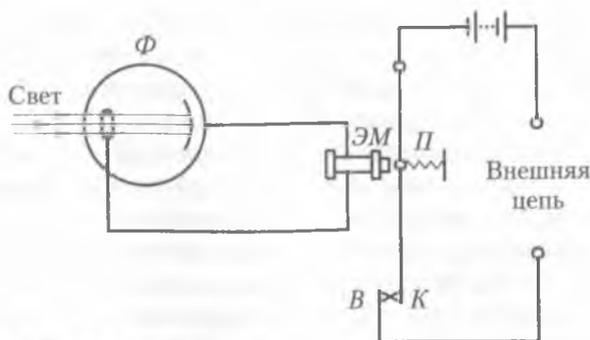


Рис. 14.5

**Применение фотоэффекта в технике.** Фотоэффект находит широкое применение в самых различных областях техники. На внешнем фотоэффекте основано устройство фотоэлемента (рис. 14.4). Часть внутренней поверхности стеклянного баллончика, из которого откачивается воздух, покрывается слоем светочувствительного металла. Этот слой служит катодом, а металлическое колечко в центре баллончика — анодом.

Фотоэлементы позволяют автоматически управлять различными процессами, в частности включать и выключать уличное освещение, отбраковывать детали на конвейере, обеспечивать технику безопасности на производстве. Кроме того, они применяются в телевидении, фототелеграфе, звуковом кино и т. д.

В качестве примера рассмотрим работу *фотореле* (рис. 14.5). Во внутреннюю электрическую цепь последовательно с фотоэлементом  $\Phi$  включается электромагнит ЭМ. Когда в окошко фотоэлемента попадает свет, то в этой цепи возникает фототок. Сердечник электромагнита намагничивается и, растягивая пружину П, прижимает железный ключ К к контакту В, замыкая тем самым внешнюю цепь. Появляющийся во внешней цепи ток большой силы приводит в действие различные машины и механизмы. В отсутствие фотоэффекта фототок прекращается. Сердечник размагничивается, а пружина оттягивает ключ, размыкая внешнюю цепь.

Весьма широко применяются на практике также фотоэлементы, основанные на внутреннем фотоэффекте, — *фотоспротивления*. По светочувствительности они в сотни раз превосходят вакуумные фотоэлементы, но обладают заметной инертностью.

Разновидностью фотоспротивлений являются *вентильные фотоэлементы* (рис. 14.6). Металлическая пластинка М

и нанесенный на нее слой полупроводника  $P$  соединены внешней цепью, в которую включен гальванометр  $G$ . Пограничный слой  $B$  обладает односторонней проводимостью и пропускает электроны только от полупроводника к металлу. При облучении полупроводника в нем благодаря внутреннему фотоэффекту резко возрастает концентрация свободных электронов. Электроны начинают интенсивно диффундировать в металл, не имея возможности перемещаться в обратном направлении. Между полупроводником и металлом возникает разность потенциалов, и стрелка гальванометра отклоняется от нуля, показывая наличие во внешней цепи фототока. Таким образом, вентильные фотоэлементы непосредственно преобразуют световую энергию в электрическую. Те из них, которые работают на энергии солнечных лучей, называют *солнечными батареями*.

Солнечные батареи устанавливают на искусственных спутниках Земли и автоматических межпланетных станциях в качестве источников энергии, питающих всю бортовую аппаратуру (рис. 14.7).

В последнее время в связи с обострением экологических проблем разрабатываются многочисленные проекты солнечных электростанций, которые исключают какое-либо загрязнение окружающей среды. Солнечная энергетика имеет большие перспективы

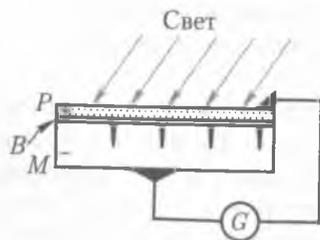


Рис. 14.6

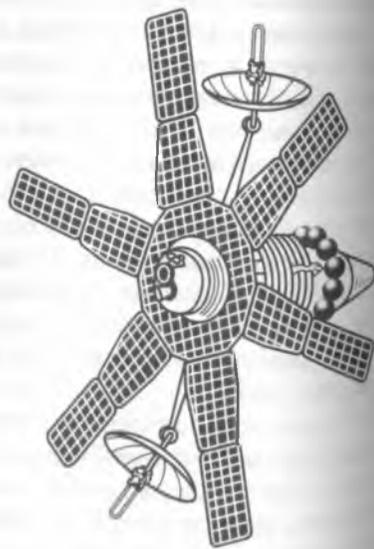


Рис. 14.7

### 14.3. Давление света. Опыты Лебедева

**Давление света.** Наблюдения показывают, что хвосты комет всегда направлены в противоположную от Солнца сторону. Максвелл был первым, кто дал научное объяснение этому явлению. На основе электромагнитной теории он показал, что световая волна, падая на поверхность тела, оказывает на нее давление, причем световое давление обусловлено колебаниями напряженности электрического поля и напряженности магнитного поля.

Составляющие хвост и голову кометы микроскопические твердые частицы-пылинки и молекулы газа под воздействием солнечного излучения ионизируются, приобретая положительный заряд. В то же время, оказавшись в электромагнитном поле световой волны, заряженные частицы начинают совершать колебания вместе с колебаниями напряженности  $\vec{E}$  электрического поля. Одновременно, находясь в переменном магнитном поле  $\vec{B}$  волны, колеблющаяся частица испытывает действие силы Лоренца (рис. 14.8). Применяя к данному случаю правило левой руки, увидим, что сила Лоренца направлена в противоположную от Солнца сторону.

**Опыты Лебедева.** Экспериментально световое давление было обнаружено и измерено в 1899 г. русским физиком П. Н. Лебедевым, который осуществил очень тонкий и изящный опыт. Схема этого опыта показана на рис. 14.9. На стеклянной нити был подвешен легкий стерженек с прикрепленными к нему пластинками. Одна пластинка имела зачерненную поверхность, поглощающую свет, а другая — блестящую поверхность, отражающую свет. Весь прибор был помещен в стеклянный сосуд, из которого выкачивался воздух.

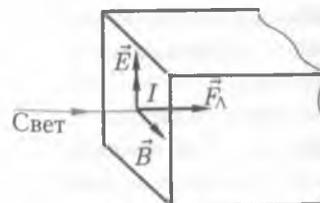


Рис. 14.8

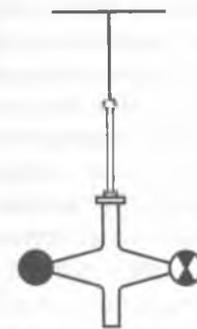


Рис. 14.9

Когда на одну из пластинок направлялся пучок света, то благодаря световому давлению пластинка смещалась, закручивая нить на некоторый угол. Угол закручивания нити измерялся с помощью зрительной трубы и прикрепленного к нити зеркала. По значению этого угла определялось давление света на пластину.

П. Н. Лебедев поочередно направлял световой пучок то на блестящую, то на зачерненную пластинку. Давление света на блестящую пластинку оказалось в два раза большим, чем на зачерненную, как это и следовало из теории.

#### 14.4. Диалектическое единство волновых и корпускулярных свойств электромагнитного излучения

История развития представлений о природе света особенно наглядно раскрывает противоречивый, диалектический характер познания материального мира. На вопрос о том, какой метод в физике является главным (основополагающим), теоретический или экспериментальный, нельзя дать однозначного ответа.

С одной стороны, опыт может служить проверкой теории. Осуществляя его, экспериментатор заранее предполагает тот или иной результат. Например, опыт Герца подтвердил теорию Максвелла о распространении электромагнитного поля в пространстве в виде электромагнитных волн. Возьмем другой пример. Отрицательный результат опыта Майкельсона — Морли опроверг теорию мирового эфира как упругой среды, в которой распространяется электромагнитная волна.

С другой стороны, опыт может опережать теорию. Открытие фотоэффекта, а также получение экспериментальной кривой распределения энергии в спектре черного тела послужили основой создания квантовой теории света.

Важную роль в физической науке играют наблюдения. Уместно вспомнить, как на основе наблюдений затмений Ио (спутника Юпитера) Ремер не только пришел к выводу о конечности скорости света, но и оценил эту скорость.

Противоречивый путь познания окружающего мира отражает диалектический характер самих процессов и явлений в этом мире (единство противоположностей). В рамках классической физики волновая и корпускулярная теории света никак не согласовывались между собой. Одна исключала другую. Однако опыты пока-

зали, что в отдельности ни та, ни другая теории не дают удовлетворительных объяснений ряду наблюдаемых явлений. В одних случаях проявляются волновые, а в других — корпускулярные свойства света.

В квантовой теории свет излучается, распространяется и поглощается в виде отдельных фотонов, которым присущи одновременно свойства частиц и волн. Такое сочетание противоречивых (с классической точки зрения) свойств получило название *корпускулярно-волнового дуализма фотона*. В фотоне оба эти свойства неразрывно связаны между собой.

В частности, при прохождении света через дифракционную решетку происходит перераспределение фотонов в световом потоке, благодаря чему на экране возникает дифракционная картина. Очевидно, что наблюдаемая освещенность полос зависит от числа фотонов, попадающих в эти участки экрана за единицу времени. В теоретических расчетах, выходящих за пределы нашего курса, доказывается, что квадрат амплитуды световой волны в какой-либо области пространства является мерой вероятности прохождения фотонов через эту область. Изменение интенсивности светового потока не влияет на характер дифракционной картины, т. е. на чередование светлых и темных полос. А это означает, что фотоны подчиняются статистической закономерности. Корпускулярно-волновой дуализм как раз в том и проявляется, что заранее нельзя точно указать, как будет направлен импульс фотона после его прохождения через щель, причем чем уже щель, тем больше неопределенность попадания фотона в ту или иную точку экрана.

Таким образом, квантовая теория света отнюдь не предполагает возврата к корпускулярной теории Ньютона, а есть качественно новая ступень в познании природы электромагнитного излучения.



## ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ВЫВОДЫ

1. Излучение, которое происходит за счет энергии хаотического движения молекул атомов, называют тепловым. Оно ведет к охлаждению тела. Наоборот, поглощение электромагнитных волн вызывает нагревание тела. В тех случаях, когда потеря энергии в процессе излучения теплоты компенсируется ее поглощением, тело находится в тепловом равновесии.

Воображаемое тело, поглощающее все падающее на него электромагнитное излучение, называют черным (или абсолютно чер-

ным), а воображаемое тело, отражающее все падающее на него электромагнитное излучение, — белым (или абсолютно белым).

2. Процесс потерь металлическими пластинками отрицательного заряда при их облучении световым потоком называют внешним фотоэффектом. Это явление было обнаружено Г. Герцем в 1887 г. Тем самым была показана способность электромагнитного излучения выбивать электроны из металла.

3. Поскольку явление фотоэффекта не находило объяснения в волновой теории Гюйгенса — Френеля, М. Планк выдвинул гипотезу, согласно которой свет излучается и поглощается в виде отдельных порций энергии — квантов, причем энергия кванта пропорциональна частоте излучения:

$$\epsilon = h\nu,$$

где  $h$  — постоянная Планка, равная  $6,62 \cdot 10^{-34}$  Дж·с.

Впоследствии кванты электромагнитного излучения стали называть фотонами.

4. На основе квантовых представлений Эйнштейн сделал вывод, что в процессе фотоэффекта каждый фотон взаимодействует только с одним электроном, сообщая ему энергию  $h\nu$ . Эта энергия расходуется на работу выхода электрона из металла  $A_{\text{вых}}$  и его кинетическую энергию  $mv^2/2$ :

$$h\nu = A_{\text{вых}} + mv^2/2.$$

5. При облучении полупроводника происходит внутренний фотоэффект. В этом случае электроны не покидают облучаемого тела, а остаются внутри него. В результате в полупроводнике увеличивается концентрация электронов проводимости, что ведет к уменьшению сопротивления полупроводника.

6. В 1899 г. выдающийся русский физик П. Н. Лебедев экспериментально обнаружил и исследовал давление света.

Совпадение результатов расчетов светового давления, выполненных на основе волновой и квантовой теорий света, подтверждает единство волновых и корпускулярных свойств фотона.

7. Проявление в электромагнитном излучении двух диалектически противоречивых свойств частиц и волн называют корпускулярно-волновым дуализмом (двойственностью) фотона. В то же время в этом проявлении наблюдается определенная закономерность. С увеличением длины волны энергия фотонов уменьшается и все более существенную роль начинают играть волновые свойства электромагнитного излучения. Наоборот, с уменьшением длины волны энергия фотонов возрастает и все более отчетливо проявляются квантовые свойства света.

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ

1. Вычислите работу выхода электрона из металла, если при его облучении фотоэффект наблюдается начиная с частоты  $7,5 \cdot 10^{14}$  Гц.

*Ответ:*  $A_{\text{вых}} = 3,1$  эВ.

2. Потенциал работы выхода электрона из металла 4,5 В. Определите длину волны красной границы фотоэффекта этого металла.

*Ответ:*  $\lambda_{\text{к}} = 278$  нм.

3. Определите максимальную кинетическую энергию фотоэлектронов, вылетающих из калия при его облучении ультрафиолетом на длине волны 331 нм. Работа выхода электрона из калия равна 2,25 эВ.

*Ответ:*  $E_{\text{макс}} = 0,9$  эВ.

4. Какое действие оказывает электромагнитное облучение на полупроводник?
5. В чем и как проявляется единство корпускулярных и волновых свойств фотона?

### 15.1. Модель атома по Резерфорду

Среди сторонников атомистической теории строения вещества были ученые, считавшие, что атом не является элементарной частицей, он не вечен и делим. Такого мнения придерживался, например, английский физик и химик Р.Бойль. В 1816 г. английский врач и химик В.Праут высказал гипотезу о том, что атомы всех элементов являются сложными системами, построенными из одних и тех же элементарных частиц, которые являются атомами наиболее легкого элемента — водорода. Открытие в 1896 г. радиоактивности французским физиком А.Беккерелем (1852 — 1908) подтвердило эту гипотезу.

Опираясь на сведения о свойствах атомов, Дж.Томсон в 1902 г. сделал первую попытку построить модель атома, которую называют «пудингом с изюмом». Согласно гипотезе Томсона, атом представляет собой сферу диаметром порядка  $10^{-10}$  м, в которой с постоянной объемной плотностью распределен положительный заряд. Суммарный положительный заряд сферы равен суммарному отрицательному заряду электронов, содержащихся в ней в виде отдельных частиц и взаимодействующих с отдельными элементарными объемами ее по закону Кулона. Электроны, совершая гармонические колебания вокруг равновесных положений, излучают электромагнитные волны.

Проведенные в 1911 г. опыты Э.Резерфорда (1871 — 1937) показали ошибочность предположения о том, что положительный электрический заряд равномерно заполняет объем атома. В связи с этим Э.Резерфорд предложил ядерную (планетарную) модель строения атома. Согласно этой модели, весь положительный заряд и вся масса (более 99,94%) атома сосредоточены в атомном ядре.

размер которого ничтожно мал (порядка  $10^{-15}$  м) по сравнению с размером атома ( $10^{-10}$  м). Вокруг ядра по замкнутым (эллиптическим) орбитам движутся электроны, образуя электронную оболочку атома. Заряд ядра равен по абсолютной величине суммарному заряду электронов.

Таким образом, атом в целом является чрезвычайно «ажурным» микрообразованием: совокупностью небольшого числа очень малых частиц вещества (ядра и электронов), распределенных в сравнительно большом объеме.

Наличие в центре атома одного массивного, но весьма малого ядра Резерфорд доказал экспериментально на опытах с рассеянием альфа-частиц ( $\alpha$ -частиц), проходящих через вещество. Альфа-частицы, испускаемые радиоактивными элементами, движутся со скоростью порядка  $10^7$  м/с, имеют положительный заряд, равный двум элементарным зарядам, и массу, примерно в 7 350 раз большую массы электрона.

В опытах Резерфорда (рис. 15.1)  $\alpha$ -частицы, испускаемые радиоактивным веществом, двигались в вакууме и, проходя через фольгу  $F$  толщиной около 1 мкм, попадали на люминесцирующий экран  $\mathcal{E}$ . Удар каждой  $\alpha$ -частицы об экран вызывал кратковременную вспышку — сцинтилляцию (от лат. *scintillatio* — сверкание, испускание), наблюдаемую в микроскоп.

Наблюдения показали, что большинство  $\alpha$ -частиц проходят сквозь фольгу без заметного отклонения от первоначального направления, некоторые частицы отклоняются на небольшой угол и лишь немногие частицы претерпевают сильное отклонение. Естественно предположить, что отклонение  $\alpha$ -частиц вызвано их взаимодействием («столкновением») с массивными атомными ядрами (рис. 15.2), поскольку легкие электроны не могут существенно изменить движение сравнительно тяжелых и быстрых  $\alpha$ -частиц.

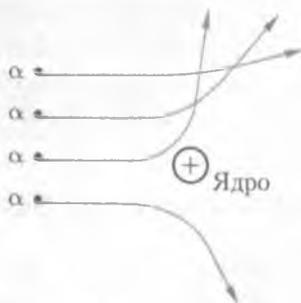
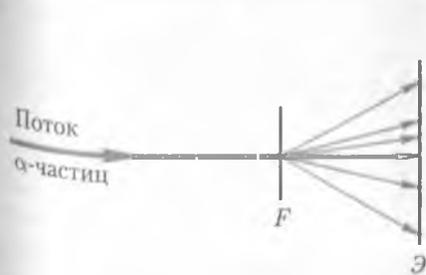


Рис. 15.1

Рис. 15.2

Из того факта, что значительное отклонение испытывают многие  $\alpha$ -частицы, следует, что лишь некоторые из них проходят вблизи ядер, а это в свою очередь означает, что атомные ядра имеют малый размер и расположены в веществе фольги на очень больших расстояниях друг от друга.

Полагая, что вещество и  $\alpha$ -частица взаимодействуют (отталкиваются) по закону Кулона, Э. Резерфорд теоретически рассчитал картину рассеяния  $\alpha$ -частиц, получив результат, хорошо согласующийся с экспериментальными данными.

Исследования Резерфорда позволили определить порядок размера ядра ( $10^{-15}$  м) и величину его заряда. При этом оказалось, что заряд  $q$  ядра, выраженный в элементарных зарядах  $e$ , равен порядковому номеру  $Z$  химического элемента в периодической системе Д. И. Менделеева:

$$q = eZ \quad (15.1)$$

и вместе с тем равен числу электронов в электронной оболочке атома.

Однако Резерфордовская модель строения атома не укладывалась в рамки законов классической физики. В самом деле, согласно законам классической электродинамики, электрон, вращаясь вокруг ядра, т. е. двигаясь с ускорением, должен непрерывно излучать электромагнитные волны, частота которых равна частоте вращения электрона. Так как это излучение сопровождается непрерывной потерей энергии, то электрон должен постепенно приближаться к ядру, двигаясь по спирали, и в конце концов упасть на ядро. По мере приближения электрона к ядру частота вращения электрона, а вместе с ней частота электромагнитного излучения должны непрерывно изменяться. Следовательно, атом должен давать сплошной спектр излучения.

Таким образом, с точки зрения классической физики атом оказывается неустойчивой (недолговечной) системой, дающей сплошной спектр излучения. Между тем и то и другое противоречит эксперименту. В действительности атомы представляют собой весьма устойчивые образования, характеризующиеся линейчатыми спектрами излучения.

## 15.2. Постулаты Бора

Тщательные исследования спектров излучения различных газов, т. е. спектров излучения атомов, показали, что каждому атому присущ вполне определенный линейчатый спектр. Более того

обнаружилось, что спектральные линии можно распределить по сериям (группам), при этом линии, принадлежащие к одной серии, связаны между собой определенной закономерностью. Так, в видимой части спектра излучения водорода швейцарский физик И. Бальмер в 1885 г. обнаружил серию линий (серия Бальмера), частота которых выражается эмпирической формулой

$$\nu = R \left( \frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right), \quad (15.2)$$

где  $n = 3, 4, 5, \dots$ ,  $R$  — постоянная Ридберга (названа в честь шведского физика Э.Г. Ридберга).

В спектре водорода имеется еще несколько серий, в частности серия, открытая в 1906 г. английским физиком К. Лайманом в ультрафиолетовой части спектра, и серия, открытая в 1908 г. немецким физиком Ф. Пашеном в инфракрасной части спектра. Серия Лаймана описывается формулой

$$\nu = R \left( \frac{1}{1^2} - \frac{1}{n^2} \right), \quad (15.3)$$

где  $n = 2, 3, 4, \dots$

а серия Пашена — формулой

$$\nu = R \left( \frac{1}{3^2} - \frac{1}{n^2} \right), \quad (15.4)$$

где  $n = 4, 5, 6, \dots$

Все серийные эмпирические формулы имеют одинаковую структуру; причина этого сходства будет выяснена в подразд. 16.3.

Линейчатый характер спектров излучения (и поглощения) атомов свидетельствует о том, что атом может излучать (и поглощать) энергию не в любых количествах (отличающихся друг от друга на сколь угодно малую величину), а только вполне определенными порциями — *квантами*.

Отсюда следует, что атом может находиться лишь в определенных (дискретных) энергетических состояниях; переходя из одного в другое, он излучает (или поглощает) квант энергии, равный разности энергий начального и конечного состояний, т.е. до излучения и после него.

Исходя из представления о дискретности энергетических состояний атома, датский физик Нильс Бор в 1913 г. усовершенствовал атомную модель Резерфорда, создав *квантовую теорию*

строения атома. В ее основу положены три постулата\*, названные впоследствии постулатами Бора.

**1. Электроны могут двигаться в атоме не по любым орбитам, а только по орбитам вполне определенного радиуса.**

На этих орбитах, называемых *стационарными (устойчивыми)*, момент импульса движения электрона  $mvr$  кратен величине  $h/(2\pi)$ :

$$mvr = n \frac{h}{2\pi}, \quad (15.5)$$

где  $m$  — масса электрона;  $v$  — его скорость;  $r$  — радиус орбиты;  $n$  — целое число, называемое *квантовым* ( $n = 1, 2, 3, \dots$ );  $h$  — постоянная Планка. Формула (15.5) представляет собой *условие квантования радиуса орбит*.

**2. Движение электронов по стационарным орбитам не сопровождается излучением (поглощением) энергии.**

**3. Переход энергии с одной стационарной орбиты на другую сопровождается излучением (или поглощением) кванта энергии.**

Величина  $h\nu$  кванта энергии равна разности энергии ( $E_1$  и  $E_2$ ) стационарных состояний атома до и после излучения (поглощения):

$$h\nu = E_1 - E_2. \quad (15.6)$$

Соотношение (15.6) называется *условием частот*.

Таким образом, частота электромагнитных волн, излучаемых атомом, определяется не частотой вращения электронов в атоме, а разностью энергии стационарных состояний атома.

Постулаты Бора, сохранив в основном модель атома Резерфорда, вместе с тем освободили ее от упомянутых ранее недостатков, противоречащих эксперименту.

В настоящее время постулаты Бора сформулированы в более общем виде:

атом устойчив только в состояниях, соответствующих определенным значениям энергии  $E_1, E_2, E_3, \dots$ ; переход атома из одного устойчивого состояния в другое сопровождается излучением или поглощением кванта энергии, величина которого определяется условием частот (15.6).

\* Постулатом (от лат. *postulatum* — требуемое) называется утверждение (вероятно, говоря, несамочевидное), принимаемое без доказательств в качестве основы для построения научной теории.

### 15.3. Атом водорода по Бору

В атоме водорода вокруг ядра (протона), несущего один элементарный заряд  $e$ , движется один электрон. Ядро можно считать неподвижным, поскольку его масса в 1840 раз больше массы электрона; орбиты электрона в первом приближении можно полагать круговыми.

Центростремительной силой, удерживающей электрон на орбите радиуса  $r$ , очевидно является кулоновская сила притяжения между электроном и ядром:

$$\frac{mv^2}{r} = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0\epsilon r^2}, \quad (15.7)$$

где  $m$  — масса электрона;  $v$  — его скорость;  $\epsilon = 8,85 \cdot 10^{-12}$  Ф/м — электрическая постоянная;  $\epsilon_0 = 1$  — диэлектрическая проницаемость.

Решая уравнение (15.7) совместно с (15.5), получим после простых преобразований выражение для радиуса стационарных орбит атома водорода:

$$r = n^2 \frac{\epsilon_0 \hbar^2}{\pi m e^2}, \quad (15.8)$$

где квантовое число  $n$  принимает значения 1, 2, 3, ...

По формуле (15.8) можно рассчитать радиус любой стационарной орбиты. Например, радиус ближайшей к ядру орбиты ( $n = 1$ ) равен

$$r_1 = 1^2 \cdot \frac{8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м} \cdot (6,625 \cdot 10^{-34} \text{ Дж/с})^2}{3,14 \cdot 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ кг} \cdot (1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл})^2} \approx 0,53 \cdot 10^{-10} \text{ \AA}.$$

В правой части уравнения (15.8) все величины, кроме  $n$ , являются постоянными. Следовательно, радиусы стационарных орбит относятся между собой как квадраты чисел натурального ряда, т.е. как  $1^2 : 2^2 : 3^2 : \dots : n^2$ .

Теперь определим полную энергию  $E$  электрона в атоме. Она складывается из кинетической энергии  $E_k$  поступательного движения электрона по орбите и потенциальной энергии  $E_n$  притяжения электрона к ядру, т.е.

$$E = E_k + E_n. \quad (15.9)$$

Кинетическую энергию вращения электрона вокруг собственной оси не принимаем во внимание, поскольку она одинакова для всех стационарных орбит.

Учитывая формулу (15.7), получим

$$E_k = \frac{mv^2}{2} = \frac{e^2}{8\pi\epsilon_0\epsilon r} \quad (15.10)$$

Потенциальная энергия электрона должна быть отрицательна (см. подразд. 7.3) и равна

$$E_a = -\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0\epsilon r} \quad (15.11)$$

Подставляя (15.10) и (15.11) в (15.9), получим

$$E = -\frac{e^2}{8\pi\epsilon_0\epsilon r} \quad (15.12)$$

т. е. полная энергия электрона оказывается отрицательной и равной по абсолютной величине его кинетической энергии.

Подставляя в формулу (15.12) выражение для радиуса (15.8), получим

$$E = -\frac{1}{n^2} \frac{me^4}{8\epsilon_0^2\epsilon^2 h^2} \quad (15.13)$$

По этой формуле можно рассчитать энергию электрона для любой стационарной орбиты. Например, для ближайшей к ядру орбите ( $n = 1$ ) получим

$$E_1 = -\frac{1}{1^2} \frac{9,1 \cdot 10^{-31} \text{ кг} \cdot (1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл})^4}{8 \cdot (8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м})^2 \cdot (6,625 \cdot 10^{-34} \text{ Дж/с})^2} \approx \\ \approx -21,68 \cdot 10^{-19} \text{ Дж} = -13,55 \text{ эВ.}$$

Для  $n = 2$   $E_2 = -3,38$  эВ; для  $n = 3$   $E_3 = -1,50$  эВ; для  $n = 4$   $E_4 = -0,84$  эВ; для  $n = 5$   $E_5 = -0,54$  эВ; для  $n = 6$   $E_6 = -0,38$  эВ; для  $n = \infty$   $E = 0$  эВ.

Значение полной энергии электрона, находящегося на стационарной орбите, называется *уровнем энергии атома* (или *энергетическим уровнем*).

Согласно формуле (15.12),

**энергия атома возрастает с увеличением квантового числа или, что то же, с увеличением радиуса электронной орбиты.**

Здесь надо учитывать, что энергия  $E$  отрицательна; поэтому уменьшение ее абсолютной величины соответствует возрастанию

энергии. Минимумом энергии ( $E = -13,55$  эВ) атом обладает при движении электрона по ближайшей к ядру орбите ( $n = 1$ ), а максимум энергии ( $E = 0$ ) — при движении по самой дальней орбите ( $n = \infty$ ).

При переходе электрона с одной стационарной орбиты на другую, ближнюю к ядру орбиту излучается квант энергии, равной разности энергетических уровней атома до излучения и после него. Так, переход электрона со второй орбиты ( $n = 2$ ) на первую ( $n = 1$ ) сопровождается излучением кванта  $h\nu_{2 \rightarrow 1} = -3,38 - (-13,55) = 10,17$  эВ, а переход электрона с третьей орбиты ( $n = 3$ ) на вторую ( $n = 2$ ) — излучением кванта  $h\nu_{3 \rightarrow 2} = -1,50 - (-3,38) = 1,88$  эВ.

Самопроизвольный переход на более далекую орбиту, т. е. самопроизвольный переход атома на более высокий энергетический уровень, невозможен. Для осуществления такого перехода необходимо сообщить атому определенное количество энергии извне, т. е. возбудить атом. Например, переход электрона с первой стационарной орбиты на вторую совершается при поглощении атомом кванта, равного 10,17 эВ, а переход электрона со второй орбиты на третью — поглощением кванта, равного 1,88 эВ.

Таким образом, атом может излучать и поглощать волны только вполне определенных частот (длин), чем и обусловлен линейчатый характер водородного спектра.

Нормальным состоянием атома является такое, при котором электрон движется по самой близкой к ядру орбите ( $n = 1$ ). В этом случае атом не может излучать, поскольку электрон не имеет возможности перейти с этой орбиты еще ближе к ядру. Энергетический уровень  $E = 13,55$  эВ, соответствующий нормальному состоянию атома, называется *нормальным уровнем*; все остальные уровни называются *возбужденными*.

Выведем теперь общую формулу частоты  $\nu$  излучения атома. Для этого подставим выражение энергии (15.13) в условие частот (15.6):

$$\nu = \frac{E - E_0}{h} = \frac{me^4}{8\varepsilon_0^2\varepsilon^2h^3} \left[ \frac{1}{n^2} - \left( -\frac{1}{n_0^2} \right) \right] = \frac{me^4}{8\varepsilon_0^2\varepsilon^2h^3} \left( \frac{1}{n_0^2} - \frac{1}{n^2} \right), \quad (15.14)$$

где  $n$  и  $E$  — квантовое число и энергия, соответствующие начальному состоянию атома (до излучения), а  $n_0$  и  $E_0$  — те же характеристики конечного состояния атома (после излучения).

Значение постоянного множителя, стоящего в правой части формулы (15.14), оказывается равным постоянной Ридберга:

$$R = \frac{me^4}{8\epsilon_0^2 \epsilon^2 h^3}, \quad (15.15)$$

в чем легко убедиться, подставляя в формулу (15.15) численные значения универсальных постоянных.

Следовательно формула (15.14) имеет вид

$$\nu = R \left( \frac{1}{n_0^2} - \frac{1}{n^2} \right). \quad (15.16)$$

Сопоставление формул (15.16) с эмпирическими серийными формулами (15.2), (15.3) и (15.4) показывает, что они являются частными случаями формулы (15.16). В самом деле, при  $n_0 = 1$  и  $n = 2, 3, 4, \dots$  формула (15.16) дает серию Лаймана, при  $n_0 = 2$  и  $n = 3, 4, 5, \dots$  — серию Бальмера, при  $n_0 = 3$  и  $n = 4, 5, 6, \dots$  — серию Пашена.

Следовательно, спектральные линии серии Лаймана соответствуют излучению атома водорода при переходе электрона со второй, третьей, четвертой и т. д. орбит на первую; линии серии Бальмера соответствуют излучению при переходе электрона с третьей, четвертой, пятой и т. д. орбит на вторую; линии серии Пашена соответствуют излучению при переходе электрона с четвертой, пятой, шестой и т. д. орбит на третью.

Так как газ состоит из множества различно возбужденных атомов, то в нем одновременно совершаются все возможные типы переходов электрона. Поэтому в спектре излучения водорода одновременно представлены линии всех серий (при том, конечно, условии, что атомы все время возбуждаются посредством какого-либо внешнего источника энергии).

Рассмотренная теория строения атома водорода применима и к водородоподобным атомам, т. е. к ионизированным атомам, содержащим только один электрон (например,  $\text{He}^+$ ,  $\text{Li}^{++}$ ,  $\text{Be}^{+++}$ ). Однако в этом случае при выводе формул следует полагать заряд ядра равным не  $e$ , а  $eZ$  (где  $Z$  — атомный номер химического элемента).

Применительно к водородоподобным атомам спектральная формула Бора (15.16) принимает вид

$$\nu = RZ^2 \left( \frac{1}{n_0^2} - \frac{1}{n^2} \right). \quad (15.17)$$

Квантовая теория Бора сыграла важную роль в развитии физики. Количественно объяснив строение атома водорода и сложную

структуру водородного спектра, она наметила правильный подход к изучению внутриатомных процессов. Правда, непосредственное использование теории Бора (в том виде, в каком она изложена ранее) для расчета спектров многоэлектронных атомов оказалось невозможным. Понадобилось дальнейшее развитие этой теории, завершившееся созданием современной квантовой механики, количественно объясняющей все особенности строения и свойства атомов и молекул.

Тем не менее теория Бора дает возможность качественно (и притом весьма наглядно) объяснить общие черты строения многоэлектронных атомов и их спектров, в частности обосновать закономерности расположения химических элементов в периодической системе Д. И. Менделеева.

Ограниченность квантовой теории Бора обусловлена тем, что она не вполне последовательна в своих построениях: базируясь на квантовых исходных положениях (постулатах), она пользуется законами классической механики для описания движения электронов в атоме (в этом смысле ее можно было бы назвать «полуквантовой» теорией).

#### 15.4. Лазеры — источники когерентного излучения

**Индукцирование излучения света атомами.** Излучать энергию атом может только в том случае, если он за счет поглощения энергии извне возбужден, т. е. переведен из основного энергетического состояния в одно из возбужденных состояний. Ионизированный атом, из которого удален электрон, также является возбужденным. При возвращении возбужденных атомов в состояния с более низкими энергиями возникает спектр испускания.

В некоторых случаях переходы на более низкий энергетический уровень не сопровождаются излучением фотона, т. е. являются безызлучательными (избыток энергии атома передается соседним частицам).

Процесс испускания фотона атомом может происходить самопроизвольно, спонтанно, или под действием внешнего электромагнитного поля. Самопроизвольные переходы осуществляются только в одном направлении — с более высоких энергетических уровней на более низкие. Вынужденные переходы могут происходить как в одном, так и в другом направлении. При вынужденном переходе с одного из возбужденных уровней на более высо-

кий уровень атом поглощает падающее на него излучение. При вынужденном переходе с одного из возбужденных уровней на более низкий энергетический уровень происходит излучение атома фотона дополнительно к тому фотону, под действием которого произошел переход. Это дополнительное излучение называется *вынужденным*, или *индуцированным*.

При спонтанных переходах акты излучения атомов в теле неупорядочены во времени и пространстве: испускаемые фотоны имеют разные направления и случайные фазы. Поэтому спонтанное излучение является некогерентным. Все естественные источники дают спонтанное излучение.

Однако в некоторых случаях возбужденные энергетические состояния могут существовать достаточно долго ( $10^{-3}$  с и более). Такие состояния и соответствующие им энергетические уровни называются *метастабильными*. На них может накапливаться большое количество атомов, т. е. достигается большая «заселенность» при поглощении веществом энергии. Переход атома с метастабильного уровня на основной может быть стимулирован внешним электромагнитным полем. В этом случае, как было предсказано А. Эйнштейном в 1916 г., возникает индуцированное излучение.

Вынужденное излучение обладает весьма важными свойствами. Направление его распространения в точности совпадает с направлением распространения внешнего излучения, вызвавшего переход. Частоты, фазы и состояния поляризации вынужденного и внешнего излучения также совпадают. Таким образом, вынужденное и внешнее излучения являются когерентными. Эта особенность вынужденного излучения лежит в основе действия усилителей и генераторов света, называемых *лазерами*.

История создания лазера начинается с фундаментальных работ А. Эйнштейна, опубликованных в 1916 г. Впервые принцип усиления света за счет вынужденного излучения был предложен в 1940 г. советским физиком В. А. Фабрикантом, который со своими коллегами в 1951 г. получил свидетельство на изобретение способа усиления излучения за счет использования вынужденного излучения. Вскоре этот способ усиления излучения был реализован. Но вначале он был реализован не в оптическом диапазоне, а в диапазоне сверхвысоких частот.

В 1952 г. на Общесоюзной конференции по радиоспектроскопии Н. Г. Басов и А. М. Прохоров сообщили о принципиальной возможности создания усилителя и генератора излучения в СВЧ-диапазоне. Они назвали его «молекулярным генератором», поскольку

ку предполагалось использовать в качестве активной «среды» пучок молекул аммиака. Аналогичное предположение об использовании вынужденного испускания для усиления и генерации СВЧ-излучения было высказано американским физиком Ч. Таунсом.

В 1954 г. был создан молекулярный генератор, названный вскоре *мазером*. Его разработали и создали независимо и практически одновременно два коллектива ученых — советские ученые, работавшие в Физическом институте АН СССР под руководством Н. Г. Басова и А. М. Прохорова, и американские ученые, работавшие в Колумбийском университете США под руководством Ч. Таунса. Созданный ими молекулярный генератор на пучке молекул аммиака генерировал излучение на длине волны 1,25 мкм.

Таким образом, интенсивные теоретические и экспериментальные исследования, проводившиеся в СССР и США, вплотную подвели ученых и инженеров в конце 1950-х гг. к созданию лазера. Успех выпал на долю американского физика Т. Меймана. В 1960 г. появилось сообщение о том, что ему удалось получить на рубине генерацию излучения в оптическом диапазоне. Так мир узнал о рождении первого оптического лазера — лазера на рубине, который представлял собой кубик размером  $1 \times 1 \times 1$  см с двумя посеребренными противоположными гранями. В дальнейшем активный элемент лазеров на рубине, как и других твердотельных лазеров, изготавливали в форме цилиндра с зеркальными покрытиями на торце. В том же 1960 г. американским физиком А. Джовану, В. Беннету, Д. Эрриоту удалось получить генерацию когерентного оптического излучения в электрическом разряде в смеси неона и гелия. Так появился первый газовый лазер — широко применяемый в настоящее время гелий-неоновый лазер. Спустя год после создания первого газового лазера была получена генерация в 10 различных газовых смесях на 40 рабочих переходах, перекрывающих спектр от 0,6 до 12 мкм. В 1962 — 1963 гг. в СССР и США одновременно были созданы полупроводниковые лазеры.

В 1964 г. Н. Г. Басову, А. М. Прохорову и Ч. Таунсу за работы по созданию лазеров была присуждена Нобелевская премия. Сразу же после появления первых образцов газовые лазеры привлекли к себе особое внимание исследователей. Генерируемое ими излучение обладало более высокой когерентностью, чем излучение твердотельных, а тем более полупроводниковых, лазеров. К сожалению, выходная мощность первых газовых лазеров



Рис. 15.3

была очень низкой. Ситуация, однако, изменилась в 1966 г., когда К. Пател (США) создал первый лазер на смеси углекислого газа и азота ( $\text{CO}_2$ -лазер). Сохраняя высокую когерентность излучения, присущую газовым лазерам,  $\text{CO}_2$ -лазеры в то же время позволяли получать высокую выходящую мощность в непрерывном режиме и при этом характеризовались относительно большим КПД. Так начался новый период в развитии оптики — «лазерный период».

**Принцип действия и устройство квантового генератора (лазера).** При поглощении извне кванта энергии частицы переводятся с основного уровня  $E$  на возбужденный уровень  $E'$  (рис. 15.3), откуда они спонтанно совершают безызлучательный переход на метастабильный уровень  $E_m$ . Время жизни частиц на метастабильных уровнях несравненно больше, чем на обычных возбужденных уровнях. Поэтому заселенность уровня  $E_m$  становится больше заселенности основного уровня  $E$  — образуется так называемая инверсия заселенности. При этом резко возрастает вероятность индуцированных переходов.

На рис. 15.4 показана схема действия рубинового лазера. Активной средой является кристалл рубина (оксид алюминия  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), в кристаллическую решетку которого внедрены ионы хрома ( $\text{Cr}^{3+}$ ) в форме стержня со строго параллельными посеребренными торцевыми гранями, из которых одна (выходная грань) полупрозрачна.

Поглощая свет от источника возбуждения — лампы, расположенной вблизи кристалла, ионы хрома совершают переход воз-

буждения  $E \rightarrow E'$  и затем безызлучательный переход  $E' \rightarrow E_{\text{ст}}$ , создавая на метастабильном уровне  $E_{\text{м}}$  перенаселенность (процесс «накачки»). Берущая начало от спонтанного перехода лавина индуцированных фотонов развивается только в направлении, параллельном оси кристалла, так как фотоны, движущиеся под углом к оси, уходят через боковую поверхность. В осевом же направлении благодаря наличию отражающих зеркал создается положительная обратная связь: уже возникший поток когерентного излучения продолжает усиливаться за счет его многократного отражения от зеркал. Лавина непрерывно нарастает и, достигая высокой интенсивности, выходит через полупрозрачную грань в виде узкого когерентного пучка света.

Лазеры различной конструкции могут генерировать не только свет, но и излучение в ИК-диапазоне, радиодиапазоне. Излучение лазера отличается рядом замечательных особенностей. Для него характерны: строгая монохроматичность; высокая временная и пространственная когерентность; большая интенсивность и узость пучка. Так, для лазера на рубине расходимость светового пучка составляет малые доли градуса, выходная мощность в им-

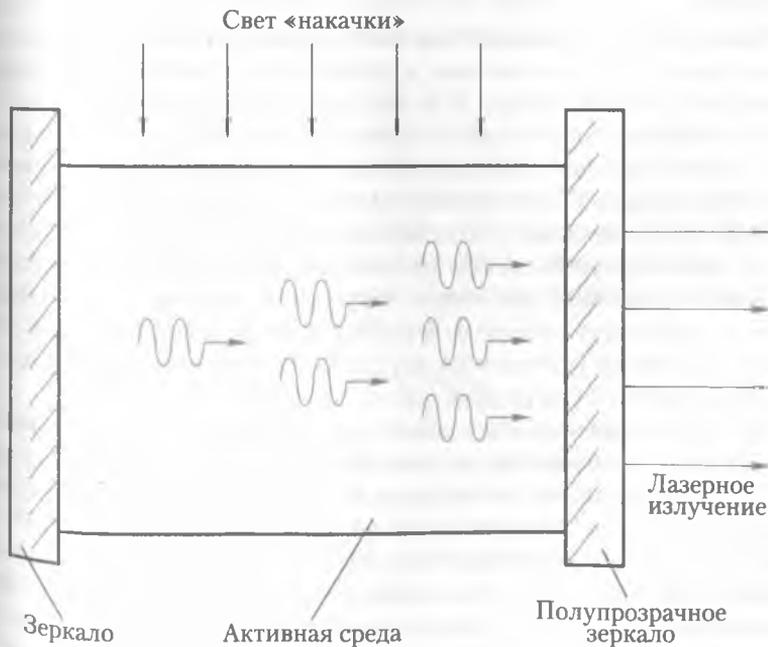


Рис. 15.4

пульсе достигает  $10^8$  Вт. КПД лазеров пока невелик (доли процента), но считается возможным увеличить его до 40%.

Кроме рубинового лазера, относящегося к числу твердотельных лазеров, существуют газоразрядные, эксимерные, электроионизационные, химические, полупроводниковые, газодинамические и др. Состав активной среды, т. е. рабочего вещества, применяемого в лазере, определяет способ возбуждения атомов этой среды, применяемый в данном лазере. Например, в газовых лазерах в качестве активной среды используют смеси газов или газа с парами металла. В таких лазерах атомы рабочего вещества возбуждаются высокочастотными электрическими разрядами. А в полупроводниковых лазерах неравновесное состояние активной среды получают, пропуская электрический ток через  $p-n$ -переход.

Диапазон света, излучаемого лазером, также зависит от состава его активной среды. Например, гелий-неоновый лазер излучает красный свет, а лазер на смеси CO с инертными газами — электромагнитные волны инфракрасного диапазона. Существуют лазеры как импульсного, так и непрерывного действия (газовые, газодинамические и полупроводниковые), а также с перестраиваемой частотой.

**Практическое применение когерентного излучения.** Лазеры имеют широкое применение в различных областях. Фокусируя пучок излучения лазера с помощью линзы, можно создать в малых объемах огромную плотность энергии, способную испарять металл, высверливать в алмазах тонкие отверстия, проводить микросварку. В медицине лазерный луч успешно используют для «приваривания» отслоившейся сетчатки к тканям глазного дна, для разрушения опухолей и хирургических операций на внутренних органах (поглощая излучение, участки ткани испаряются — образуется надрез), а в биологии — для ювелирных операций на клетке (луч лазера играет роль тонкого хирургического скальпеля) и стимуляции роста растений.

Возникло и развивается новое научное направление — *лазерная химия*, основанная на возможности стимулировать активность веществ путем ослабления или разрыва молекулярных связей действием лазерного излучения. Благодаря высокой монохроматичности лазерный луч способен избирательно «раскачивать» определенные связи, если его частота входит в резонанс с частотами колебаний отдельных атомов или групп атомов в молекуле. Лазерный луч позволяет таким образом направленно воздействовать на ход некоторых химических реакций, активн-

зируя те группы атомов, которые в обычных условиях химически неактивны. Так можно получить соединения, которые не могут быть получены обычным путем. Аналогично в биологии луч лазера способен разрушить определенные участки биомолекулы. Представляется возможным таким образом вызывать нужные мутации в молекулах ДНК.

Нагрев плазмы лазером может быть использован для осуществления управляемых термоядерных реакций. Лазерное излучение позволяет разделять изотопы за счет небольшого различия в расположении энергетических уровней изотопов. Лазерный луч высокой монохроматичности способен избирательно «раскачивать» определенные связи в изотопах. В этом случае лазерное излучение высокой монохроматичности возбуждает атомы одного изотопа, не затронув атомы другого.

В процессе возбуждения атомы, как правило, приобретают электрический или магнитный момент и могут быть отклонены электрическим или магнитным полем.

Возможен и другой путь. Если возбужденные атомы быстро высвечиваются, то при освещении лазерным лучом они могут повторно поглощать фотоны, получая от них импульс определенного направления. Тем самым атомы изотопа, способного возбуждаться, просто «выталкиваются» лазерным лучом в направлении его распространения из атомного пучка.

Электрическое поле лазерного излучения может иметь напряженность ( $E = 10^8 \dots 10^{10}$  В/м), сравнимую с напряженностью внутриатомных электрических полей. Вещество, попадая в такое поле, коренным образом изменяет свои свойства. Так, при большой интенсивности лазерного пучка наблюдается *многофотонное поглощение света*: в элементарном акте взаимодействия света с молекулой (атомом) может одновременно поглотиться не один фотон, а несколько ( $N$ ) фотонов:

$$E' - E = N h \nu.$$

Это позволяет проводить возбуждение молекул, их диссоциацию, ионизацию, фотоактивацию излучением, частота которого в  $N$  раз меньше, чем при однофотонном поглощении.

Примером практического применения лазеров является также *голография* — особый способ фиксирования на фотопластинке структуры световой волны, отраженной предметом. При освещении этой пластинки (голограммы) пучком света зафиксированная на ней волна восстанавливается в почти первоначальном виде, так что при восприятии восстановленной волны глазом зрительное

ощущение бывает практически таким же, каким оно было при наблюдении самого предмета.

Голография была изобретена в 1947 г. венгерским физиком Д. Габором, работавшим тогда в Англии. Однако полное осуществление идеи Д. Габора стало возможным лишь после появления в 1960 г. источников света высокой степени когерентности — лазеров. Исходная схема Д. Габора была усовершенствована американскими физиками Э. Лейтом и Ю. Упатниексом, которые получили в 1962 г. первые лазерные голограммы. Советский ученый Ю. Н. Денисюк предложил и впоследствии осуществил оригинальный метод фиксирования голограмм на толстослойной эмульсии. Этот метод обладает рядом особенностей, в частности дает цветное изображение объектов.

Открытие лазеров является своеобразной революцией в оптике, дающей толчок к развитию новых оптических методов исследования и ряда областей технологии.



## ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ВЫВОДЫ

1. Английский физик Дж. Томсон в 1902 г. сделал первую попытку построить модель атома, которую называют «пудинг с изюмом». Простейший атом с одним электроном по модели Дж. Томсона представляет собой равномерное сферическое распределение положительного электрического заряда, в центре которого находится электрон. Для более сложных атомов, электрически нейтральных, количество находящихся в них электронов должно быть строго определенным, соответствующим данному химическому элементу.

2. В 1911 г. английский физик Э. Резерфорд на основании многочисленных экспериментов пришел к выводу: в центре атома находится положительно заряженное ядро, вокруг которого движутся электроны. Размеры ядра в 100 тысяч раз меньше размеров самого атома. Однако практически вся масса атома (более 99,94%) сосредоточена в ядре.

3. В видимой части спектра излучения водорода швейцарский физик И. Бальмер в 1885 г. обнаружил серию линий (серия Бальмера), частота которых выражается эмпирической формулой

$$\nu = R \left( \frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right), \quad n = 3, 4, 5, \dots$$

где  $R$  — постоянная Ридберга.

В ультрафиолетовой части спектра излучения водорода английский физик К. Лайман в 1906 г. обнаружил серию линий (серия Лаймана), частота которых выражается формулой

$$\nu = R \left( \frac{1}{1^2} - \frac{1}{n^2} \right), \quad n = 2, 3, 4, \dots$$

В инфракрасной части спектра излучения водорода немецкий физик Ф. Пашен в 1908 г. обнаружил серию линий (серия Пашена), частота которых выражается формулой

$$\nu = R \left( \frac{1}{3^2} - \frac{1}{n^2} \right), \quad n = 4, 5, 6, \dots$$

4. В 1913 г. датский физик Н. Бор сформулировал три постулата.

Первый постулат (правило квантования орбит): электроны в атоме могут двигаться только по стационарным (разрешенным) орбитам, удовлетворяющим условию

$$mvr = n \frac{h}{2\pi},$$

где  $r$  — радиус орбиты;  $m$  — масса электрона;  $v$  — скорость электрона;  $h$  — постоянная Планка;  $n$  — главное квантовое число, обозначающее номер орбиты электрона.

Второй постулат (постулат стационарных состояний): движение электрона по стационарной орбите не сопровождается излучением или поглощением энергии.

Третий постулат (правило частот): переход электрона с одной стационарной орбиты на другую сопровождается излучением (или поглощением) кванта энергии:

$$h\nu = E_1 - E_2.$$

5. Радиусы стационарных орбит атома водорода можно определить по формуле

$$r = n^2 \frac{\epsilon_0 \epsilon h^2}{\pi m e^2}, \quad n = 3, 4, 5, \dots$$

откуда следует, что радиусы стационарных орбит относятся между собой как квадраты натурального ряда чисел, т. е.  $1^2 : 2^2 : 3^2 : \dots$  ( $n^2$  квантуются).

6. Полную энергию электрона для стационарной орбиты можно рассчитать по формуле:

$$E = -\frac{1}{n^2} \frac{me^4}{8\epsilon_0^2 \epsilon^2 h^2}, \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

7. **Вынужденное излучение** (индуцированное излучение) — излучение электромагнитных волн частицами вещества (атомами, молекулами и др.) под действием внешнего электромагнитного излучения. Вынужденное излучение когерентно с вынуждающим излучением и при определенных условиях может привести к усилению или генерации электромагнитных волн. Вынужденное излучение лежит в основе квантовых генераторов (лазеров) и квантовых усилителей.

8. **Лазер** (оптический квантовый генератор) — источник оптического когерентного излучения, характеризующегося высокой степенью монохроматичности, направленностью и большой плотностью энергии. Один из основных приборов квантовой электроники. Лазеры бывают газовые, жидкостные, полупроводниковые и твердотельные. Первый лазер (на рубине) был создан в 1960 г. Т. Мейманом (США); первый газовый лазер (на смеси He — Ne) — А. Джованом (США). В основу действия лазера положено вынужденное излучение света под действием внешнего электромагнитного поля. Пробразом лазера стал молекулярный генератор на аммиаке, который независимо друг от друга создали в СССР Н. Г. Басов и А. М. Прохоров, а в США Ч. Таунс. Главный элемент лазера — активная среда, для образования которой используют различные методы «накачки». Разработаны лазеры на основе газовых, жидкостных и твердотельных сред (в том числе на диэлектрических кристаллах, стеклах, полупроводниках). Лазеры применяются в научных исследованиях (в физике, астрономии, химии, биологии и др.), медицине (хирургии, офтальмологии и др.), а также в технике (лазерная технология, в том числе создание материалов полупроводниковой электроники, высокоточная обработка поверхностей сверхтвердых материалов и др.).



### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ

1. В чем заключается сущность модели атома Дж. Томсона? Охарактеризуйте ее достоинства и недостатки.
2. На основании каких экспериментов Э. Резерфорд пришел к планетарной модели атома? Каковы ее недостатки?
3. Какие серии характерны для атома водорода? Кем и когда они были открыты? Какими эмпирическими законами описываются?

4. О чем говорит линейчатый характер спектров излучения (и поглощения) атома водорода?
5. На основании каких экспериментальных фактов Н. Бор сформулировал постулаты? В чем заключается их физический смысл?
6. Вычислите радиус второй орбиты электрона в атоме водорода и энергию электрона на этой орбите.

*Ответ:*  $r_2 = 1,06 \cdot 10^{-10} \text{ \AA}$ ;  $E = -3,38 \text{ эВ}$ .

7. Электрон в атоме водорода перешел с третьей орбиты на вторую. Чему равна при этом частота излучения фотона (кванта света)?

*Ответ:*  $\nu = 0,45 \cdot 10^{15} \text{ Гц}$ .

8. Изобразите схематически энергетические уровни стационарных орбит электрона в атоме водорода, указав на схеме переходы электрона, соответствующие сериям Лаймана, Бальмера и Пашена.
9. Что в общем представляет собой современная модель атома?
10. Что представляет собой вынужденное излучение?
11. Как устроен квантовый генератор и в чем состоит принцип его действия?

## 16.1. Общие сведения об атомных ядрах

В 1932 г. английский физик Дж. Чедвик открыл новую электрически нейтральную частицу, названную нейтроном. Сразу же вслед за этим открытием независимо друг от друга советский физик Д. Д. Иваненко и немецкий физик В. Гейзенберг предложили *нейтронно-протонную модель ядра*. Дальнейшие исследования подтвердили их предположения. На данный момент считается твердо установленным фактом, что ядра всех химических элементов состоят из нейтронов и протонов.

*Нейтрон* — электрически нейтральная элементарная частица с массой покоя  $m_n = 1,674920 \cdot 10^{-27}$  кг. В свободном состоянии нейтрон неустойчив. Период полураспада  $(1,01 \pm 0,03) \cdot 10^3$  с. *Протон* — стабильная элементарная частица, имеет положительный заряд, равный заряду электрона, т. е.  $e_p = 1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл, и массу покоя  $m_p = 1,672614(14) \cdot 10^{-24}$  кг. Протон принято обозначать буквой  $p$ , нейтрон — буквой  $n$ ; общее название этих частиц — *нуклоны* (от лат. *nucleos* — ядро).

Современная физика считает, что в ядре постоянно происходят процессы взаимопревращения нейтронов и протонов.

Массу ядер и элементарных частиц обычно выражают в *атомных единицах массы* (а. е. м.). За атомную единицу массы принята  $1/12$  массы изотопа углерода  $^{12}\text{C}$ ;  $1$  а. е. м. =  $1,66 \cdot 10^{-27}$  кг. Следовательно,  $m_p = 1,00728$  а. е. м., а  $m_n = 1,00866$  а. е. м. Таким образом,

$$m_p \approx m_n \approx 1 \text{ а. е. м.} = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ кг.} \quad (16.1)$$

Из курса химии известно, что заряд атомного ядра любого химического элемента, выраженный в элементарных зарядах, равен

атомному номеру  $Z$  этого элемента. Но заряд ядра складывается из протонов, следовательно,

число протонов  $N_p$  в атомном ядре элемента равно атомному заряду  $Z$  элемента:

$$N_p = Z. \quad (16.2)$$

Почти вся масса атома заключена в его ядре (см. подразд. 15.1). Но масса атома складывается из масс всех нуклонов, входящих в ядро. Тогда согласно соотношению (16.1) сумма чисел протонов  $N_p$  и нейтронов  $N_n$  должна быть равна массовому числу атома, т. е. целому числу  $A$ , ближайшему к атомной массе (выраженной в а.е.м.):  $N_p + N_n = A$ , или, учитывая формулу (16.2),  $Z + N_n = A$ . Следовательно,

число нейтронов в атомном ядре элемента равно разности между массовым числом и атомным номером элемента:

$$N_n = A - Z. \quad (16.3)$$

Таким образом, по массовому числу и атомному номеру химического элемента можно непосредственно определить число протонов и число нейтронов, содержащихся в атомном ядре этого элемента.

Если проследить за распределением числа протонов  $Z$  и нейтронов  $A - Z$  в ядрах различных элементов периодической системы Д.И. Менделеева, то можно заметить, что для ядер элементов вплоть до середины таблицы Менделеева число нейтронов, входящих в ядро, примерно равно числу протонов, так что  $(A - Z)/Z \approx 1$ . По мере утяжеления ядер, с ростом массового числа, число нейтронов возрастает по сравнению с числом протонов в ядре. В конце периодической таблицы отношение  $(A - Z)/Z \approx 1,6$ .

Атомные ядра химических элементов принято обозначать символом  ${}^A_ZX$ , где  $X$  — символ элемента,  $A$  — массовое число,  $Z$  — атомный номер. Например,  ${}^4_2\text{He}$  означает атомное ядро гелия;  ${}^{16}_8\text{O}$  — атомное ядро кислорода и т. п.

**Изотопы.** Атомы, ядра которых состоят из одинакового числа протонов, но различного числа нейтронов, называются *изотопами*. Например, у водорода имеются четыре изотопа: *протий* (легкий водород)  ${}^1_1\text{H}$ , *дейтерий* (тяжелый водород)  ${}^2_1\text{D}$ , *третий* (сверхтяжелый водород)  ${}^3_1\text{T}$  и открытый в 1963 г. группой итальянских физиков (Арганом, Пьяццоли, Пирачино и др.) *четырёхнуклонный водород*, не получивший специального названия. Ядро протия (протон)  ${}^1_1\text{H}$  состоит из одного протона ( $A = 1$ ), ядро дейтерия

(дейтрон)  ${}^2_1\text{H}$  — из протона и нейтрона ( $A = 2$ ), ядро трития (три-тон)  ${}^3_1\text{H}$  — из протона и двух нейтронов ( $A = 3$ ), ядро четырехнуклонного водорода  ${}^4_1\text{H}$  — из протона и трех нейтронов ( $A = 4$ ). В соединении с кислородом дейтерий образует *тяжелую воду* ( $\text{D}_2\text{O}$ ), тритий — *сверхтяжелую воду* ( $\text{T}_2\text{O}$ ).

Тяжелая вода всегда содержится в природной воде, правда, в очень небольшом количестве — примерно 0,016% по массе и может быть выделена из природной воды путем многократной перегонки или электролиза. Сверхтяжелая вода встречается в ничтожных количествах (порядка  $10^{-16}$ % по массе) в дождевой воде.

Все изотопы одного химического элемента имеют одинаковое строение электронных оболочек. Поэтому у изотопов данного элемента одинаковы как химические свойства, так и те физические свойства, которые обусловлены главным образом структурой электронной оболочки.

Физические свойства, обусловленные структурой ядра (массовое число, плотность, радиоактивность и др.), заметно различаются. Понятно, что это различие наиболее отчетливо выражено у самых легких химических элементов.

В настоящее время установлено, что большинство химических элементов, встречающихся в природе, представляет собой смесь изотопов. В частности, природный водород состоит, % по массе: протий — 99,985 и дейтерий — 0,015.

Из периодической системы Д. И. Менделеева видно, что атомные массы некоторых химических элементов значительно отличаются от целых чисел. В 1919 г. английский физик Астон экспериментально установил, что такие элементы представляют собой смесь нескольких изотопов. Это является главной причиной нецелочисленности атомных масс химических элементов; другая причина, связанная с так называемым дефектом массы, будет рассмотрена далее.

Существуют такие химические элементы, ядра атомов которых при одинаковом массовом числе обладают различным числом протонов. Они называются *изобарами*.

Изобары большей частью встречаются среди тяжелых ядер, причем парами или триадами. В настоящее время известно 59 устойчивых изобарных пар и 5 изобарных триад. Примерами устойчивых изобарных пар являются  ${}^{36}_{16}\text{S}$  и  ${}^{36}_{18}\text{Ar}$ ;  ${}^{104}_{44}\text{Ru}$  и  ${}^{104}_{46}\text{Pd}$ ; изобарной триады —  ${}^{96}_{40}\text{Zr}$ ,  ${}^{96}_{41}\text{Mo}$  и  ${}^{96}_{44}\text{Ru}$ .

**Устойчивость ядер.** Известно около 300 стабильных и свыше 1 000 радиоактивных ядер. Радиоактивные ядра — это неустойчивые ядра, способные самопроизвольно распадаться. Степень ста-

бильности радиоактивных ядер определяется периодом полураспада — временем, в течение которого половина из наличных ядер подвергнется распаду. Атомы, ядра которых имеют одинаковые  $A$  и  $Z$ , но отличаются периодом полураспада, называются *изомерами*. Так, радиоактивный изотоп протактиния  ${}_{91}^{234}\text{Pa}$  имеет два изомера: у одного период полураспада  $T_{1/2} = 6,7$  ч, у другого  $T_{1/2} = 1,14$  мин.

**Модели атомных ядер.** Протонно-нейтронная модель ядра, которая впоследствии была полностью подтверждена экспериментально, является первой. Впоследствии было предложено еще несколько моделей строения ядер атомов.

Согласно *капельной модели* (по Я. И. Френкелю), нуклоны в ядре взаимодействуют подобно молекулам в капле жидкости, причем между нуклонами, расположенными в поверхностном слое, действуют силы, аналогичные силам поверхностного натяжения жидкости, что повышает прочность ядра. Эта модель хорошо объясняет механизм ядерных реакций, особенно реакции деления ядер.

*Оболочечная модель* предусматривает распределение нуклонов в ядре по определенным энергетическим уровням (оболочкам) и связывает устойчивость ядра с заполнением этих уровней.

Предложена также *объединенная модель*, согласно которой в центральной части ядра нуклоны взаимодействуют подобно молекулам в капле жидкости, а окружающие нуклоны распределены по оболочкам, соответствующим определенным энергетическим уровням.

**Внутриядерные силы и их особенности.** Как известно, ядра весьма устойчивы, а это значит, что протоны и нейтроны удерживаются внутри ядра какими-то силами, причем очень большими. Это не гравитационные силы, так как они весьма малы. Это принципиально новый вид сил, ранее не известный, поэтому этот вид взаимодействия между нуклонами принято называть *ядерными силами*, а осуществляемое ими взаимодействие — *сильным*.

Природа этих сил до конца не выяснена, поэтому укажем некоторые их особенности.

1. Поле ядерных сил не является центральным, т. е. по своим свойствам резко отличается от электрического и гравитационного полей.

2. Ядерные силы относятся к силам притяжения.

3. Это короткодействующие силы, проявляющиеся на расстояниях между нуклонами порядка  $10^{-15}$  м.

4. Это сильнодействующие силы, на несколько порядков больше, чем силы любых других в природе взаимодействий, например, в 100 раз больше электромагнитных сил.

5. Ядерные силы обладают свойством зарядовой независимости: эти силы, действующие между двумя протонами, между нейтронами или между протоном и нейтроном, одинаковы.

6. Ядерные силы обладают свойством насыщения, т. е. каждый нуклон взаимодействует не со всеми остальными в ядре, а лишь с ограниченным числом нуклонов, находящимся к нему в непосредственной близости. Поэтому при увеличении числа нуклонов в ядре ядерные силы ослабевают, как это имеет место для сил электрического отталкивания между протонами. Этим объясняется, например, малая устойчивость ядер тяжелых элементов, в которых содержится значительное число протонов.

Общей математической формулы для ядерных сил пока не найдено. На данный момент еще не создана теория, удовлетворительным образом объясняющая все особенности ядерного взаимодействия.

**Энергия связи и дефект массы атомного ядра.** Для того чтобы нарушить ядро и удалить нуклоны из поля действия ядерных сил, надо совершить работу, т. е. затратить некоторую энергию, называемую *энергией связи*  $E_{св}$  ядра. Другими словами, энергией связи ядра называют энергию, необходимую для расщепления ядра на отдельные протоны и нейтроны и удаления их друг от друга на такие расстояния, при которых они не взаимодействуют. Значением энергии связи определяется *прочность ядра*.

Энергия связи зависит от числа входящих в ядро нуклонов. Поэтому для сравнения между собой ядер различных элементов используют среднее значение энергии связи, приходящееся на один нуклон, так называемую удельную энергию связи:

$$\epsilon_{св} = E_{св} / A,$$

где  $A$  — массовое число.

Измерение масс ядер показывает, что масса ядра всегда меньше суммы масс исходных нуклонов. Разность между массой исходных частиц и массой ядра называют *дефектом массы*:

$$\Delta m = Zm_p + (A - Z)m_n - m_{я}, \quad (16.4)$$

где  $m_{я}$  — масса ядра атома;  $m_p$  — масса протона;  $m_n$  — масса нейтрона.

Энергия связи ядра обусловлена наличием дефекта массы и определяется по известному соотношению А. Эйнштейна:

$$\Delta E_{св} = \Delta mc^2, \quad (16.5)$$

где  $c$  — скорость света в вакууме.

Подставляя в этой формуле выражение для  $\Delta m$  из уравнения (16.4), получим расчетную формулу для энергии связи ядра:

$$\Delta E_{\text{св}} = [Zm_p + (A - Z)m_n - m_{\text{я}}]c^2. \quad (16.6)$$

При вычислении энергии связи дефект массы удобно определять в атомных единицах массы (1 а. е. м. =  $1,66 \cdot 10^{-27}$  кг), а энергию связи — в мегаэлектронвольтах. Тогда энергия связи (МэВ) составит

$$\Delta E_{\text{св}} = \Delta m \cdot 931, \quad (16.7)$$

где 931 МэВ — энергия, эквивалентная 1 а. е. м.

## 16.2. Естественная радиоактивность

**Открытие радиоактивности.** *Радиоактивность* (от лат. *radiare* — излучение и *activus* — деятельный) — свойство атомных ядер самопроизвольно (спонтанно) изменять свой состав (заряд ядра  $Z$ , число нуклонов  $A$ ) путем испускания элементарных частиц,  $\gamma$ -квантов или ядерных фрагментов. Некоторые из существующих в природе ядер радиоактивны (U, Th и др., так называемая естественная радиоактивность), но большинство радиоактивных ядер получено искусственно. Естественная радиоактивность открыта в 1896 г. французским физиком А. Беккерелем, обнаружившим, что соли урана испускают невидимые лучи, способные вызывать люминесценцию, проникать через слои непрозрачных веществ, ионизировать газы, вызывать почернение фотографической пластинки. Дальнейшие исследования, проведенные Пьером Кюри и Марией Склодовской-Кюри, Э. Резерфордом и другими учеными, показали, что естественная радиоактивность свойственна не только урану, но и многим тяжелым химическим элементам, в частности актинию, торию, полонию, радю (два последних элемента были открыты в 1898 г. П. Кюри и М. Склодовской-Кюри). Все элементы были названы *радиоактивными элементами*, а испускаемые ими лучи — *радиоактивными лучами* (*радиоактивным излучением*).

**Состав радиоактивного излучения.** По своему составу радиоактивное излучение является сложным, в него входят три различных вида излучения, получивших названия альфа-лучей, бета-лучей и гамма-лучей. Познакомимся подробно с природой и основными свойствами этих лучей.

1. *Альфа-лучи* — поток положительно заряженных  $\alpha$ -частиц, один из видов радиоактивного излучения атомных ядер;  $\alpha$ -частицы — ядра атомов гелия  ${}^4\text{He}$ , испускаемые некоторыми радиоактивными ядрами (нуклидами и ядрами, состоящими из двух протонов и двух нейтронов). Масса  $\alpha$ -частиц  $6,6 \cdot 10^{-27}$  кг.

Путь, проходимый  $\alpha$ -частицей в веществе (до остановки), называется *пробегом*, или *проникающей способностью*, а число пар ионов, создаваемых  $\alpha$ -частицей на пробеге, — ее *ионизирующей способностью*. Очевидно, что чем больше ионизирующая способность частицы, тем меньше ее пробег. Пробег  $\alpha$ -частиц в воздухе (при нормальном давлении) составляет  $(3 \dots 9) \cdot 10^{-2}$  м, а их ионизирующая способность равна  $(1 \dots 2,5) \cdot 10^5$  пар ионов (в среднем 30 000 пар ионов) на 1 см пробега. Таким образом,  $\alpha$ -частицы обладают высокой ионизирующей способностью, но небольшой проникающей способностью;  $\alpha$ -лучи полностью поглощаются, например, слоем алюминия толщиной 0,06 мм или слоем биологической ткани толщиной 0,12 мм.

2. *Бета-лучи* — поток  $\beta$ -частиц (электронов или позитронов), испускаемых атомными ядрами при их  $\beta$ -распаде;  $\beta$ -распад — самопроизвольные радиоактивные превращения атомных ядер, в процессе которых ядра испускают электроны и антинейтрино или позитроны и нейтрино. Бета-распад обусловлен особым видом взаимодействия между элементарными частицами, называемым слабым взаимодействием, и связан с взаимным превращением нейтронов и протонов в атомных ядрах.

Бета-частицы отклоняются электрическим и магнитным полями. Их масса в 7 350 раз меньше массы  $\alpha$ -частицы. Средняя скорость  $\beta$ -частиц составляет около  $1,6 \cdot 10^8$  м/с.

В отличие от  $\alpha$ -излучения  $\beta$ -излучение имеет сплошной энергетический спектр, т. е. содержит  $\beta$ -частицы со всевозможными значениями энергии. Ядра одного и того же радиоактивного элемента выбрасывают  $\beta$ -частицы и со скоростью, близкой к нулю, и со скоростью, близкой к скорости света. Энергия  $\beta$ -частиц лежит в пределах от сотых долей до нескольких мегаэлектронвольт.

Поскольку  $\beta$ -частица имеет весьма малую массу ( $9,1 \cdot 10^{-31}$  кг), большую (в среднем) скорость и несет только один элементарный заряд, ее ионизирующая способность значительно — в среднем в 100 раз — меньше, а пробег во столько же раз больше, чем у  $\alpha$ -частицы. Пробег  $\beta$ -частицы (высокой энергии) достигает в воздухе 40 м, в алюминии — 2 см, в биологической ткани — 6 см.

Экспериментально установлено, что атомные ядра одного и того же радиоактивного элемента теряют при  $\beta$ -распаде вполне

определенное, одинаковое количество энергии. Поэтому все  $\beta$ -частицы, испускаемые данным элементом, должны были бы обладать одинаковой энергией. Между тем, как уже отмечалось,  $\beta$ -излучение характеризуется сплошным энергетическим спектром, что также было установлено экспериментально. Таким образом, энергия, уносимая  $\beta$ -частицами из ядер, оказывается меньше энергии, испускаемой ядрами при  $\beta$ -распаде. Этот факт не согласуется с законом сохранения энергии. В связи с этим В. Паули высказал в 1931 г. гипотезу о том, что при каждом акте  $\beta$ -распада вместе с частицей из ядра выбрасывается еще одна крайне легкая, незаряженная частица, названная впоследствии *нейтрино* (экспериментально была обнаружена в 1956 г. американскими физиками Ф. Райнесом и К. Коуэном). Нейтрино и  $\beta$ -частица совместно уносят из ядра всегда одно и то же количество энергии. Но в различных актах  $\beta$ -распада эта энергия распределяется между нейтрино и  $\beta$ -частицей по-разному (случайно), чем и объясняется сплошной характер энергетического спектра  $\beta$ -излучения.

3. **Гамма-лучи ( $\gamma$ -излучение)** — электромагнитное излучение с очень короткой длиной волны (менее 0,1 нм), возникающее при радиоактивных превращениях и ядерных реакциях, при торможении заряженных частиц, их распаде и аннигиляции. При столь малых длинах волн волновые свойства  $\gamma$ -излучения проявляются слабее, чем корпускулярные. Гамма-излучение — поток  $\gamma$ -квантов с энергией больше 10 кэВ.

Являясь крайне жестким электромагнитным излучением,  $\gamma$ -лучи не отклоняются электрическим и магнитным полями, распространяются со скоростью света, при прохождении через кристалл обнаруживают дифракцию. Но в отличие от рентгеновских лучей,  $\gamma$ -лучи испускаются атомным ядром (при его переходе из возбужденного состояния в нормальное).

Гамма-лучи являются одним из самых проникающих излучений. Наиболее жесткие  $\gamma$ -лучи проходят через слой свинца толщиной 5 см или через слой воздуха толщиной несколько сотен метров; тело человека они пронизывают насквозь. Ионизирующая способность  $\gamma$ -лучей невелика: в воздухе она имеет порядок 100 пар ионов (в среднем 1 — 2 пары ионов на 1 см «пробега»).

Подчеркнем, что

**радиоактивное излучение испускается атомными ядрами, а не их электронными оболочками.**

Для  $\alpha$ -излучения это очевидно, поскольку электронная оболочка не содержит протонов и нейтронов (образующих  $\alpha$ -частицу);

для  $\beta$ -излучения это следует из того факта, что оно не зависит (не изменяется) от каких бы то ни было воздействий на электронные оболочки радиоактивных атомов. Бета-частицы не входят в состав ядра, но возникают в нем в процессе ядерного распада (благодаря превращению нейтронов в протоны). И  $\alpha$ - и  $\beta$ -распады обычно сопровождаются  $\gamma$ -излучением (но могут и не сопровождаться).

Очевидно, что радиоактивное излучение ведет к превращению атомов излучающего элемента в атомы другого элемента.

При испускании  $\beta$ -частицы заряд ядра увеличивается на единицу, а масса практически не изменяется (ввиду малости массы  $\beta$ -частицы).

Следовательно, по мере  $\beta$ -распада радиоактивный элемент превращается в другой элемент с атомным номером, на единицу большим, и с тем же массовым числом, т. е.

при  $\beta$ -распаде элемент смещается в периодической системе на один номер вправо без изменения массового числа:



Например,  ${}^{210}_{83}\text{Bi} \rightarrow {}^{210}_{84}\text{Po} + {}^0_{-1}e$ .

При испускании  $\alpha$ -частицы заряд ядра уменьшается на две единицы, а массовое число — на четыре единицы, т. е.

при  $\alpha$ -распаде элемент смещается в периодической системе на два номера влево с уменьшением массового числа на четыре единицы:



Например,  ${}^{210}_{84}\text{Po} \rightarrow {}^{206}_{82}\text{Pb} + {}^4_2\text{He}$ .

Правила (16.8) и (16.9), определяющие смещение радиоактивного элемента в периодической системе, называют законами смещения.

**Закон радиоактивного распада.** Радиоактивный распад ведет к постоянному уменьшению числа атомов радиоактивного элемента. Он носит случайный характер в том смысле, что нельзя предсказать, когда и какой именно атом распадается. Можно говорить только о вероятности распада каждого атома за определенный промежуток времени.

Число атомов  $dN$ , распадающихся за время  $dt$ , пропорционально времени и общему числу  $N$  атомов радиоактивного элемента.

$$dN = -\lambda N dt, \quad (16.10)$$

где  $\lambda$  — коэффициент пропорциональности, называемый *постоянной распада* данного элемента. Знак «-» указывает на уменьшение числа атомов радиоактивного элемента со временем.

Из (16.10) следует, что

$$\lambda = -\frac{dN}{Ndt},$$

т. е. постоянная распада равна относительному уменьшению числа атомов данного элемента в единицу времени.

Интегрируя уравнение (16.10) в пределах от  $t = 0$  до  $t$ , получим

$$N = N_0 e^{-\lambda t}, \quad (16.11)$$

где  $N_0$  — число атомов элемента в начальный момент времени;  $N$  — число атомов этого элемента, оставшихся по истечению времени.

Соотношение (16.11) называется *законом радиоактивного распада*. Графическое изображение этого закона представлено на рис. 16.1.

Для характеристики быстроты распада радиоактивного элемента вводится понятие периода полураспада. *Периодом полураспада*  $T_{1/2}$  называется время, в течение которого число атомов исходного элемента уменьшается вдвое. Из (16.11) следует, что

$$e^{-\lambda t} = \frac{1}{2},$$

откуда

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0,693}{\lambda}. \quad (16.12)$$

Величина  $\tau$ , обратно пропорциональная постоянной распада, представляет собой среднее время жизни радиоактивного атома:  $\tau = 1/\lambda$ . Следовательно,  $T_{1/2} = \tau \ln 2$ , откуда  $\tau = T_{1/2}/\ln 2 = 1,44 T_{1/2}$ , т. е. среднее время жизни приблизительно в полтора раза больше периода полураспада.

Значения  $T_{1/2}$ ,  $\tau$  и  $\lambda$  у различных элементов весьма различны. Наряду с такими «долгоживущими» элементами, как уран  ${}_{92}^{238}\text{U}$  ( $T_{1/2} = 4,5 \cdot 10^9$  лет), встречаются и «короткоживущие» элементы, например полоний  ${}_{84}^{210}\text{Po}$  ( $T_{1/2} = 1,5 \cdot 10^{-4}$  с).

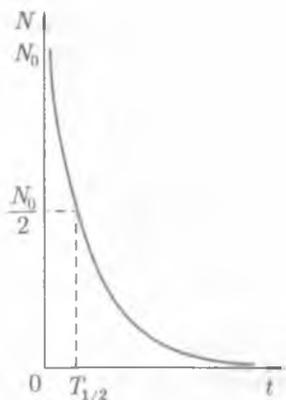


Рис. 16.1

Число атомных распадов, совершающихся в радиоактивном элементе за 1 с, называется **активностью**  $a$  этого элемента:

$$a = \left| \frac{dN}{dt} \right| \quad (16.13)$$

Из формул (16.10), (16.12) и (16.13) следует, что

$$a = \lambda N = \frac{N \ln 2}{T}$$

Таким образом, активность элемента пропорциональна числу атомных распадов и обратно пропорциональна периоду полураспада.

Продукт радиоактивного распада химического элемента тоже может быть радиоактивным. Поэтому процесс радиоактивного распада обычно проходит через ряд промежуточных стадий, образуя цепочку радиоактивных элементов, заканчивающуюся стабильным радиоактивным семейством. В настоящее время известны четыре радиоактивных семейства.

I. Семейство урана-радия: начинается с урана  ${}_{92}^{238}\text{U}$  ( $T_{1/2} = 4,5 \cdot 10^9$  лет) и заканчивается изотопом свинца  ${}_{82}^{206}\text{Pb}$ .

II. Семейство нептуния: начинается с трансуранового элемента нептуния  ${}_{93}^{237}\text{Np}$  ( $T_{1/2} = 2,2 \cdot 10^6$  лет) и заканчивается изотопом висмута  ${}_{83}^{209}\text{Bi}$ .

Следует отметить, что природного нептуния на Земле уже нет, так как он полностью распался. Сейчас нептуний получают посредством искусственных ядерных реакций.

III. Семейство актиния: начинается с актиноурана ( $T_{1/2} = 7,3 \cdot 10^8$  лет) и заканчивается изотопом свинца  ${}_{82}^{207}\text{Pb}$ .

IV. Семейство тория: начинается с тория  ${}_{90}^{232}\text{Th}$  ( $T_{1/2} = 1,4 \cdot 10^{10}$  лет) и заканчивается изотопом свинца  ${}_{82}^{208}\text{Pb}$ .

**Методы наблюдения и регистрации микрочастиц.** При изучении атомных ядер и внутриядерных процессов (как естественных, так и искусственно вызванных) приходится иметь дело с крайне малыми частицами (электронами, протонами,  $\alpha$ -частицами и т. п.). Для наблюдения и регистрации этих частиц используют следующие приборы и методы: ионизационный счетчик, сцинтилляционный счетчик, камеру Вильсона, пузырьковую камеру, метод толстослойных фотографических эмульсий.

1. Принцип действия **ионизационного счетчика** основан на возникновении газового разряда при ионизации газа движущейся микрочастицей.

Наиболее распространенным видом ионизационного счетчика является **счетчик Гейгера — Мюллера**. Изобретен в 1907 г. немецким физиком Гейгером и английским физиком Резерфордом, а усовершенствован в 1928 г. Гейгером и немецким физиком Мюллером. Схема счетчика представлена на рис. 16.2. В стеклянном баллоне 1, наполненном газом под давлением  $10^4$  Па, находится цилиндрический конденсатор 2, внутренним электродом которого служит металлическая нить 3. На конденсатор подано напряжение от батареи 4 через высокоомное (порядка  $10^9$  Ом) сопротивление 5.

Если в конденсатор влетит заряженная микрочастица, то производимая ею ионизация газа вызовет газовый разряд. В цепи конденсатора пройдет кратковременный ток, сопровождающийся падением напряжения на резисторе 5. Это колебание напряжения усиливается обычными радиотехническими способами и затем регистрируется вспышкой сигнальной лампочки или движением стрелки электромеханического счетчика.

Таким образом, счетчик Гейгера — Мюллера регистрирует каждую ионизирующую частицу. Разрешающая способность счетчика (со специальным пересчетным устройством) достигает  $10^4$  частиц в секунду.

2. **Сцинтилляционный счетчик** — прибор для выявления ионизирующих частиц. Состоит из сцинтиллятора, в котором частицы создают вспышки люминесценции, фотоэлектронного умножителя, превращающего вспышки света в импульсы электрического тока, и электронной системы, регистрирующей эти электрические импульсы. Сцинтилляционный счетчик отмечает каждую микрочастицу, падающую на сцинтиллятор. Разрешающая способность сцинтилляционных счетчиков на несколько порядков выше, чем ионизационных счетчиков.

3. **Камера Вильсона** изобретена английским физиком Вильсоном в 1912 г. Она состоит из цилиндра 1, герметически закрытого стеклянной крышкой 2, и поршня 3 (рис. 16.3). При резком опускании поршня воздух, находящийся в рабочем объеме камеры (под поршнем), адиабатически расширяется и охлаждается. Водяной пар, содержащийся в воздухе, становится пересыщенным (пересыщенный пар — пар, имеющий давление больше, чем давление насыщенного пара при той же температуре) и конденсируется на ионах, созданных микрочастицей, влетевшей в камеру через тонкую часть цилиндра. Весь путь частицы оказывается усеянным водяными капельками. Освещая рабочий объем камеры, можно увидеть и сфотографировать этот путь (его принято называть *трек*).

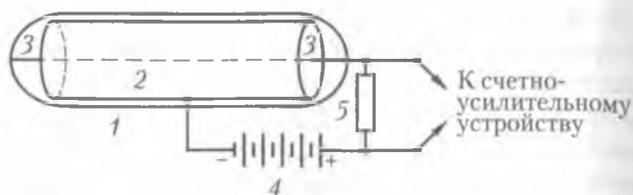


Рис. 16.2

По виду трека можно судить о природе ионизирующей частицы (например, трек электрона тоньше и длиннее трека  $\alpha$ -частицы).

В 1924 г. П. Л. Капица и Д. В. Скобельцын разработали метод исследования микрочастиц посредством камеры Вильсона, помещенной в сильное магнитное поле. В этом случае треки оказываются изогнутыми, так как частица имеет заряд. По радиусу их кривизны можно определить массу, заряд и скорость ионизирующих частиц.

4. **Пузырьковая камера** — прибор для регистрации следов заряженных микрочастиц, действие которого основано на вскипании перегретой жидкости вблизи траектории частицы. Представляет собой сосуд с расширительным устройством, наполненный перегретой жидкостью (перегретой называют жидкость, которая вначале из-за искусственно созданного большого внешнего давления не закипает, а при резком понижении давления в течение небольшого промежутка времени может находиться в неустойчивом состоянии). В качестве жидкости применяются жидкие водород, бензол, фреон, пропан, азот, эфир и др. Изобретена в 1952 г. американским физиком Д. Глезером.

Исследуемая микрочастица, пролетая через камеру, ионизирует молекулы жидкости; одновременно расширительное устройство резко снижает давление в камере. Жидкость закипает, в ней возникают мельчайшие пузырьки пара, в первую очередь на ионах. Поэтому весь путь микрочастицы оказывается усеянным пузырьками, хорошо видимыми благодаря специальному освещению. Это позволяет наблюдать и фотографировать треки.

Так как жидкость является достаточно плотной средой, то движущиеся в ней микрочастицы сильно тормозятся и останавливаются, пройдя сравнительно короткий путь. Поэтому с помощью пузырьковой камеры

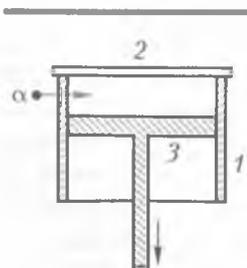


Рис. 16.3

можно исследовать микрочастицы, обладающие очень высокой энергией (камеру Вильсона такая частица пронизала бы насквозь, не дав законченного трека).

5. *Метод толстослойных фотографических эмульсий* основан на том, что заряженная микрочастица, попадая в слой мелкозернистой фотоэмульсии, оставляет в нем скрытый след своего пути. Фотоэмульсия содержит большое количество микроскопических кристаллов бромида серебра  $AgBr$ , которые при прохождении частицы расщепляются на отдельные молекулы. При проявлении в этих кристалликах восстанавливается металлическое серебро, и цепочка зерен серебра в тех местах, через которые пролетела заряженная частица, образует ее трек. По длине и толщине трека можно определить энергию, массу, скорость и заряд частицы.

Метод фотоэмульсий был открыт еще в 1910 г., но получил окончательное развитие и разработку в работах советских физиков Л. В. Мысовского и А. П. Жданова в 1926 — 1929 гг.

Поскольку фотоэмульсию можно экспонировать в течение длительного времени, данный метод оказывается особенно ценным для наблюдения редко встречающихся микрочастиц и исследования редких ядерных процессов.

В заключение подчеркнем, что с помощью рассмотренных методов можно непосредственно наблюдать только заряженные частицы. Нейтральные частицы не производят ионизации атомов вещества (и, следовательно, не дают треков).

### 16.3. Внутрядерные процессы и их проявление

**Ядерные реакции.** Изучение естественной радиоактивности показало, что превращение одного химического элемента в другой обусловлено внутрядерными процессами, т. е. изменениями, происходящими внутри атомных ядер. В связи с этим были предприняты попытки искусственного превращения одних химических элементов в другие путем воздействия на атомные ядра. Эффективной оказалась бомбардировка атомных ядер частицами высокой энергии (от нескольких миллионов до десятков миллиардов электронвольт).

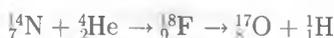
Первоначально в качестве бомбардирующих частиц использовались  $\alpha$ -частицы радиоактивного излучения. В дальнейшем стали применять и другие заряженные частицы, предварительно сообщая им очень большую скорость (кинетическую энергию) в

специальных ускорителях, например циклотронах. Кроме того теперь используются потоки заряженных и нейтральных частиц, создаваемые ядерными реакторами.

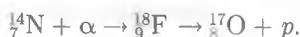
Процесс превращения атомных ядер, обусловленный воздействием на них быстрых элементарных частиц (или ядер других атомов), называется *ядерной реакцией*.

Первая искусственная ядерная реакция была осуществлена в 1919 г. Э. Резерфордом, превратившим атомные ядра азота в ядра изотопа кислорода. В качестве бомбардирующих частиц использовались  $\alpha$ -частицы естественного радиоактивного излучения. Реакция проводилась в камере Вильсона, наполненной азотом. После  $\alpha$ -облучения азота в рабочем объеме камеры появились атомы изотопа кислорода и атомные ядра водорода — протоны (т. е. Резерфорд открыл вторую элементарную частицу; напомним, что первая элементарная частица — электрон — была открыта в 1897 г. Дж. Томсоном).

Данная реакция протекала следующим образом (рис. 16.4):  $\alpha$ -частица попадала в атомное ядро азота  ${}^{14}_7\text{N}$  и поглощалась им. Образующееся при этом промежуточное ядро  ${}^{18}_9\text{X}$  (ядро изотопа фтора  ${}^{18}_9\text{F}$ ) оказывается неустойчивым: оно мгновенно выбрасывает из себя один протон, превращаясь в атомное ядро изотопа кислорода  ${}^{17}_8\text{O}$ . Эту реакцию можно записать так:



или



В настоящее время пользуются еще более сокращенным способом записи ядерных реакций. После символа ядра-мишени указывают в скобках бомбардирующую частицу и все другие частицы, появляющиеся в результате реакции; за скобкой ставят символ ядра-продукта (атомный номер элемента обычно не пишут). Этот способ записи выглядит так:

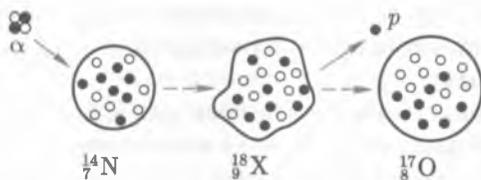
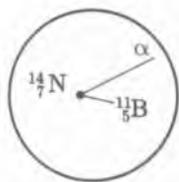
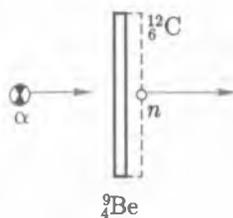


Рис. 16.4



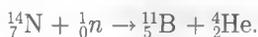
Камера Вильсона

Рис. 16.5

Рассмотрим еще одну ядерную реакцию, проведенную в 1932 г. английским физиком Дж. Чедвиком, в результате которой был впервые обнаружен *нейтрон* (третья элементарная частица). При бомбардировке бериллиевой пластинки (рис. 16.5) ядро бериллия захватывает  $\alpha$ -частицу и, испуская нейтрон  $n$ , превращается в ядро углерода  ${}^6_{12}\text{C}$ :



Нейтроны, вылетающие из бериллия, направляются в камеру Вильсона, наполненную азотом. При попадании нейтрона в ядро азота  ${}^7_{14}\text{N}$  образуются ядро бора  ${}^5_{11}\text{B}$  и  $\alpha$ -частица:



Сам нейтрон не дает треков в камере (см. рис. 16.5), но по трекам ядра бора и  $\alpha$ -частицы можно рассчитать, что данная реакция вызвана нейтральной частицей массой 1 а.е.м., т.е. нейтроном.

Отметим, что свободный нейтрон существует недолго. Он либо вступает в ядерную реакцию с каким-нибудь атомным ядром, либо превращается в протон, испуская  $\beta$ -частицу и нейтрино:  $n(\beta, \gamma)p$ . Следовательно, нейтрон радиоактивен. Согласно экспериментальным данным, его период полураспада составляет 11,7 мин.

**Искусственная радиоактивность.** Все ядерные реакции сопровождаются испусканием тех или иных элементарных частиц (в том числе и  $\gamma$ -фотонов). Продукты многих ядерных реакций оказываются радиоактивными; их называют *искусственно радиоактивными изотопами*. Явление искусственной радиоактивности было открыто в 1934 г. известными французскими физиками Фредериком и Ирен Жолио-Кюри.

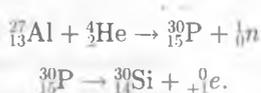
Примером получения радиоактивных изотопов может служить реакция захвата нейтрона фосфором  ${}^{15}_{31}\text{P}$ . При этом захвате испускается  $\gamma$ -фотон и образуется радиоактивный изотоп фосфора  ${}^{15}_{32}\text{P}$ :



Период полураспада изотопа фосфора  $T_{1/2} = 14,3$  сут; распад ядра изотопа, сопровождающийся испусканием  $\beta$ -частицы, ведет к образованию стабильного изотопа серы  ${}_{16}^{32}\text{S}$ :



Как и естественно радиоактивным веществам, искусственно радиоактивным изотопам свойственны  $\alpha$ -,  $\beta$ - и  $\gamma$ -распады. Однако имеются и такие искусственно радиоактивные изотопы, которые обладают *позитронным распадом*, т. е. испускают позитроны. Примером образования позитронно-радиоактивного изотопа может служить реакция бомбардировки алюминия  $\alpha$ -частицами, открытая Ф. и И. Жолио-Кюри. В данном случае ядро алюминия  ${}_{13}^{27}\text{Al}$  испускает нейтрон и превращается в ядро радиоактивного фосфора  ${}_{15}^{30}\text{P}$ , период полураспада которого  $T_{1/2} = 2,5$  мин. Этот изотоп, испуская позитрон  ${}_{+1}^0e$ , превращается в стабильный изотоп кремния  ${}_{14}^{30}\text{Si}$ . Реакция идет по схеме



В промышленном масштабе искусственные изотопы получают путем облучения (главным образом, нейтронного) соответствующих химических элементов в ядерном реакторе.

В настоящее время получено по несколько изотопов для каждого химического элемента; их общее число превышает 1 500.

**Деление тяжелых ядер.** В рассмотренных выше ядерных реакциях исходное ядро захватывает летящую на него частицу и превращается в ядро соседнего элемента или в ядро собственного изотопа.

В 1938—1939 гг. в результате работ ряда ученых (О. Гана и Ф. Штрассмана в Германии, Э. Ферми в Италии, Ф. и И. Жолио-Кюри во Франции и др.) была открыта реакция нового типа — реакция деления ядер урана, обстреливаемых нейтронами.

Для объяснения механизма деления тяжелых ядер Н. Бор представил ядро в виде положительно заряженной капли жидкости (капельная модель ядра). В обычных условиях тяжелое ядро имеет более или менее сферическую форму (рис. 16.6). При захвате нейтрона таким ядром в результате сильного возбуждения происходит деформация ядра, образуется перетяжка, аналогичная перетяжке между двумя частями раздваивающейся капли жидкости. Ядерные силы, действующие в узкой перетяжке, уже не могут противостоять значительной кулоновской силе отталкивания од-

только заряженных частей ядра. Перетяжка разрывается, и ядро распадается на два «осколка», разлетающихся с огромными скоростями в противоположные стороны. Кроме того, в момент деления из ядра выбрасывается 2—3 нейтрона, называемых *мгновенными*.

Энергетический спектр мгновенных нейтронов простирается от очень малых энергий (порядка 1 эВ и менее, соответствующих тепловому движению электронов при нормальной температуре) примерно до 10 МэВ. Большинство мгновенных электронов имеет энергию 1...2 МэВ. Нейтроны, обладающие энергией, большей 45 МэВ, называются *быстрыми*, нейтроны меньшей энергии — *медленными* (нейтроны с очень малыми энергиями носят название *тепловых*).

Осколки разделившегося ядра являются радиоактивными: они испускают  $\gamma$ -фотоны,  $\beta$ -частицы и нейтроны; эти нейтроны в отличие от мгновенных называются *запаздывающими* (выбрасываются в течение нескольких минут после акта деления). Число запаздывающих нейтронов составляет около 1% всех нейтронов, образующихся при делении.

Способностью деления на две части под действием нейтронов обладают ядра всех тяжелых элементов. Наиболее важными в практическом отношении делящимися материалами являются уран  ${}_{92}^{238}\text{U}$ , актиноуран  ${}_{92}^{235}\text{U}$ , искусственный изотоп урана  ${}_{92}^{233}\text{U}$  и плутоний  ${}_{94}^{239}\text{Pu}$ . Ядра  ${}_{92}^{235}\text{U}$ ,  ${}_{92}^{239}\text{U}$  и  ${}_{92}^{233}\text{U}$  делятся под действием как быстрых, так и медленных (в том числе и тепловых) нейтронов, а ядра  ${}_{92}^{238}\text{U}$  — только под действием быстрых нейтронов. Надо иметь в виду, что ядра, состоящие из нечетного числа нейтронов, делятся под действием нейтронов любой энергии, а ядра, состоящие из четного числа нейтронов, делятся только под действием быстрых нейтронов.

Медленные нейтроны поглощаются ураном-238, не вызывая деления.

Продукты деления тяжелых ядер разнообразны: их массовые числа лежат в пределах 70 до 160. Однако чаще всего массы осколков данного ядра относятся как 2:3. Примером такого деления

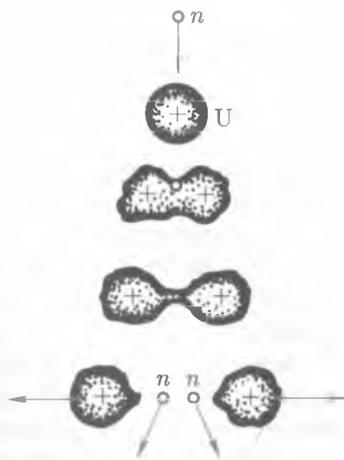


Рис. 16.6

может служить распад актиноурана на изотопы криптона и бария с испусканием трех нейтронов:



**Цепная реакция.** Наряду с делением под действием нейтронов имеет место самопроизвольное деление тяжелых ядер, правда, в очень незначительной мере, например, в 1 г урана происходит всего около 20 самопроизвольных распадов в час. Это явление было открыто советскими физиками К. А. Петржаком и Г. Н. Флеровым.

Энергия, освобождающаяся при делении тяжелого ядра, составляет около 200 МэВ, причем около 80 % выделяется в виде кинетической энергии осколков, остальные 20% приходятся на энергию радиоактивного излучения осколков и кинетическую энергию мгновенных нейтронов.

Если учесть, что энергия нейтрона, вызывающего деление ядра (т. е. затрачиваемая энергия), не превышает 7...10 МэВ, а обычно бывает значительно меньшей, то окажется, что ядерно делящиеся материалы могут служить источником колоссальных энергий. Например, энергия, освобождающаяся при делении всех ядер, содержащихся в 1 кг урана-235, равна примерно  $2,3 \cdot 10^7$  кВт·ч.

Следует, однако, иметь в виду, что для выделения больших количеств ядерной энергии необходимо, чтобы делению подвергалась значительная часть ядер, содержащихся в массе «ядерного горючего». Поэтому реакция деления должна быть *саморазвивающейся*, или *цепной*: при каждом акте деления должны появляться новые нейтроны, из которых хотя бы один вызывает следующий акт деления.

Наиболее просто цепная реакция осуществляется в веществе, ядра которого делятся под действием медленных нейтронов, например в уране-235. В самом деле, достаточно какому-нибудь случайному («блуждающему») нейтрону попасть в одно из ядер урана-235, как произойдет деление данного ядра (рис. 16.7). Возникающие при этом 2—3 мгновенных нейтрона попадут в 2—3 других ядра урана, вызвав их деление. В результате появятся 4...9 мгновенных нейтронов, способных вызвать деление следующих 4...9 ядер и т. д.

Несмотря на то что при делении каждого ядра урана возникает 2—3 нейтрона, не все они вызывают деление других ядер: часть нейтронов может быть захвачена ядрами неделящихся (или трудно делящихся) примесей, присутствующих в ядерном горючем, часть нейтронов может вылететь через поверхность горюче-

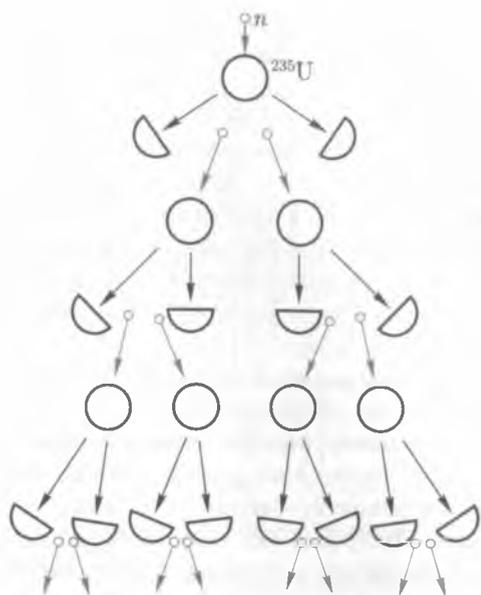


Рис. 16.7

го материала, не успев столкнуться с его ядрами. Существуют и другие причины, уменьшающие число нейтронов, активно участвующих в цепной реакции.

Развитие цепной реакции характеризуется так называемым *коэффициентом размножения нейтронов*  $K$ , который измеряется отношением числа  $N_i$  нейтронов, вызывающих деление ядер вещества на одном из этапов реакции, к числу  $N_{i-1}$  нейтронов, вызвавших деление на предыдущем этапе реакции:

$$K = N_i / N_{i-1}.$$

Например, цепной реакции, изображенной на рис. 16.7, соответствует коэффициент размножения нейтронов  $K = 4/2 = 8/4 = 2$ .

Коэффициент размножения зависит от ряда факторов, в частности от природы и количества делящегося вещества и от геометрической формы занимаемого им объема. Одно и то же количество данного вещества имеет наибольшее значение коэффициента  $K$  при шарообразной форме, поскольку в этом случае поверхность будет наименьшей (шар имеет минимальную поверхность при данном объеме).

При  $K = 1$  цепная реакция протекает стационарно, при  $K < 1$  цепная реакция невозможна. Если коэффициент размножения нейтронов незначительно превышает 1, то скорость реакции быстро увеличивается, и при  $K \geq 1,1$  возможен взрыв.

Коэффициент размножения нейтронов определяется массой расщепляющегося вещества — ядерного горючего. Если масса ядерного горючего мала, то вторичные нейтроны в основном вылетают в окружающую среду, коэффициент размножения нейтронов  $K < 1$  и цепная реакция не происходит. Если же масса расщепляющихся материалов велика,  $K \geq 1$  и происходит ядерный взрыв.

Минимальную массу делящегося вещества, при которой  $K \geq 1$ , называют *критической массой*.

Например, для актиноурана  ${}_{92}^{235}\text{U}$ , взятого в растворе, критическая масса составляет около 1 кг; для химически чистого урана  ${}_{92}^{235}\text{U}$  критическая масса равна примерно 10...20 кг.

**Ядерный взрыв.** Впервые цепную реакцию деления ядер урана (при  $K > 1$ ) применили в атомной бомбе. Внутри бомбы заложена масса делящегося вещества (например, урана-235), превышающая критическую, но разделенная на две (и более) части, каждая из которых меньше критической. Бомба взрывается после того, как эти части быстро сближаются и объединяются посредством взрыва обычного взрывчатого вещества.

В зоне взрыва атомной бомбы температура повышается до десятков миллионов градусов, а давление достигает сотен миллиардов паскалей. Взрыв сопровождается интенсивным испусканием  $\gamma$ -фотонов и нейтронов. Кроме того, местность в окрестностях взрыва заражается радиоактивными продуктами деления ядер (ядерными осколками). В дальнейшем это заражение распространяется на огромные территории (посредством воздушных и водных течений).

**Управляемая цепная реакция.** Для промышленного получения ядерной энергии необходимо, чтобы цепная реакция была регулируемой, т. е. протекала с постоянной интенсивностью. Это возможно, как известно, при условии  $K = 1$ . Это осуществляется путем введения в массу ядерного горючего подвижных управляющих стержней, содержащих кадмий или бор, которые являются сильными поглотителями нейтронов.

Вначале управляющие стержни выдвигаются из котла с ядерным горючим и цепная реакция протекает при  $K > 1$ . Затем, когда нейтроны размножатся в достаточном количестве, управляющие стержни вдвигаются в котел и, поглощая часть нейтро-

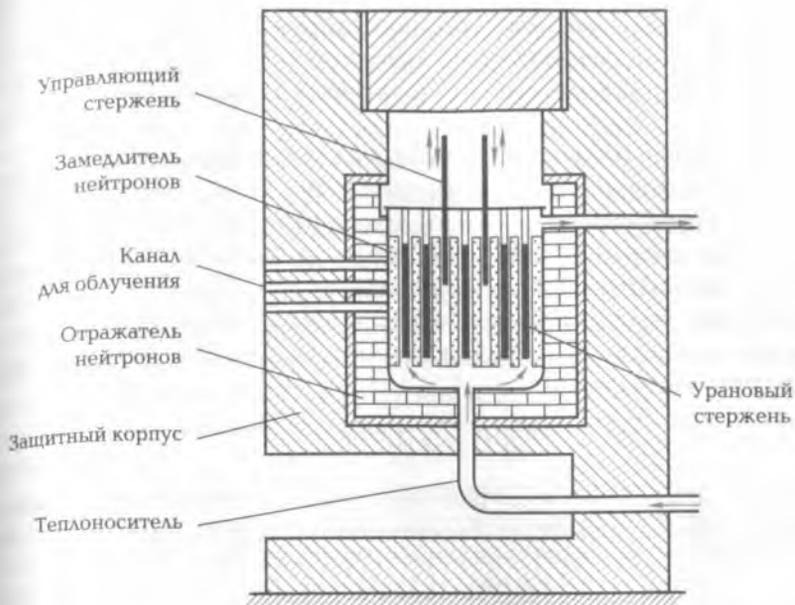


Рис. 16.8

нов, замедляют цепную реакцию. Глубина погружения стержней автоматически регулируется так, чтобы  $K = 1$ . При этом реакция стабилизируется: число нейтронов, образующихся в единицу времени, остается постоянным.

Установку, в которой происходит управляемая цепная реакция ядер, называют **ядерным (или атомным) реактором**.

Первый атомный реактор был построен под руководством Э. Ферми в Чикагском университете в 1942 г.

На рис 16.8 изображена схема ядерного реактора, работающего на природном уране, предварительно обогащенном ураном-235 до 5% (природный уран состоит из, % по массе:  ${}_{92}^{238}\text{U}$  — 99,3 и  ${}_{92}^{235}\text{U}$  — 0,7). Уран вводится в реактор в виде стержней.

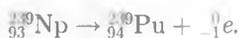
Цепная реакция ведется на медленных (тепловых) нейтронах, которые хорошо поглощаются ядрами урана-235, вызывая их деление. Для этого пространство между урановыми стержнями заполняется замедлителем нейтронов, обычно графитом. Осколки урановых ядер, образующиеся в процессе цепной реакции, затормаживаются замедлителем, отдавая ему свою кинетическую энергию. Из-за этого температура в активной зоне реактора повышается до 800...900 К. Посредством теплоносителя (тяжелой воды

или расплавленного металла, циркулирующего по трубам) полученная теплота отводится из активной зоны реактора и превращается сначала в механическую, а затем и в электрическую энергию.

Вместе с выделением энергии в ядерном реакторе происходит также образование нового ядерного горючего — плутония  ${}_{94}^{239}\text{Pu}$ , который постепенно накапливается в реакторе и может служить хорошим ядерным топливом: его ядра делятся под действием медленных нейтронов подобно ядрам урана-235. Реакция его образования такова: ядро урана  ${}_{92}^{238}\text{U}$ , поглотив медленный нейтрон, превращается в ядро радиоактивного изотопа  ${}_{92}^{239}\text{U}$  ( $T_{1/2} = 23$  мин) и испускает  $\gamma$ -фотон:



В свою очередь, ядро изотопа превращается в ядро радиоактивного трансуранового элемента нептуния  ${}_{93}^{239}\text{Np}$  ( $T_{1/2} = 2,3$  сут):



Период полураспада  ${}_{94}^{239}\text{Pu}$   $T_{1/2} = 24\,100$  лет, поэтому его можно накапливать в больших количествах.

Ядерный реактор является мощным источником нейтронных потоков и радиоактивных излучений, используемых для изготовления искусственных радиоактивных изотопов. Вещества, которые надо подвергнуть облучению, помещают в специальные каналы, проделанные в защитном корпусе реактора.

**Термоядерные реакции. Энергия звезд.** С давних пор ученые задавали вопрос: каким образом Солнце, не будучи ни очень большой, ни очень горячей звездой, ежесекундно с теплотой и светом излучает энергию порядка  $4 \cdot 10^{26}$  Дж. Все человечество на Земле потребляет за год меньшую энергию, чем Солнце испускает за одну миллионную долю секунды! И с неослабевающей силой оно светит уже по крайней мере  $4 \cdot 10^9$  лет. Простой расчет показывает, что никакое химическое горючее не может быть источником его энергии. Каков же источник энергии Солнца и других звезд?

Звезды, в том числе и Солнце, являются огромными скоплениями расплавленного газа, состоящего в основном из двух элементов: водорода и гелия. Внутренняя температура звезд достигает  $(15 \dots 30) \cdot 10^6$  К. При такой температуре все атомы полностью ионизированы, т. е. при этих условиях звездное вещество из газа превращается в смесь свободных быстродвижущихся электронов

и атомных ядер. В отличие от обычных газов, состоящих из нейтральных атомов и молекул, частицы плазмы обладают зарядами, поскольку электронные и атомные ядра имеют соответствующие заряды. В твердом, жидком или газообразном состоянии одноименно заряженные электронные оболочки атомов препятствуют сближению атомных ядер. В плазме ядра лишены электронных оболочек, но из-за взаимодействия собственных зарядов они отталкиваются друг от друга. Лишь при температуре в сотни миллионов градусов Кельвина кинетическая энергия теплового движения ядер атомов водорода (протонов) оказывается достаточной для преодоления кулоновского отталкивания между ними и сближения до расстояния  $10^{-6}$  нм. На таких расстояниях преобладают уже ядерные силы притяжения и может осуществляться ядерная реакция синтеза.

Ядерные реакции, протекающие в высокотемпературной плазме при сближении быстродвижущихся атомных ядер, преодолевших взаимное кулоновское отталкивание, называют *термоядерными реакциями*.

Термоядерные реакции являются источниками энергии Солнца и звезд. Как известно, температура центральной части Солнца, достигает примерно  $15 \cdot 10^6$  К. При такой температуре некоторые протоны имеют энергию, которая достаточна для взаимного сближения и вступления в ядерные взаимодействия. Наиболее вероятной цепной реакцией, осуществляющейся в недрах Солнца, является следующая:



где  ${}^2_1D$  — дейтерий — ядро изотопа водорода, или тяжелый водород.

Эту цепочку термоядерных превращений, в результате которой четыре ядра водорода ( ${}^1_1p = {}^1_1H$ ) превращаются в одно ядро гелия  ${}^3_2He$ , называют *протон-протонным циклом*. При синтезе 1 г водорода в гелий выделяется около 630 ГДж энергии.

В результате исследований астрофизики пришли к выводу, что существует еще один тип реакций ядерного синтеза, называемый *углеродным циклом*. При этой реакции необходимо присутствие ядер углерода, действующих в качестве катализатора. Однако обе эти реакции в конечном счете потребляют лишь ядра водорода (т.е. здесь используется только один элемент, в изобилии пред-

ставленный в недрах звезд) и образуют ядра гелия ( $\alpha$ -частицы), причем оба этих процесса требуют для своего осуществления различных температур.

Теоретические исследования показывают, что для большинства светил углеродный цикл является основным источником энергии, если их внутренняя температура превышает  $20 \cdot 10^6$  К. В звездах, внутренняя температура которых около  $16 \cdot 10^6$  К, оба цикла в равной мере являются источником энергии. Для звезд с внутренней температурой  $13 \cdot 10^6$  К основной источник энергии — протон-протонный цикл.

С помощью этого механизма Солнце каждую секунду превращает  $5,64 \cdot 10^{11}$  кг содержащегося в нем водорода в  $5,60 \cdot 10^{11}$  кг гелия. Это означает, что ежесекундно  $4 \cdot 10^9$  кг солнечного вещества превращается в излучение. При таком расходе вещества солнечной энергии должно хватить на  $5 \cdot 10^9$  лет.

Когда астрофизики убедились в том, что энергия звезд — результат термоядерного синтеза, возникла проблема создания «кусочка Солнца» на Земле, т. е. создания термоядерного реактора, в котором могла бы регулироваться реакция соединения ядер атомов легких элементов (водорода и гелия) с последующим выделением энергии.

Наиболее реально такой термоядерный синтез гелия можно осуществить на базе слияния атомов тяжелого изотопа водорода — дейтерия — по схеме



где  ${}^2_1\text{H}$  и  ${}^3_1\text{H}$  — изотопы водорода: дейтерий и тритий.

Естественно, что эти термоядерные реакции в искусственных условиях должны протекать при очень высоких температурах, превышающих в десятки раз даже температуру внутри Солнца, поскольку в термоядерном реакторе невозможно создать условия, аналогичные условиям в недрах Солнца. Само собой разумеется, что создание таких температур — весьма трудоемкое дело.

Возникает и другая техническая трудность — удержание плазмы в определенном объеме (камере), поскольку даже кратковременное соприкосновение высокотемпературной плазмы со стенкой камеры приведет к мгновенному испарению камеры, из какого бы материала она ни была изготовлена. Эту трудность отечественные физики успешно преодолели. Они предложили использовать для изоляции плазмы от стенок с целью ее удержания

Сильные магнитные поля. Дело в том, что магнитное поле, линии индукции которого направлены вдоль стенок камеры, препятствует соприкосновению плазмы со стенками камеры. Заряженные частицы, из которых состоит плазма (электроны, атомные ядра), не испытывают влияния магнитного поля при движении вдоль его линий индукции, а на частицы, движущиеся поперек линий индукции, действует сила Лоренца, направленная перпендикулярно векторам скорости движения частицы и индукции магнитного поля. При достаточно большой индукции магнитного поля траектория движения частицы превращается в винтовую линию, навивающуюся на линии индукции, и частица не может достигнуть стенок камеры.

Следующая трудность — время удержания плазмы. Расчеты показывают, что для осуществления самоподдерживающейся термоядерной реакции необходимо получить, например, в объеме 20 л плазму плотностью  $10^{15}$  част./см<sup>3</sup> с температурой более  $10^8$  К и временем удержания около 1 с.

В настоящее время на термоядерной установке «Токамак-10» в Институте атомной энергии им. И. В. Курчатова получена плазма с температурой около  $10^6$  К и временем ее удержания всего несколько десятков миллисекунд (80 мс).

Для успешного и окончательного решения проблемы управления термоядерными реакциями необходимо определенное время (возможно, еще не один десяток лет). Зато в результате овладения энергией термоядерного синтеза человечество получит в свое распоряжение неисчерпаемый источник энергии, поскольку общие запасы дейтерия в морях и океанах Земли составляют примерно  $5 \cdot 10^{13}$  т, а это значит, что человечество будет обеспечено энергией на сотни миллионов лет.

## 16.4. Физика элементарных частиц

**Космические лучи и открытие элементарных частиц.** Космические лучи — поток заряженных частиц высокой энергии (до  $10^{20}$  эВ), приходящих к Земле из космического пространства. Открыты австрийским физиком В. Гэссом в 1912 г. По месту происхождения космические лучи разделяют на метагалактические (внегалактические), галактические и солнечные. Источники космических лучей: квазары, ядра галактик, сверхновые звезды, пульсары, межзвездная среда, вспышки на звездах и Солнце.

Столкновение этих заряженных частиц с ядрами атомов, входящих в состав воздуха, приводит к образованию новых ядер и различных элементарных частиц; их поток носит название вторичных космических лучей. Первичные космические лучи в значительной мере поглощаются атмосферой, поэтому земной поверхности достигают главным образом порожденные ими вторичные космические лучи. Происхождение этих лучей до конца не выяснено; существует лишь ряд гипотез, среди которых наиболее приемлемой считается гипотеза известных отечественных ученых В. А. Гинзбурга и И. С. Шкловского о генерации космических лучей при вспышках сверхновых звезд.

Исследования показали, что *космическое излучение* поступает на Землю изотропно из всего космического пространства, о чем свидетельствует практическая независимость интенсивности ионизации воздуха космическими лучами от суточного вращения Земли.

Интенсивность космических лучей имеет максимум на высоте около 20 км над уровнем моря (благодаря образованию вторичных космических лучей). С уменьшением высоты интенсивность уменьшается (за счет поглощения лучей атмосферой), достигая на уровне моря минимального значения (здесь лучами создается в среднем 1,8 пары ионов в 1 см воздуха за 1 с).

Средняя энергия частиц первичного космического излучения (на верхней границе атмосферы) составляет около  $10^4$  МэВ, отдельные частицы обладают энергией порядка  $10^{14}$  МэВ. Следовательно, космические лучи являются источником частиц сверхвысоких энергий, еще не достигнутых в лабораторных условиях (в ускорителях). При взаимодействии таких частиц с веществом происходят принципиально новые ядерные реакции, изучение которых углубляет наши знания о свойствах ядер и элементарных частиц. Уместно отметить, что большинство элементарных частиц было впервые обнаружено в космических лучах. Приведем конкретные примеры.

В 1958 г. во время первых полетов *искусственных спутников* Земли и космических ракет были обнаружены околосемные радиационные поля. Они представляют собой три пространственно разделенные зоны вокруг Земли с резко повышенной концентрацией ионизированного излучения. Существование *поясов радиации* обусловлено захватом и удержанием заряженных космических частиц магнитным полем Земли. Поэтому образование поясов радиации должно быть характерным для всех небесных тел, имеющих магнитное поле.

При исследовании космических лучей было сделано много принципиально важных открытий. Так, в 1932 г. К.Андерсоном был открыт в космических лучах позитрон, в 1937 г. Андерсоном и Нидермайером были открыты  $\mu$ -мезоны и указан тип их распада. В 1947 г. С.Пауэлл открыл  $\pi$ -мезоны. В 1955 г. в космических лучах были обнаружены К-мезоны, а также тяжелые нейтральные частицы с массой, превышающей массу протона, — гипероны. Исследования космических лучей привели к необходимости введения квантовой характеристики, названной *странностью* (странность — квантовое число  $S$ , характеризующее свойства элементарных частиц по отношению к сильному взаимодействию и электромагнитному взаимодействию).

**Элементарные частицы, их классификация, основные характеристики.** Введение понятия «элементарные частицы» в физике связано с идеей отыскания таких неделимых далее частиц, из которых состоит вся материя. Неделимость вначале приписывалась атомам, потом ядрам, затем нуклонам. Однако обнаружение внутренней структуры у этих и многих других вновь открываемых частиц, а также невозможность найти среди них те «первокирпичики», из которых состоят все остальные частицы, с течением времени придал термину «элементарные частицы» совершенно иной смысл.

*Элементарными* называются частицы, которым на современном уровне знаний нельзя приписывать определенную внутреннюю структуру, т. е. нельзя их представить состоящими из каких-либо других частиц.

В настоящее время истинно элементарными, т. е. такими, которые нельзя составить ни из каких других известных сегодня частиц, являются электрон, позитрон,  $\tau$ - и  $\mu$ -мезоны, все виды нейтрино, фотоны и кварки. Все эти частицы не участвуют в сильном взаимодействии, их поведение определяется электромагнитным и слабым взаимодействиями.

Элементарные частицы характеризуют массой покоя, электрическим зарядом, средним временем жизни и некоторыми другими величинами, которых мы не будем касаться.

По массе покоя все элементарные частицы условно разделяют на четыре группы (класса): *фотоны* — масса покоя их равна нулю ( $m_0 = 0$ ); *лептоны* (от греч. *лептос* — легкий) —  $0 < M_0 \leq m_e$ ; *мезоны* (от греч. *мезос* — средний) —  $m_e < M_0 < m_p$ ; *барионы* (от греч. *барис* — тяжелый) —  $m_p \leq M_0 < m_D$ .

Массу покоя элементарных частиц обычно сравнивают с массой электрона, а если масса покоя равна нулю, то это значит, что частица движется со скоростью света (фотон, нейтрино).

Электрический заряд элементарных частиц выражают в единицах элементарного заряда, и для большинства частиц он равен  $+e$  или  $-e$  ( $e = 1,602 \cdot 10^{-19}$  Кл).

Среднее время жизни элементарных частиц колеблется в широких пределах. Одни частицы могут существовать сколь угодно долго (к ним относятся электрон, протон и нейтрино), и поэтому их называют *стабильными*, а остальные — *нестабильные* — спустя некоторый промежуток времени самопроизвольно распадаются на другие элементарные частицы. Наиболее короткоживущими являются *резонансы* — частицы, возникающие при различных взаимодействиях элементарных частиц; время их жизни порядка  $10^{-23} \dots 10^{-22}$  с (в настоящее время известно более 300 резонансов).

Охарактеризуем кратко свойства частиц четырех выделенных групп.

*Фотоны* представляют собой «частицы» электромагнитного поля (свет,  $\gamma$ -излучение и др.). Их масса покоя и заряд равны нулю. Это стабильные частицы, у них нет соответствующих античастиц.

*Лептоны* (электрон, позитрон, нейтрино) стабильны. Все они, за исключением нейтрино, способны к электромагнитным взаимодействиям. Их элементарные заряды равны  $-e$  (у электрона) и  $+e$  (у позитрона). Нейтрино нейтрально, но обладает гигантской проникающей способностью, имея небольшую массу покоя. Одна такая частица может, ни с чем не взаимодействуя, пройти сквозь земной шар. Тем не менее удается зафиксировать отдельные взаимодействия нейтрино с атомами вещества. Хотя вероятность этого мала, но все же она существует, например, вблизи атомных реакторов, которые излучают очень интенсивные нейтринные потоки.

*Мезоны* — нестабильные частицы. Их масса значительно меньше массы нуклонов, но более чем в 200 раз превышает массу электронов. По этой причине их назвали промежуточными частицами;  $\pi$ -мезоны участвуют в обменных ядерных взаимодействиях, связывая нуклоны в ядре.

*Барионы* — это класс тяжелых частиц. Сюда относятся нуклоны (протоны и нейтроны) и гипероны. Протон стабилен, имеет положительный заряд  $+e$ ; нейтрон не имеет заряда, его время жизни 702 с; гипероны — короткоживущие частицы ( $\approx 10^{-10}$  с). Одни из них заряжены положительно (или отрицательно), другие не имеют заряда.

Отметим основные свойства элементарных частиц.

1. В основном только из трех элементарных частиц (электрон, протон и нейтрон) построены атомы и, в конечном счете, весь окружающий нас вещественный мир.

2. Заряд электронной частицы, выраженный в элементарных зарядах, равен либо +1, либо -1, либо 0; двух- и многозарядных частиц не существует.

3. Большинство элементарных частиц неустойчиво и имеет крайне малое время жизни.

4. Почти каждой частице соответствует так называемая *античастица*.

Частица и античастица имеют одинаковую массу и величину электрического заряда, но различаются знаком заряда (а при отсутствии заряда — направлением какой-либо из не рассматривавшихся нами характеристик, например направлением магнитного момента). Примерами частицы и античастицы являются электрон и позитрон (антиэлектрон), протон и антипротон, мю-плюс-мезон и мю-минус-мезон и т. п.

При столкновении частицы с античастицей обе они перестают существовать как таковые, превращаясь в другие элементарные частицы. Этот процесс носит название *аннигиляции пар* (от лат. *annihilatio* — уничтожение). Примерами аннигиляции пар могут служить превращение электрона и позитрона в фотон ( ${}_{-1}^0e + {}_{+1}^0e \rightarrow 2\gamma$ ) и превращение протона в пи-ноль-мезоны ( ${}_{+1}^1p + {}_{-1}^1\bar{p} \rightarrow 2\pi^0$ ). Выяснено, что вообще все заряженные элементарные частицы могут аннигилировать со своими античастицами, образуя фотоны.

Наблюдаются также процессы, обратные аннигиляции, в результате которых возникают частицы и соответствующие им античастицы. Этот процесс называется *образованием пар*. Примером образования пар может служить превращение фотона в электрон и позитрон.

В настоящее время экспериментально обнаружено множество процессов (помимо аннигиляции и образования пар), при которых одни элементарные частицы превращаются в другие. Приведем конкретные примеры.

**Пример 1.** Самопроизвольное превращение свободного нейтрона в протон с испусканием электрона и антинейтрино:



**Пример 2.** Превращение протона, находящегося в атомном ядре, в нейтрон с испусканием позитрона и нейтрино:



Следует подчеркнуть, что при всех взаимопревращениях элементарных частиц строго соблюдаются основные законы сохранения: массы, энергии, импульса движения, электрического заряда и закон пропорциональности массы и энергии.

Способность к взаимным превращениям является фундаментальным свойством элементарных частиц.

**Понятие о кварках.** Частиц, называемых элементарными, стало так много, что возникли серьезные сомнения в их элементарности. В 1964 г. американский физик М. Гелл-Манн и независимо от него швейцарский физик Дж. Цвейг выдвинули гипотезу, согласно которой все *адроны* (т. е. мезоны и барионы) построены из трех частиц, получивших название *кварков*. Название «кварк» заимствовано М. Гелл-Манном из фантастического романа Дж. Джойса «Поминки по Финнегану». В романе есть песня, начинающаяся словами «*three quarks*», что означает «три карканья», «три кваканья», «три пустяка». Дж. Цвейг назвал кварки тузами, но это название не прижилось. Характерной особенностью кварков, не встречающейся у других частиц, является дробный электрический заряд, кратный  $\frac{1}{3}$  элементарного. В настоящее время известно шесть типов кварков: *верхний* — *u* (англ. *up*), *нижний* — *d* (англ. *down*), *странный* — *s* (англ. *strange*), *очарованный* — *c* (англ. *charm*), *красивый* — *b* (англ. *beauty*), *истинный* — *t* (англ. *truth*). При этом каждому кварку соответствует свой антикварк.

Вначале, при формулировке кварковой модели адронов, кварки рассматривались как чисто математические структурные элементы, открывающие возможность очень удобного описания адронов. В дальнейшем, однако, были поставлены эксперименты по рассеянию электронов высоких энергий нуклонами, которые выявили наличие внутри нуклона точечных заряженных образований; их естественно было отождествить с кварками. В свободном состоянии кварки до настоящего времени не наблюдались, и есть теоретические соображения, которые указывают на невозможность таких состояний для кварков. Ряд экспериментальных данных указывает на реальное существование кварков. Вместе с тем все попытки наблюдать кварки в свободном состоянии оказались безуспешными. Следовательно, кварки могут существовать только внутри адронов и в принципе не могут наблюдаться в свободном состоянии.

В настоящее время физика элементарных частиц накопила достаточно данных, позволяющих как предсказать существование

все новых частиц, так и теоретически обосновать процессы, происходящие в мире элементарных частиц. Работы в этой области позволяют надеяться на достижение успехов в создании единой теории взаимодействия.



## ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ВЫВОДЫ

1. Атомные ядра состоят из протонов и нейтронов, которые близки по массе и называются общим термином «нуклоны». Протон наделен положительным зарядом, по модулю равным заряду электрона. Нейтрон — электрически нейтральная частица.

В 1932 г. английским физиком Дж. Чедвиком был открыт нейтрон (его заряд равен нулю, а масса приблизительно равна массе протона), после чего немецкий физик В. Гейзенберг и независимо от него советский физик Д. Д. Иваненко предложили протонно-нейтронную модель атомного ядра. Согласно этой модели, ядро состоит из протонов и нейтронов. Массовое число ядра  $A$  равно сумме чисел протонов  $Z$  и нейтронов  $N$ :  $A = Z + N$ .

2. Общее число нуклонов в ядре называется *массовым числом*  $A$ , а число протонов — *зарядовым числом*  $Z$ . По отношению к символу элемента массовое число пишут в виде верхнего индекса, а зарядовое — в виде нижнего индекса слева; например, ядро углерода содержит 6 протонов и 6 нейтронов, что обозначают так:  ${}^{12}_6\text{C}$ .

3. Число протонов в ядре указывает порядковый номер элемента в периодической таблице Д. И. Менделеева.

4. Атомы, ядра которых содержат одинаковое число протонов, но различное число нейтронов, называют *изотопами*.

5. *Изобары* — атомы разных химических элементов, имеющие одинаковые массовые числа. Ядра изобаров содержат разное число протонов, но общее число нуклонов (протонов и нейтронов) у них одинаковое.

6. Атомы, ядра которых имеют одинаковые  $A$  и  $Z$ , но отличаются периодом полураспада, называются *изомерами*.

7. Нуклоны удерживаются в ядре силами особой природы, называемыми *ядерными*. Эти силы более чем в 100 раз превосходят электромагнитные силы; являются силами притяжения; одинаково действуют как на заряженный протон, так и на лишенный заряда нейтрон; проявляются только на очень малых расстояниях ( $10^{-15}$  м), сравнимых с размерами атомных ядер. Кроме того,

ядерные силы обладают свойством насыщения. При большем количестве нуклонов в ядре их действие ослабевает. Поэтому ядра элементов, находящихся в конце периодической таблицы Д. И. Менделеева, нестабильны.

8. Масса покоя ядра  $m_{\text{я}}$  всегда меньше суммы масс покоя отдельно взятых нуклонов соответствующих ядер. Разность этих масс эквивалентна энергии связи  $E_{\text{св}}$  нуклонов в ядре:

$$E_{\text{св}} = [Zm_p + (A - Z)m_n - m_{\text{я}}]c^2.$$

9. Естественная радиоактивность — свойство атомных ядер самопроизвольно (спонтанно) изменять свой состав (заряд ядра, число нуклонов) путем испускания элементарных частиц,  $\gamma$ -квантов или ядерных фрагментов.

10. В состав естественного радиоактивного излучения входят  $\alpha$ -,  $\beta$ - и  $\gamma$ -излучения;  $\alpha$ -излучение представляет собой поток ядер атомов гелия;  $\beta$ -излучение — поток электронов;  $\gamma$  — электромагнитное излучение.

11. Превращение ядер подчиняется так называемым правилам смещения:

1) при  $\alpha$ -распаде ядро теряет положительный заряд  $2e$  и масса его убывает примерно на четыре атомных единицы массы. В результате элемент смещается на две клетки к началу периодической системы;

2) при  $\beta$ -распаде из ядра вылетают электрон и антинейтрино (или позитрон и нейтрино). В результате заряд ядра увеличивается на единицу, а масса остается практически неизменной. После  $\beta$ -распада элемент смещается на одну клетку ближе к концу периодической таблицы Д. И. Менделеева;

3)  $\gamma$ -излучение не сопровождается изменением заряда. Масса ядра меняется ничтожно мало.

12. Согласно закону радиоактивного распада для каждого радиоактивного вещества существует определенный промежуток времени, в течение которого число атомов исходного элемента убывает в два раза. Этот промежуток времени называют периодом полураспада, его значение для различных веществ колеблется в широких пределах: от миллиардов лет до долей секунды.

13. Существуют несколько методов обнаружения и изучения составляющих радиоактивного излучения: с помощью счетчика Гейгера — Мюллера, сцинтилляционного счетчика, камеры Вильсона, пузырьковой камеры, толстослойных фотографических эмульсий и др.

14. Процессы, в которых происходит превращение одних ядер в другие, а также их синтез или распад, называют ядерными реакциями. Ядерные реакции протекают в полном соответствии с законами сохранения. Первая ядерная реакция была осуществлена в 1919 г. Э. Резерфордом, превратившим атомные ядра азота в ядра изотопа кислорода.

15. Продукты многих ядерных реакций оказываются радиоактивными. Явление самопроизвольного испускания радиоактивного излучения искусственно полученными изотопами называют искусственной радиоактивностью.

16. С помощью электронейтральных нейтронов можно вызвать искусственную радиоактивность у самых разных элементов. При облучении нейтронами атомов урана, тория и других тяжелых элементов происходит деление их ядер с выделением энергии и испусканием от 2 до 5 нейтронов. Постоянное возникновение нейтронов при делении тяжелых элементов позволяет осуществить управляемую цепную реакцию в ядерных реакторах. Неуправляемая цепная реакция приводит к ядерному взрыву.

17. Образование свободных нейтронов в процессе деления тяжелых ядер создает возможность осуществления цепной реакции.

18. Природный уран содержит 99,3% изотопа-238 и только 0,7% изотопа-235. Поэтому в нем деление ядер затухает и цепная реакция становится невозможной, в связи с чем для получения «ядерного горючего» природный уран обогащают изотопом-235.

19. Промышленное производство ядерной энергии осуществляется в ядерных реакторах.

20. Ядерные реакции, в результате которых при высокой температуре происходит слияние легких ядер с выделением энергии, называют термоядерными. За счет термоядерных реакций Солнце и звезды выделяют энергию на протяжении миллиардов лет.

21. Потоки заряженных частиц высоких энергий, которые вторгаются в земную атмосферу из мирового пространства, принято называть космическими лучами. В атмосфере они разбивают ядра азота и кислорода на осколки, образуя целый каскад вторичных частиц. Исследование космических лучей дает богатую информацию о поведении микрочастиц и их свойствах.

22. Во вторичных космических лучах содержатся как стабильные, так и радиоактивные ядра, например радиоактивное ядро  $^{14}\text{C}$ .

23. Кроме протонов, нейтронов, электронов и фотонов в настоящее время известно около 400 элементарных частиц. Замечатель-

ным свойством элементарных частиц является их способность превращаться друг в друга.

24. В подавляющем большинстве элементарные частицы нестабильны. Время жизни многих из них измеряется миллионными и миллиардными долями секунды. Самыми короткоживущими являются резонансы. Они существуют всего  $10^{-23} \dots 10^{-22}$  с, после чего распадаются на другие частицы. Последовательный распад продолжается до тех пор, пока не образуются стабильные частицы: протоны, электроны, нейтрино и фотоны.

25. У большинства элементарных частиц есть своя античастица. При встрече частицы с античастицей происходит аннигиляция, т.е. их превращение в два гамма-кванта.

26. Частицы принято делить на фотоны, лептоны и адроны (мезоны и барионы). Лептоны принимают участие в слабом электромагнитном и гравитационном взаимодействиях. Адроны, кроме того, являются сильно взаимодействующими частицами.



### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ

1. Из каких частиц состоят ядра атомов? Как определить количество нейтронов в ядре?
2. Алюминий в таблице Д. И. Менделеева значится под номером 13. Сколько протонов находится в ядре атома алюминия?
3. Все атомные ядра состоят из целого числа нуклонов. Чем можно объяснить тот факт, что атомные массы элементов в таблице Д. И. Менделеева содержат дробную часть?
4. Каковы особенности ядерных сил?
5. Ядро любого атома состоит из положительных протонов, расположенных очень близко друг к другу. Электрические силы отталкивания, действующие между протонами, должны бы разрушить ядро, а в действительности оно обладает необычайной прочностью. Как это можно объяснить?
6. Чем отличается по составу ядро легкого изотопа гелия от ядра сверхтяжелого водорода?
7. Почему обнаружить нейтрон было значительно сложнее, чем открыть протон?
8. Энергия связи ядра лития составляет 41,3 МэВ. Какова масса покоя этого ядра?

Ответ:  $m_{\text{я}} = 7,016 \text{ а. е. м.}$

9. Вычислите энергию, необходимую для разделения ядра лития  ${}^7_3\text{Li}$  на нейтроны и протоны.

Ответ:  $E_{\text{св}} = 39,2 \text{ МэВ}$

10. Как известно, ядро атома не содержит электронов. Однако как можно объяснить вылет электронов из ядра атома при  $\beta$ -распаде?
11. Что такое естественная радиоактивность? Каковы состав радиоактивного излучения и возможности его регистрации?
12. Какие из известных вам законов сохранения выполняются при радиоактивных превращениях? Сформулируйте правила смещения при  $\alpha$ - и  $\beta$ -распадах.
13. Что такое период полураспада? Сформулируйте закон радиоактивного распада.
14. Какой физический процесс является общей основой действия счетчика Гейгера и камеры Вильсона?
15. Почему все виды радиоактивности сопровождаются изменением химических свойств вещества?
16. Можно ли внешним воздействием (нагреванием, повышением давления, изменением электромагнитного поля) изменить скорость радиоактивного распада?
17. Чем различаются ядра изотопов водорода  ${}^1_1\text{H}$ ,  ${}^2_1\text{H}$ ,  ${}^3_1\text{H}$ ,  ${}^4_1\text{H}$ ?
18. Радиоактивный распад радия  ${}^{226}_{88}\text{Ra}$  сопровождается вылетом  $\alpha$ -частицы. Ядро какого элемента образуется в результате этого распада?
19. Изменяются ли массовое число, масса и порядковый номер при испускании ядром  $\gamma$ -кванта?
20. Какая доля радиоактивных ядер некоторого элемента распадается за время, равное половине периода полураспада?

*Ответ:  $n = 70,5\%$ .*

21. Сколько процентов радиоактивного вещества останется через два периода полураспада?

*Ответ:  $n = 25\%$ .*

22. Как можно рассчитать возраст Земли, изучая образец природной урановой руды?
23. Вследствие радиоактивного распада уран  ${}^{238}_{92}\text{U}$  превращается в свинец. Сколько  $\alpha$ - и  $\beta$ -превращений он при этом испытывает?

*Ответ: 8 и 6.*

24. Какие реакции называются ядерными? Приведите пример первой ядерной реакции.
25. При бомбардировке азота  ${}^4_7\text{N}$  нейтронами образуется изотоп бора  ${}^{11}_5\text{B}$ . Напишите уравнение ядерной реакции и определите, какая частица при этом испускается.
26. Почему  $\alpha$ -частицы, выбрасываемые радиоактивными веществами, не могут вызвать ядерных реакций в тяжелых элементах, в то время как они вызывают их в легких?
27. Почему нейтроны являются лучшими снарядами для разрушения ядра атома по сравнению с другими частицами?
28. Какое условие необходимо для возникновения цепной ядерной реакции? Как осуществляется управляемая цепная реакция?

29. Какие реакции называются термоядерными? Чем они отличаются от ядерных? Приведите пример термоядерной реакции.
30. Какую минимальную энергию должна иметь  $\alpha$ -частица для осуществления ядерной реакции  ${}^7_3\text{Li} + {}^4_2\text{He} \rightarrow {}^{10}_5\text{B} + {}^1_0\text{n}$ ?

Ответ:  $E_{\text{мин}} = 5,6 \text{ МэВ}$

31. Какая энергия выделяется при термоядерной реакции  ${}^2_1\text{H} + {}^3_1\text{H} \rightarrow {}^4_2\text{He} + {}^1_0\text{n}$ ?

Ответ:  $E = 17,5 \text{ МэВ}$

32. Напишите ядерные реакции, приводящие к получению в урановом реакторе плутония из изотопа урана  ${}^{238}_{92}\text{U}$  при облучении его нейтронами?

33. Для замедления быстрых нейтронов можно использовать тяжелую воду или углерод (графитовые стержни). Какой из этих замедлителей эффективнее и почему?

34. Что представляют собой космические лучи? Каков механизм их возникновения? В чем состоит их научная ценность?

35. Какие частицы называются элементарными? Назовите их основные свойства и характеристики. На какие группы их делят?

36. Атом водорода и нейтрон каждый в отдельности могут распадаться на протон и электрон. Почему же атом водорода не считается элементарной частицей, а нейтрон причисляют к ним?

37. При аннигиляции электрона и позитрона образовалось два одинаковых гамма-кванта. Найдите длину волны, пренебрегая кинетической энергией частиц до реакции.

Ответ:  $\lambda = 10^{-12} \text{ м}$ .

38. Какой из законов сохранения не позволяет при встрече электрона с электроном (позитрона с позитроном) обращению их в гамма-кванты в отсутствие силового поля?



Раздел VI  
**ВСЕЛЕННАЯ  
И ЕЕ ЭВОЛЮЦИЯ**

## 17.1. Строение Вселенной

*Вселенная* — это весь существующий материальный мир, безграничный во времени и пространстве и бесконечно разнообразный по формам, которые принимает материя в процессе своего развития. Часть Вселенной, охваченная астрономическими наблюдениями, называется *Метагалактикой*, или нашей Вселенной. Размеры Метагалактики очень велики: радиус космологического горизонта составляет 15...20 млрд световых лет. (Световой год — это расстояние, которое проходит свет за один год: 1 св.г. =  $9,46 \cdot 10^{15}$  м.)

Строение и эволюция Вселенной изучаются космологией. *Космология* — один из тех разделов естествознания, которые по своему существу всегда находятся на стыке наук. Космология использует достижения и методы физики, математики, философии. Предмет космологии — весь окружающий нас мегамир, вся «большая Вселенная», и задача состоит в описании наиболее общих свойств, строения и эволюции Вселенной. Ясно, что выводы космологии имеют большое мировоззренческое значение.

Современная структура Вселенной является результатом космической эволюции, в ходе которой из протогалактик образовались галактики, из протозвезд — звезды, из протопланетного облака — планеты.

*Метагалактика* представляет собой совокупность звездных систем — галактик, а ее структура определяется их распределением в пространстве, заполненном чрезвычайно разреженным межгалактическим газом и пронизываемом электромагнитным излучением.

Согласно современным представлениям, для Метагалактики характерна ячеистая (пористая) структура. Эти представления ос-

новываются на данных астрономических наблюдений, показавших, что галактики распределены неравномерно, а сосредоточены вблизи границ ячеек, внутри которых галактик почти нет. Кроме того, найдены огромные объемы пространства, в которых галактик пока не обнаружено. Пространственной моделью такой структуры может служить кусок пемзы, которая неоднородна в небольших выделенных объемах, но однородна в больших объемах.

Если брать не отдельные участки Метагалактики, а ее крупномасштабную структуру в целом, то очевидно, что в этой структуре не существует каких-то особых, чем-то выделяющихся мест или направлений и вещество распределено сравнительно равномерно.

Возраст Метагалактики близок к возрасту Вселенной, поскольку образование ее структуры приходится на период, следующий за разьединением вещества и излучения. По современным данным, возраст Метагалактики оценивается в 15...18 млрд лет. Ученые считают, что, по-видимому, близок к этому и возраст галактик, которые сформировались на одной из начальных стадий расширения Метагалактики.

*Галактика* — гигантская система, состоящая из скоплений звезд и туманностей, образующих в пространстве достаточно сложную конфигурацию.

По форме галактики условно разделяются на три типа: эллиптические, спиральные и неправильные.

Эллиптические галактики обладают пространственной формой эллипсоида с разной степенью сжатия. Они являются наиболее простыми по структуре: распределение звезд равномерно убывает от центра.

Спиральные галактики представлены в форме спирали, включая спиральные ветви. Это самый многочисленный вид галактик, к которому относится и наша Галактика — Млечный путь. *Млечный путь* — звездная система, в которую входит около  $2 \cdot 10^{11}$  звезд, в том числе Солнце. Наша Галактика — это гигантская спиральная система, которая может быть отнесена к числу довольно спокойных, несмотря на непрерывно происходящие в ней грандиозные процессы рождения и гибели звезд.

Неправильные галактики — не обладают выраженной формой, в них отсутствует центральное ядро.

Некоторые галактики характеризуются исключительно мощным радиоизлучением, превосходящим видимое излучение. Это радиогалактики.

В строении «правильных» галактик упрощенно можно выделить центральное ядро и сферическую периферию, представленную либо в форме огромных спиральных ветвей, либо в форме эллиптического диска.

Ядра галактик проявляют активность в разных формах: в непрерывном истечении потоков вещества, выбросах сгустков газа и облаков газа с массой в миллионы солнечных масс, нетепловом радиоизлучении из околоядерной области. В ядре галактики сосредоточены самые старые звезды, возраст которых приближается к возрасту галактики. Звезды среднего и молодого возраста расположены в диске галактики.

Звезды и туманности в пределах галактики движутся довольно сложным образом: вместе с галактикой они принимают участие в расширении Вселенной, кроме того, они участвуют во вращении галактики вокруг оси.

## 17.2. Звезды

На современном этапе эволюции Вселенной вещество в ней находится преимущественно в звездном состоянии; 97% вещества в нашей Галактике сосредоточено в звездах, представляющих собой гигантские плазменные образования различной величины, температуры, с разной характеристикой движения. У многих других галактик, может быть даже у большинства, «звездная субстанция» составляет более чем 99,9% их массы.

Возраст звезд меняется в достаточно большом диапазоне значений: от сотен тысяч лет у самых молодых звезд до 15 млрд лет, соответствующих возрасту Вселенной. Есть звезды, которые образуются в настоящее время и находятся в протозвездной стадии, т. е. они еще не стали настоящими звездами.

Огромное значение имеет исследование взаимосвязи между звездами и межзвездной средой, включая проблему непрерывного образования звезд и конденсирующейся диффузной (рассеянной) материи.

Рождение звезд происходит в газовой-пылевой туманности под действием гравитационных, магнитных и других сил, благодаря которым идет формирование неустойчивых неоднородностей и диффузная материя распадается на ряд сгущений. Если такие сгущения сохраняются достаточно долго, то с течением времени они превращаются в звезды. Важно отметить, что происходит процесс рождения не отдельной изолированной звезды, а звезда

ных ассоциаций. Образовавшиеся газовые тела притягиваются друг к другу, но не обязательно объединяются в одно громадное тело. Вместо этого они, как правило, начинают вращаться относительно друг друга, и центробежная сила этого движения противодействует силе притяжения, ведущей к дальнейшей концентрации. Звезды эволюционируют от протозвезд — гигантских газовых шаров, слабо светящихся и имеющих низкую температуру, — к звездам — плотным плазменным телам с температурой внутри в миллионы градусов. Затем начинается процесс ядерных превращений, описываемый в ядерной физике. Основная эволюция вещества во Вселенной происходила и происходит в недрах звезд. Именно там находится тот «плавильный тигель», который обусловил химическую эволюцию вещества во Вселенной.

В недрах звезд при температуре порядка десяти миллионов градусов и очень высокой плотности атомы находятся в ионизированном состоянии: электроны почти полностью или абсолютно все отделены от своих атомов. Оставшиеся ядра вступают во взаимодействие друг с другом, благодаря чему водород, имеющийся в изобилии в большинстве звезд, превращается при участии углерода в гелий. Эти и подобные ядерные превращения являются источником колоссального количества энергии, уносимой излучением звезд. Те же силы, которые высвобождаются при взрыве водородной бомбы, образуют внутри звезды энергию, позволяющую ей излучать свет и тепло в течение миллионов и миллиардов лет. В итоге на завершающем этапе эволюции звезды превращаются в инертные («мертвые») звезды.

Звезды не существуют изолированно, а образуют системы. Простейшие звездные системы — так называемые кратные системы — состоят из двух, трех, четырех, пяти и больше звезд, обращающихся вокруг общего центра тяжести. Компоненты некоторых кратных систем окружены общей оболочкой диффузной материи, источником которой, по-видимому, являются сами звезды, выбрасывающие ее в пространство в виде мощного потока газа.

Звезды объединены также в еще большие группы — звездные скопления. Они могут иметь рассеянную или шаровую структуру. Рассеянные звездные скопления насчитывают несколько сотен отдельных звезд, шаровые скопления — многие сотни тысяч.

Ассоциации, или скопления звезд, также не являются неизменными и вечно существующими. Через определенное количество времени, исчисляемое миллионами лет, они рассеиваются силами галактического вращения.

### 18.1. Развитие Вселенной

С эволюцией структуры Вселенной связано возникновение скоплений галактик, обособление и формирование звезд и галактик, образование планет и их спутников. Сама Вселенная возникла около 20 млрд лет тому назад из некоего плотного и горячего протовещества. Сегодня можно только предполагать, каким было это прародительское вещество Вселенной, как оно образовалось, каким законам подчинялось и что за процессы привели его к расширению. Существует точка зрения, что с самого начала протовещество с гигантской скоростью начало расширяться, разлетаясь во всех направлениях. На начальной стадии это плотное вещество представляло собой однородную бурлящую смесь неустойчивых, постоянно распадающихся при столкновениях частиц. Остывая и взаимодействуя на протяжении миллионов лет, вся эта масса рассеянного в пространстве вещества концентрировалась в большие и малые газовые образования, которые в течение сотен миллионов лет, сближаясь и сливаясь, превращались в громадные комплексы. В них, в свою очередь, возникали более плотные участки — там впоследствии и образовались звезды и даже целые галактики.

Существует также гипотеза о цикличности состояния Вселенной. Возникнув когда-то из сверхплотного сгустка материи, Вселенная, возможно, уже в первом цикле породила внутри себя миллиарды звездных систем и планет. Но затем согласно этой гипотезе Вселенная начинает стремиться к тому состоянию, с которого началась история цикла. Красное смещение сменяется фиолетовым, радиус Вселенной возвращается в первоначальное состояние, при этом уничтожается всяческая жизнь. И так повторяется каждый раз, в каждом цикле на протяжении вечности!

## 18.2. Модель расширяющейся Вселенной

Наиболее общепринятой в космологии является модель однородной изотропной нестационарной горячей расширяющейся Вселенной, построенная на основе общей теории относительности и релятивистской теории тяготения, созданной А. Эйнштейном в 1916 г. В основе этой модели лежат два предположения:

- свойства Вселенной одинаковы во всех ее точках (однородность) и направлениях (изотропность);
- наилучшим известным описанием гравитационного поля являются уравнения Эйнштейна.

Из этого следует существование так называемой кривизны пространства, связанной с плотностью массы (энергии). Важной деталью данной модели является ее нестационарность.

В 1922 — 1924 гг. петроградским математиком А. А. Фридманом были предложены общие уравнения для описания всей Вселенной, меняющейся с течением времени. Звездные системы не могут находиться в среднем на неизменных расстояниях друг от друга. Они должны либо удаляться, либо сближаться. Такой результат — неизбежное следствие наличия сил тяготения, которые главенствуют в космических масштабах. Вывод Фридмана означал, что Вселенная должна либо расширяться, либо сжиматься. Отсюда следовал пересмотр общих представлений о Вселенной.

На этот вывод не обращали внимания вплоть до открытия американским астрономом Э. Хабблом в 1929 г. так называемого красного смещения.

*Красное смещение* — это понижение частот электромагнитного излучения: в видимой части спектра линии смещаются к его красному краю.

Так вот, для всех далеких источников света было зафиксировано красное смещение, причем чем дальше находился источник, тем оно было больше, т. е. красное смещение оказалось пропорциональным расстоянию до источника. Это подтверждало гипотезу о расширении Метагалактики — видимой части Вселенной.

Составной частью модели расширяющейся Вселенной является представление о *Большом взрыве*, произошедшем 12...18 млрд лет назад. «Вначале был взрыв. Не такой взрыв, который знаком нам на Земле и который начинается из определенного центра и затем распространяется, захватывая все больше и больше пространства, а взрыв, который произошел одновременно везде, заполнив с самого начала все пространство, причем каждая части-

ца материи устремилась прочь от любой другой частицы» (Вайнберг С. Первые три минуты. Современный взгляд на происхождение Вселенной. — М.: Мир, 1981. — С. 30).

Начальное состояние Вселенной (так называемая сингулярная точка): бесконечная плотность массы, бесконечная степень кривизны пространства и взрывное, замедляющееся со временем расширение при высокой температуре, при которой могла существовать только смесь элементарных частиц (включая фотоны и нейтрино). Высокая температура начального состояния подтверждена открытием в 1965 г. реликтового излучения фотонов и нейтрино, образовавшихся на ранней стадии расширения Вселенной. (Реликтовое излучение — это космическое электромагнитное излучение, сохранившееся от ранней стадии развития Вселенной.)

Гипотеза о Большом взрыве тесно связана с эволюцией Вселенной, в частности с наблюдаемым расширением. Ученые считают, что в настоящее время скорость «разлета» галактик увеличивается на 75 км/с на каждый миллион парсек. Экстраполяция к прошлому приводит к удивительному результату: примерно 10...20 млрд лет назад вся Вселенная была сосредоточена в очень маленькой области. Многие ученые считают, что в то время плотность Вселенной была такая же, как у атомного ядра. Проще говоря, Вселенная тогда представляла собой одну гигантскую «ядерную каплю». По каким-то причинам эта «капля» пришла в неустойчивое состояние и взорвалась. Произошел Большой взрыв.

При данной оценке времени образования Вселенной предполагалось, что наблюдаемая сейчас картина разлета галактик происходила с одинаковой скоростью и в сколь угодно далеком прошлом. А именно на таком предположении и основана гипотеза первичной Вселенной — гигантской «ядерной капли», пришедшей в состояние неустойчивости.

Что же было после Большого взрыва? Образовался сгусток плазмы — нечто среднее между твердым и жидким состоянием, — который начал расширяться все больше и больше под действием взрывной волны. Через 0,01 с после начала Большого взрыва во Вселенной появилась смесь легких ядер ( $\frac{2}{3}$  водорода и  $\frac{1}{3}$  гелия), а затем после сложных преобразований — остальные химические элементы.

В настоящее время космологи придерживаются мнения, что Вселенная не расширяется «от точки до точки», а как бы пульсирует между конечными пределами плотности. Это означает, что в прошлом скорость разлета галактик была меньше, чем сейчас, а еще раньше система галактик сжималась, т. е. галактики прибли-

жались друг к другу с тем большей скоростью, чем большее расстояние их разделяло. Современная космология располагает рядом аргументов в пользу гипотезы пульсирующей Вселенной. Однако они носят чисто математический характер; главный из них — необходимость учета реально существующей неоднородности Вселенной.

Окончательно решить вопрос, какая из двух гипотез — «ядерной капли» или «пульсирующей Вселенной» — справедлива, сейчас невозможно. Потребуется еще очень большая работа, чтобы решить эту одну из важнейших проблем космологии.

### 19.1. Протосолнце и протопланетное облако

Вопросы о том, как образовалась Земля и каким образом сложились на ней условия, необходимые для возникновения и развития жизни, относятся к самым кардинальным вопросам естествознания. Так как Земля обращается вокруг Солнца вместе с другими планетами по общим для них законам, то ее происхождение следует рассматривать в едином процессе формирования всей Солнечной системы.

Раздел астрофизики, изучающий происхождение небесных тел и их систем, называют *космогонией*. Основная трудность планетной космогонии заключается в том, что здесь только один объект изучения — Солнечная система. Исследование планетных систем других звезд пока не представляется возможным. Поэтому метод сравнения, которым ученые с успехом пользуются в звездной космогонии, в планетной космогонии неприменим. Однако благодаря совершенствованию космической техники и разработке теории эволюции звезд открываются большие возможности познания и этой области.

Согласно расчетам, выполненным на ЭВМ, первоначальная масса газово-пылевого облака, в котором образовалась Солнечная система, достигала не менее десятка тысяч солнечных масс. Напомним, что сжимаясь, облако теряет свою устойчивость и распадается на отдельные сферические фрагменты. Затем каждый фрагмент сжимается самостоятельно и превращается в протозвезду. Именно так представляется процесс, в результате которого 5 млрд лет назад сформировалось Протосолнце. Попутно в его экваториальной плоскости возникало турбулентное движение газа и пыли. Часть этого вещества, обладающая избыточным мо-

ментом вращения, образовала газово-пылевой диск. В результате сложных и многообразных физических процессов, происходивших в этом диске, сложились необходимые условия формирования планет.

На рис. 19.1 представлена схема формирования Протосолнца и протопланетного диска внутри сжимающегося фрагмента.

Вещество фрагмента, расположенное на больших широтах, падает на Протосолнце и его окрестности, а вещество, расположенное в экваториальной области, падает на край диска (сплошные линии со стрелками на рис. 19.1). Внутри диска направление движения вещества изменяется с расстоянием от центра и показано двойными стрелками. Вблизи внешнего края диска это движение направлено на периферию, вследствие чего диск разрастается. За время формирования Солнца диск увеличивался от 0,1 до десятков и сотен астрономических единиц (а. е.):  $1 \text{ а. е.} = 1,496 \cdot 10^{11} \text{ м.}$

В результате продолжавшегося сжатия вещество фрагмента разогревалось и, наконец, его окрестности озарились светом Протосолнца. По мере повышения температуры росло давление, которое все более препятствовало дальнейшему сжатию образовавшегося светила. На заключительной стадии сжатия Протосолнце прогрелось настолько, что его внешние слои как бы закипели. Вихревое движение ионизованного газа привело к возникновению огромных токов и сильных магнитных полей. Когда температура в центре превысила  $10^7 \text{ К}$ , включился термоядерный синтез. Сжатие прекратилось и образовалось первородное Солнце.

От начала сжатия фрагмента до образования Солнца как звезды прошло около 100 млн лет. Еще на начальной стадии развития Протосолнца газово-пылевой диск оторвался от его поверхности, превратившись в кольцо, которое принято называть *протопланетным облаком*. Постепенно становясь все более плоским, это облако сильно уплотнялось, в результате чего в нем началось слипание пылинок и образование астероидоподобных тел.

К этому времени Протосолнце стало очень горячим. Его из-

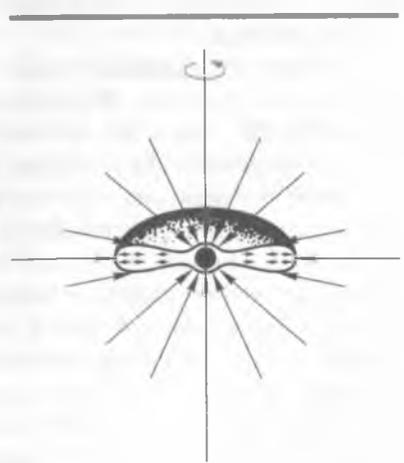


Рис. 19.1

лучение нагрело внутреннюю область протопланетного облака до 400 К, образовав зону испарения. Солнечный ветер выметал из этой зоны легкое вещество — водород и гелий — в более далекую от Протосолнца область, куда излучение почти не проникало. Там образовалась зона намерзания с температурой около 50 К. Такой процесс определил в дальнейшем происхождение двух групп планет. Вблизи Солнца сформировались небольшие по размерам, но плотные планеты земной группы, а в глубине облака — гиганты группы Юпитера, состоящие в основном из водорода, гелия и некоторых других летучих компонентов.

## 19.2. Образование планет

Основной этап развития протопланетного облака характерен объединением астероидоподобных тел в ядра будущих планет. Этот процесс, длившийся около 100 млн лет, завершился образованием планет земной группы. К концу этого периода сформировалась Луна.

Определение состава, строения и возраста доставленных на Землю образцов лунных пород показало, что Луна в начальной стадии своего формирования была разогрета до температуры, превышающей 1 000 К. Этот разогрев был вызван непрерывным падением на ее поверхность достаточно крупных твердых тел. По всей вероятности, подобный разогрев, но только в значительно большей степени, сопровождал формирование ядер всех планет земной группы.

Процесс образования планет-гигантов оказался более сложным и продолжительным. Формирование Юпитера и Сатурна происходило в два этапа. На первом этапе, длившемся около 100 млн лет, завершилась аккумуляция их твердых ядер. Она происходила таким же образом, как и у планет земной группы. На втором этапе массивные ядра Юпитера и Сатурна аккумулировали значительную долю окружающего их газа, из которого образовались протяженные атмосферы этих планет.

Начальная температура Юпитера была очень высокой и достигала 5 000 К. Нагревание планеты происходило за счет энергии распада короткоживущих радиоактивных элементов, а также за счет энергии падающих на нее астероидоподобных тел. Температура Сатурна оказалась значительно ниже и не превышала 2 000 К.

Формирование Урана и Нептуна шло значительно медленнее. Когда их масса достигла такого значения, при котором начался захват окружающего газа, большая доля газа уже покинула Солнечную систему. Поэтому современное содержание водорода и гелия там примерно в пять раз меньше, чем у Юпитера и Сатурна.

**Астероиды и кометы** — это остатки протопланетного облака, которые по разным причинам не вошли в состав планет. Астероиды образовались в околосолнечной области (в зоне испарения), а кометы — в зоне намерзания. Большинство комет сохранилось только в очень далекой от Солнца области, на расстоянии более 10 тыс. а.е.

Дробление астероидов при их столкновениях друг с другом порождает множество метеорных тел, которые являются их осколками. Некоторые из них выпадают на поверхность Земли в виде метеоритов.

**Начальное состояние и эволюция Земли.** Среди планет Солнечной системы нет даже двух планет, похожих друг на друга во всех отношениях. Значит, процесс формирования каждой планеты имел существенные особенности. Разумеется, наибольший интерес представляют особенности формирования Земли.

Около 5 млрд лет назад одно из крупных астероидоподобных тел, образовавшееся на расстоянии 1 а.е. от Протосолнца, явилось зародышем нашей планеты. При падении на нее других астероидоподобных тел происходило дробление и нагревание вещества. С ростом температуры в недрах первородной Земли началось перераспределение пород. Легкие силикатные породы выдавливались на поверхность, постепенно слагая земную кору. Тяжелые породы, содержащие железо, погружались к центру. При этом также выделялась энергия, и температура во внутренних оболочках Земли продолжала повышаться.

Разогревание Земли сопровождалось бурной вулканической деятельностью. Вместе с магматическими породами вулканы извергали большое количество газов и водяных паров. Изверженные газы образовали атмосферу Земли, а водяные пары сконденсировались в воды океанов и морей.

Первичная атмосфера нашей планеты сильно отличалась от современной. Она была значительно плотнее и состояла главным образом из углекислого газа. Изменение ее химического состава началось около 2 млрд лет назад, со времени зарождения жизни. Однако значительное количество углекислого газа сохранялось в ней еще очень долго. Лишь бурное развитие наземной растительности сильно изменило ее состав. Растения каменноугольного

периода в истории Земли поглотили из атмосферы большую часть углекислоты и насытили ее кислородом. В последние 200 млн лет химический состав земной атмосферы практически оставался постоянным.

**Проблема существования внеземных цивилизаций.** Космогонические исследования, раскрывая картину происхождения Солнечной системы, позволяют представить, как и каким образом за Земле сложились условия для возникновения и развития жизни.

Яркий след в истории науки оставил убежденный сторонник обитаемости других миров итальянский мыслитель XVI в. Джордано Бруно. Его смелые для того времени идеи о бесчисленных «очагах разума» во Вселенной резко противоречили догмам средневековой католической церкви. Судьба ученого сложилась трагически. Он был обвинен в ереси и 17 февраля 1600 г. в Риме на площади Цветов заживо сожжен на костре. Но идеи Дж. Бруно не погибли вместе с ним. Они стали интенсивно развиваться в XVII и особенно в XVIII в.

Проблема населенности космоса захватила ученых. Знаменитый английский астроном В. Гершель считал обитаемыми не только все планеты, но и даже Солнце. Он, в частности, полагал, что солнечные пятна — это участки твердой поверхности, на которой под светящимися облаками обитают солнечные жители. Многие ученые того времени вполне серьезно говорили о населяющих Луну селенитах.

Однако по мере накопления сведений о природе небесных тел все эти гипотезы отпадали одна за другой. Солнце оказалось слишком горячим, а Луна — лишенной атмосферы и воды. Стала казаться невероятной и жизнь на планетах-гигантах из-за их огромной удаленности от Солнца и господствующих там низких температур. Из кандидатов в обитаемые миры выбыл и лишенный атмосферы Меркурий. Оставались только две планеты — Венера и Марс, на которых допускалась возможность существования жизни. Такое мнение поддерживалось в науке вплоть до начала 1960 г. Однако исследования с помощью космической техники окончательно развеяли и эти надежды. Хотя наличие на Марсе примитивных форм жизни в виде микроорганизмов еще полностью не отрицается, но о каких-либо растениях или животных, а тем более разумных существах говорить не приходится.

Разумеется, отсутствие жизни на других планетах Солнечной системы отнюдь не снимает проблемы существования жизни и разума во Вселенной вообще. Правда, на современном уровне

развития астрономической техники мы не имеем возможности получить убедительные данные о существовании других планетных систем. Однако космогонические исследования показывают, что образование планетных систем при формировании одиночных звезд является закономерным процессом. С помощью радиоастрономической аппаратуры обнаружены протопланетные диски у ряда очень молодых звезд типа Т Тельца (HL Тельца,  $\theta$  Живописца, R Единорога и др.). Таким образом, имеется основание предполагать, что в нашей Галактике существует весьма большое число планетных систем, подобных Солнечной.

Если допустить, что только на одной из миллиона неизвестных нам планет возникла и развивается жизнь, то все равно обитаемых миров в Галактике должны быть многие тысячи. Но существуют ли среди них высокоразвитые цивилизации и как их обнаружить?

Российский ученый Н. С. Кардашев и американский ученый Ф. Дрейк считают, что наиболее перспективным в этом отношении является радиопоиск. Если в Галактике существуют цивилизации, достигшие достаточно высокого уровня развития, то можно предположить, что у них, как и у нас, есть стремление установить космическую радиосвязь с разумными обитателями других миров. На основании таких соображений в программу научных исследований ряда стран включен планомерный радиопоиск сигналов искусственного происхождения.

Пока радиопоиск внеземных цивилизаций не дал положительных результатов. Более того, нет даже уверенности, что когда-либо в будущем попытки их обнаружить увенчаются успехом. Возможно, наши сегодняшние представления о жизни во Вселенной со временем покажутся столь же наивными, сколь наивными оказались гипотезы о селенитах и солнечных жителях. Некоторые ученые не исключают даже и того, что во Вселенной существует лишь одна единственная земная цивилизация. Во всяком случае, наша родная планета с ее природой и разумом действительно уникальна.



## **ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ВЫВОДЫ**

1. Космология — это физическое учение о Вселенной в целом. В основе современной космологической модели лежит, во-первых, принцип однородности и изотропности Вселенной, а во-вторых, наблюдаемое разбегание галактик, т. е. расширение Вселенной.

В состав Вселенной входят: метагалактика, галактики и звезды.

Метагалактика представляет собой совокупность звездных систем — галактик, а ее структура определяется их распределением в пространстве, заполненном чрезвычайно разреженным межгалактическим газом и пронизываемом электромагнитным излучением.

Галактика — гигантская система, состоящая из скоплений звезд и туманностей, образующих в пространстве достаточно сложную конфигурацию. По форме галактики условно разделяются на эллиптические, спиральные и неправильные.

Звезды — гигантские плазменные образования различной величины, температуры, с разной характеристикой движения.

2. Учитывая закон Хаббла, по значению красного смещения в спектре галактики можно судить, как далеко от нас находится этот объект не только в пространстве, но и во времени.

3. Само по себе космологическое красное смещение в спектрах галактик есть уменьшение частоты, а следовательно, и энергии квантов электромагнитного излучения. Его можно рассматривать как понижение температуры фотонного газа. Отсюда следует, что в начале расширения Вселенная была очень плотной и очень горячей.

4. Расширению Вселенной предшествовало сингулярное состояние, из которого она вышла около 13 млрд лет тому назад. Вопрос о том, что было до выхода Вселенной из сингулярности, не имеет смысла, так как в сингулярности пространство и время теряют свойство непрерывности и понятия «позже» и «раньше» становятся неопределенными.

5. Первые мгновения после выхода Вселенной из сингулярности плотность Вселенной составляла  $1 \cdot 10^{96}$  кг/м<sup>3</sup>, а температура была  $1 \cdot 10^{32}$  К. При столь огромных значениях плотности и температуры не могли существовать ни молекулы, ни атомы, ни атомные ядра. Существовали только элементарные частицы, которые находились в термодинамическом равновесии с квантами электромагнитного поля. С одной стороны, два гамма-кванта при встрече превращались в частицу и соответствующую ей античастицу, а с другой стороны, при встрече частицы с античастицей эта пара аннигилировала, превращаясь в два гамма-кванта.

6. По мере расширения Вселенной и понижения температуры фотонного газа уменьшалась энергия квантов электромагнитного поля. Сначала условие  $h\nu \geq m_0 c^2$  перестало выполняться для наиболее массивных частиц, а затем для частиц все меньших и меньших масс. Это означает, что каждой частице и соответствую-

ющей ей античастице можно сопоставить пороговую температуру

$$T_{\text{пор}} = m_0 c^2 / K.$$

При температуре ниже пороговой энергия двух гамма-квантов оказывается недостаточной для их превращения в частицу и античастицу соответствующей массы. Поэтому такие частицы и античастицы выпадали из равновесия с излучением и, после аннигиляции, переставали существовать.

7. До отделения излучения от вещества плотность энергии-массы того и другого были одинаковыми. Но затем это равенство нарушилось, поскольку расширение Вселенной влечет за собой увеличение длины волны реликтовых фотонов (плотность их энергии-массы уменьшается быстрее). В результате доминирующим видом материи во Вселенной становится вещество.

8. К настоящему времени температура реликтового излучения понизилась до 2,7 К. Его обнаружение в 1965 г. на волне 7,35 см явилось решающим подтверждением принципиальной правильности модели горячей Вселенной.

9. Раздел астрофизики, изучающий происхождение небесных тел, называют космогонией. Современная космогония Солнечной системы объясняет происхождение Земли и планет из газопылевого облака, некогда окружавшего Протосолнце. Вблизи Протосолнца образовалась зона испарения, в которой сформировались планеты земной группы, а в глубине облака, в зоне намерзания, сформировались планеты-гиганты.

10. В начальный период формирования Земли происходило ее интенсивное разогревание. Оно совершалось главным образом за счет кинетической энергии падающих на Землю астероидоподобных тел. Первичная атмосфера нашей планеты состояла в основном из углекислого газа и водяных паров, которые впоследствии сконденсировались в воды морей и океанов.

Появление и развитие растительного мира на Земле привело к сильному изменению химического состава ее атмосферы. В каменноугольный период истории Земли бурная растительность поглотила из атмосферы большую часть углекислого газа и насытила ее кислородом.

11. Радиоастрономические исследования показали наличие у ряда одиночных молодых звезд протопланетных дисков. Отсюда следует, что образование планетных систем в Галактике является закономерным процессом, тем самым не исключается возможность существования внеземных цивилизаций.



## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ

1. Определите основные структурные уровни организации материи в мегамире и дайте им характеристику.
2. Какие модели Вселенной разработаны в современной космологии?
3. На чем основана модель расширяющейся Вселенной?
4. Какой процесс, происходивший в протопланетном облаке, обусловил происхождение двух групп планет, отличающихся по массе, составу и плотности?
5. В современную эпоху концентрация реликтовых фотонов составляет  $5 \cdot 10^8 \text{ м}^{-3}$ . Определите плотность энергии реликтового излучения.

*Ответ:*  $\epsilon = 2 \cdot 10^{-14} \text{ Дж/м}^3$

6. Какой температуре соответствует энергия гамма-квантов, равная  $1 \cdot 10^{14} \text{ ГэВ}$ ?

*Ответ:*  $T = 10^{27} \text{ К}$ .

7. Вычислите пороговую температуру для протонов и электронов.

*Ответ:*  $T_{\text{пор}} = 10^{13} \text{ К}; T_{\text{пор}} = 6 \cdot 10^9 \text{ К}$ .



Раздел VII  
**ФИЗИКА В ЖИЗНИ  
ЧЕЛОВЕКА**

### 20.1. Физика и общечеловеческие ценности

Физика оказывает непосредственное влияние на другие науки, как естественные, так и гуманитарные, обеспечивает их быстрое развитие, а также способствует возникновению новых наук.

Нет ни одного человека, которому не приходилось бы наблюдать за звездами на небе. И сразу же возникает ряд интереснейших вопросов. Что представляет собой Вселенная? Что происходит в далеких от нас мирах? Существует ли предел, граница у Вселенной? Что такое звездные скопления? Одиноки ли мы во Вселенной? Можно бесконечно любоваться небом и думать о нем, но ответ не найдешь, если не используешь физические установки, приборы и не применишь законы физики. И человек создал такие приборы и открыл такие законы. Сначала были просто зрительные трубы, а теперь это огромные радиотелескопы, которые улавливают излучения, идущие из Вселенной с огромнейших расстояний (нескольких миллиардов световых лет; световой год — это расстояние, которое свет проходит со скоростью  $3 \cdot 10^8$  м/с за один год). Материал, полученный с помощью астрофизической аппаратуры, расшифровывают и узнают о совершенно новых процессах, происходящих во Вселенной.

Таким образом, на стыке физики и астрономии возникла новая наука — *астрофизика*, достигшая колоссальных успехов во второй половине XX в.

Мозг человека — уникальное и удивительное явление природы! В нем рождаются мысли, управляющие продуктивной человеческой деятельностью. Но механизм мышления до настоящего времени мало изучен, хотя с помощью такого физического прибора, как электроэнцефалограф, научились проводить различные исследования.

А загадка наследственности, мучившая ученых многие годы! Почему, например, ребенок наследует признаки матери и отца? Эта загадка была разгадана, когда с помощью рентгеновского излучения была изучена структура молекул, являющихся носителями наследственности. На стыке физики и биологии возникла одна из перспективных сегодня наук — **биофизика**.

Бурное развитие физики в последние десятилетия, расширение сферы ее применения, внедрение новых методов исследования и аппаратуры привели к тому, что некоторые разделы физики получили право на самостоятельное существование. К ним относятся астрофизика, биофизика, геофизика, физическая химия, химическая физика, физика полупроводников и др. Естественно, что между различными разделами нет резких граней, они частично перекрываются, обогащая друг друга. Широкое практическое применение получили такие физико-технические науки, как радиоэлектроника, радиофизика, электроакустика, космическая физика.

Современный специалист, в какой бы он области ни работал, должен быть всесторонне развит, знаком с основами наук, в том числе и физики. Это относится не только к тем, кто создает музыкальные инструменты, ставит или осуществляет иллюзионные представления, но и к тем, кто посвятил себя музыке, культуре и искусству, которые, как может показаться на первый взгляд, не связаны непосредственно с физикой.

Как мы видим, физические методы исследования проникли во многие другие науки, и потому физика является в настоящее время лидером естествознания, порождающим возникновение новых наук.

Мы говорили о практическом значении физики в жизни современного общества. Этим ее роль не исчерпывается. Физика породила определенные принципы научного стиля мышления. Это и уверенность в неизбежности открытия парадоксальных фактов, и в том, что все в мире причинно обусловлено, а главное, при анализе любого события можно найти его причины. Это и здоровый скептицизм, и стремление поставить под сомнение свои и чужие утверждения, проверяя их фактами и экспериментальными данными.

С самых первых шагов зарождения научных знаний людям было свойственно стремление не только понять отдельные природные явления, но и создать общее целостное представление о мире. Это стремление основывалось на убеждении, что мир — это не скопище разрозненных вещей и событий, а единое взаи-

мосвязанное и развивающееся целое. Обратите внимание, как об этом сказал древнегреческий ученый Гераклит: «Мир... не создан никем из людей и богов, а был, есть и будет вечно живым огнем, закономерно воспламеняющимся и закономерно угасающим».

Правда, древние мыслители пытались все богатства внешнего мира свести к неким первоосновам, из которых складывается все существующее (такowymi у Эмпедокла были огонь, земля, вода, воздух). Согласно современным воззрениям это крайне наивные представления, но сама идея, лежащая в их основе, не устарела и сегодня: мир — это единое целое, и человек может и должен создать в своем сознании общую картину природы. Уверенность в этом была и сейчас является источником того неиссякаемого оптимизма и необычайной настойчивости, с которыми физики всех эпох искали и ищут общие законы природы, из которых складывается обобщенный образ, общая модель природы, лежащая в основе нашего миропонимания. «Человек стремится каким-то адекватным способом создать в себе простую и ясную картину мира. Высшим долгом физиков является поиск тех общих элементарных законов, из которых можно получить картину мира», — подчеркивал А. Эйнштейн. У каждого человека в результате изучения физики должно остаться общее понимание физической картины мира. Таким образом, физика как наука, дающая мировоззренческие знания и нормы мышления, есть важнейший элемент общечеловеческой культуры.

Выдающийся физик XX в., один из создателей квантовой физики, Н. Бор подчеркивал: «Установить резкое различие между философией естествознания и человеческой культурой конечно невозможно. В самом деле, физические науки являются неотделимой частью нашей цивилизации; это происходит не только потому, что наше все увеличивающееся овладение силами природы совершенно изменило материальные условия жизни, а потому, что изучение этих наук дало так много для выяснения того окружения, на фоне которого существуем мы сами».

Академик П. Л. Капица в свое время подчеркивал, что «...красота и увлекательность проникновения в новые, неизведанные области и заключается в том, что человек не может предвидеть того, что он там для себя найдет. Весь накопленный исторический опыт показывает, что проникновение в новые области всегда открывает и новые возможности понятия человеческой культуры».

А вот высказывание американского физика — отца водородной бомбы Э. Теллера: «Ученый не отвечает за законы природы. Его дело состоит только в том, чтобы выяснить, каким образом

они функционируют. Вопрос о том, нужно ли делать водородную бомбу, применять или нет, ученого не касается». Интересно, а как бы вы отнеслись к этой мысли?

Выдающийся английский философ и естествоиспытатель Ф. Бэкон провозгласил физику «матерью всех наук», которая первая указывает путь развития культуры человечества.

«Главное, делайте все со страстью. Это очень украшает жизнь», — отмечал в свое время Л. Д. Ландау, выдающийся физик, лауреат Нобелевской премии, наш соотечественник.

В конце концов, по выражению одного из знаменитых физиков М. Лауэ, «образование есть то, что остается после того, как все выученное забыто». В этом афоризме есть глубокий смысл.

## **20.2. Физические методы исследования памятников истории, архитектуры и произведений искусства**

Для эпохи научно-технического прогресса, в которую мы живем, характерно сотрудничество ученых, работающих в различных отраслях знаний. Привычными стали исследования, выполняемые на стыках наук, как правило, они весьма плодотворны. Чаще всего стыкуются смежные дисциплины, однако и удаленные друг от друга науки испытывают взаимное «притяжение». Ученым, решающим проблемы гуманитарных наук, приходят на помощь физики и химики, биологи и математики. В результате сотрудничества «гуманитариев» и «естественников» исследование переводится на качественно новый, более высокий уровень. Общность поставленной цели требует совместной работы представителей разных наук на всех этапах. Эффективное соединение гуманитарных и естественных наук сопровождается их взаимным проникновением, появляются не просто стыки наук, а своеобразные зоны их синтеза.

Последние десятилетия показали, что в исторических науках перспективно привлечение физических методов исследования. Электро- и магниторазведка, радиоизотопное, палеомагнитное и термолюминесцентное датирование, спектроскопия в видимой, ультрафиолетовой и инфракрасной областях, рентгеноструктурный и рентгеноспектральный анализ, электронное и протонное микрозондирование, активация нейтронами, заряженными частицами и гамма-квантами, масс-спектрометрия и электронная микроскопия — таков далеко не полный перечень физических мето-

дов исследования, уже успевших хорошо зарекомендовать себя в истории, археологии, искусствоведении. Чтобы точно формулировать задачи и планировать будущие эксперименты, представителям гуманитарных наук необходимо четко знать о тех возможностях, которые заложены в богатейшем арсенале средств современной физики. Продемонстрируем эти возможности на отдельных примерах.

Электромагнитное поле указывает место будущих раскопок. История изучения геофизических полей над археологическими памятниками насчитывает полвека. Пионером использования геофизики в археологии был англичанин Р. Аткинсон. В 1946 г. он начал электроразведочные работы на территории графства Дорсетшир и с минимальными расходами открыл десять неолитических поселений. С тех пор арсенал геофизических методов и приборов, применяемых археологами, значительно обогатился. Это позволило картировать обширные пространства, составить планы нераскопанных памятников площадью в десятки и сотни тысяч квадратных метров. С другой стороны, ультравысокая чувствительность физических приборов обеспечивает поиски очень малых предметов, иногда массой всего лишь в грамм. Задачи, связанные с разведкой самых больших и поисками самых малых объектов, относятся к особенно трудным в археологии.

Рассмотрим, как был начерчен план погребенного под землей стадиона в Карфагене. Главный город государства, некогда занимавшего север Африканского континента, Карфаген был полностью разрушен в 146 г. до н. э. Три года длилась третья пуническая война, в результате которой римляне, несмотря на отчаянное сопротивление карфагенян, овладели их столицей. Из 700 тыс. ее жителей в живых осталось лишь 50 тыс., все они были проданы в рабство. Карфаген сравнивали с землей, и территорию перепахали. По распоряжению римского сената была устроена специальная церемония, на которой полководец Сципион Младший, прозванный Африканским, объявил, что всякий, кто поселится на месте бывшего Карфагена, будет проклят.

Однако район Карфагена пустовал недолго. На севере Африки образовалась римская провинция, ее центром стал новый Карфаген, построенный римлянами. За сто лет с лишним, к началу новой эры, римский Карфаген превратился в большой и процветающий город. Греческий географ Стабон писал о нем, как о втором после Рима городе империи. Римские императоры следили за благоустройством Карфагена. Так, по приказу императора Адриана построили акведук длиной около 140 км, часть этого сооруже-

ния с арками высотой 40 м сохранилась до наших дней. Также при Адриане, в начале II в. до н. э., в Карфагене был возведен огромный театр. Скопированный с римского Колизея, он вмещал несколько десятков тысяч зрителей.

Римский Карфаген славился не только театром. В нем было много великолепных храмов, воздвигнутых в честь различных богов и богинь. Интенсивно развивался при римлянах карфагенский порт. А на западной окраине находился стадион. В те времена его называли цирком, но арена здесь была не круглой, а сильно вытянутой. Может быть, правильнее называть это сооружение ипподромом, так как именно конные скачки сделали карфагенский цирк знаменитым. Стадион, несомненно, играл важную роль в общественной жизни Карфагена, поэтому его изучение вызывает неослабевающий интерес. Чтобы проследить историю этого уникального и грандиозного сооружения, нужно ответить на многочисленные вопросы, связанные с планировкой стадиона, его архитектурой, особенностями применявшихся строительных конструкций. До недавнего времени такие ответы были весьма приблизительными или отсутствовали совсем.

С середины III в. римский Карфаген постепенно приходит в упадок. В начале V в. в Северную Африку вторглись переправившиеся через Гибралтарский пролив варвары, которые захватили город. Впоследствии Карфагеном владела Византия, а позднее — арабы. Сейчас на месте Карфагена находится Тунис, столица одноименного государства. Значительная часть древнего Карфагена расположена в столичных пригородах. Развалины стадиона скрыты под мощным слоем земли на окраине Туниса. На поверхности от него почти ничего не осталось.

Французские историки и археологи, а также специалисты из других стран неоднократно принимались за изучение карфагенского стадиона. Больших раскопок здесь никогда не проводили прежде всего из-за гигантских размеров объекта. Однако полученные в разное время сведения и сделанные на их основе выводы были скудными и противоречивыми. Даже в вопросе о габаритах стадиона у исследователей не сложилось единого мнения. При оценке длины называли разные цифры — от 500 до 700 м. Оценивая ширину, приводили значения от 90 до 107 м. Трудно было ответить на вопрос о вместимости стадиона, для этого требовалось знать площадь трибун и число рядов. Французский археолог А. Лезин, специалист по древнеримской архитектуре в Африке, опубликовал в 1961 г. статью, где подсчитал, что стадион вмещал 83 тыс. зрителей. Как выяснилось после геофизическо-

го картирования укрытых на глубине остатков стадиона, эта цифра оказалась сильно заниженной.

В 1972 г. по приглашению ЮНЕСКО в Тунис прибыла комплексная экспедиция из Польши. Экспедиция была организована Институтом истории материальной культуры Польской академии наук. В нее входили два профессора-археолога, три геофизика, а также специалист по радиоэлектронике.

Шесть ученых провели в Тунисе 4 мес и исследовали с помощью геофизических методов в пригородной зоне столицы общую площадь размером 320 тыс. м<sup>2</sup>. Примерно две трети площади приходились на территорию, которую в прошлом занимал карфагенский стадион. Именно здесь и были получены самые полные и интересные результаты. Для обработки результатов использовалась ЭВМ, которая помогла согласовать полученные данные и нарисовать карту электрического сопротивления, характеризовавшую всю исследованную площадь. Составленная карта позволила локализовать все подземные объекты, погрешность в определении местонахождения отдельных элементов конструкции стадиона не превышала метра. При огромных размерах сооружения достигнутой точности можно было считать вполне достаточной. На основе карты распределения кажущегося электрического сопротивления и был начерчен план всего древнеримского спортивного комплекса. План карфагенского стадиона содержит много интересной информации. Теперь удалось точно определить габариты стадиона: его полная длина составляла 550 м, а ширина 148 м. Полное число мест должно заключаться в интервале от 130 до 143 тыс. Даже меньшая из этих цифр показывает, что стадион римского Карфагена превосходит по вместимости трибун современные спортивные сооружения. План, составленный на основе геофизических данных, включает в себя и окрестности карфагенского стадиона.

Сразу же по завершении геофизических исследований экспедиция провела небольшие раскопки на ряде участков территории карфагенского стадиона с выявленными аномалиями. Это были не раскопки в обычном понимании, а, скорее, пробное археологическое зондирование. Оно принесло немало ценных результатов. Удалось обнаружить основания нескольких стен, а также уточнить их геометрические размеры, некоторые архитектурные детали и конструктивные особенности. В обломках окаменевшей обмазки нашли кусочки греческой мозаики. Это показывало, что при строительстве здесь использовали материал более ранних, уже снесенных зданий Карфагена. Уточнили время сооружения

стадиона — начало II в. н. э. Следовательно, стадион просуществовал по крайней мере четыре столетия.

**Определение возраста находок по радиоактивным «долгожителям» и палеомагнетизму.** Невозможно представить себе исторические изыскания без решения вопроса о датировании объектов исследования. Любая находка, сделанная археологом, требует определения возраста. Иногда достаточно ограничиться относительной датировкой, однако значительно большую научную ценность имеет установление абсолютного возраста. Абсолютное датирование позволяет сопоставить уровни развития пространственно разобщенных цивилизаций.

Наиболее точные оценки абсолютного возраста дают *изотопные методы*. Их называют также *методами ядерной геохронологии*, поскольку главная область применения этих методов связана с определением возраста горных пород и минералов. Ядерная геохронология использует явления радиоактивного распада ядер и обусловленного им превращения одних элементов в другие. Скорость радиоактивного распада у каждого изотопа строго постоянна во все геологические эпохи, она не зависит от внешних условий (давления, температуры и т. п.); на этом основании показания ядерных «хронометров» могут считаться весьма надежными.

В настоящее время для датирования геологических объектов применяют целый ряд изотопных методов. Некоторые из них успешно зарекомендовали себя в археологии, палеоэтнографии, палеоантропологии. Для определения возраста вулканических или осадочных отложений, среди которых залегают, например, остатки стоянки первобытного человека, ядерно-хронологические методы используются в том же виде, что и для решения чисто геологических задач.

Пригодность того или иного изотопного метода зависит от времени существования объекта исследования. При изучении событий, отстоящих от наших дней примерно на миллион лет, нужно применять датирование по радиоактивным изотопам с большими периодами полураспада. К радиоактивным «долгожителям» относятся изотопы урана, а также один из изотопов калия.

Помимо изотопных методов в археологии используют и другие физические методы определения возраста, в числе которых — *палеомагнитный*. Горные породы, образованные в прошлые геологические эпохи, намагнитились под действием существовавшего в те времена магнитного поля Земли и сохранили приобретенную (остаточную) намагнитченность. Особое значе-

ние имеет направление остаточной намагниченности. Дело в том, что через некоторые интервалы времени (довольно длительные) магнитное поле Земли меняло свою полярность. Таким образом, измерение остаточной намагниченности горных пород предоставляет геохронологическую информацию.

Описанными выше методами было произведено датирование событий, относящихся к начальному периоду истории человечества. Определение абсолютного возраста стоянок первобытного человека и других следов, оставленных древнейшими людьми, — не простая задача. Ее решение основывается на использовании особенностей распада долгоживущих изотопов калия (калий-аргоновое датирование) и урана (датирование по трекам спонтанного деления), а также явления палеомагнетизма.

**Радиотермолюминесценция проверяет подлинники и выявляет подделки.** Физические методы исследования вещества и прежде всего те из них, в которых регистрируется индуцированное излучение, заняли видное место в изучении старинной керамики, скульптуры, бронзы, ювелирных изделий, картин и других предметов искусства. Искусствоведы и историки весьма заинтересованы в привлечении надежных и объективных способов диагностики материальной основы художественных ценностей. Одна из причин этого — необходимость борьбы с фальсификаторами. Известно, что стоимость старых произведений искусства растет фантастическими темпами.

Не последнюю роль в нелегальном бизнесе играют подделки художественных ценностей. Это связано с тем, что новые произведения искусства, обладающие высокой художественной ценностью, появляются редко. В то же время техника фальсификации настолько усовершенствовалась, что отличить копию от оригинала бывает чрезвычайно трудно. Здесь-то и оказываются полезными экспертизы с участием физиков и химиков.

В деле проверки подлинности произведений искусства существенное значение имеют исследования элементного состава объектов и определение их абсолютного возраста. Таким образом, мы снова встречаемся с вопросами датирования. Большие успехи в выявлении подделок достигнуты при использовании метода радиотермолюминесценции, который заключается в следующем.

В отличие от песчаников, известняков и иных осадочных пород глины содержат значительное количество естественных радиоактивных элементов: урана, тория, а также радиоиотопа  $K^{40}$ . Ядерное излучение этих элементов возбуждает атомы других эле-

ментов. Чем больше прошло времени, тем больше энергии должно накопиться в данном веществе. Чтобы освободить эту энергию, достаточно быстро нагреть вещество. Тогда высвечивается электромагнитное излучение, которое можно зарегистрировать фотоэлектронным умножителем. Радиотермолюминесценция заключается в поглощении веществом энергии ядерного излучения и в последующем излучении световых фотонов при нагревании.

Обжиг любого глиняного изделия переводит атомы всех элементов в равновесное состояние. Непосредственно после обжига в керамических изделиях начинают образовываться возбужденные атомы, их число и используется для определения возраста. Очевидно, что предметы, изготовленные много сотен лет назад, должны давать при быстром нагревании значительно больший радиотермолюминесцентный эффект, чем предметы, созданные недавно.

**Физика и нумизматика.** Будучи одной из исторических дисциплин, нумизматика рассматривает существовавшие в прошлом денежные системы, их становление и развитие, эволюцию монетного дела. Способствуя изучению торговли и международных связей в различные эпохи, нумизматика дает важный материал для решения проблем экономики, археологии, истории, искусствоведения, языкознания.

В течение последних десятилетий физики многих стран проявляют к старинным монетам неослабевающий интерес, музеи охотно предоставляют свои коллекции для исследования, так как сейчас используются неразрушающие методы. Для таких ядерно-физических видов анализа, как *нейтронно-активационный* или *гамма-активационный*, не требуется специальных образцов. Если монету облучить потоком нейтронов или гамма-лучей, а затем измерить спектр фотонного излучения, обусловленного распадом возникших изотопов, то нетрудно получить данные о содержании целого ряда химических элементов. Поскольку при этом достаточно обойтись кратковременным облучением в потоке нейтронов или гамма-лучей с относительно небольшой плотностью, то в монете образуются лишь короткоживущие изотопы. Они распадаются довольно быстро, и никаких следов от радиационного воздействия на монету не остается.

С помощью ядерно-физических методов проверены тысячи коллекционных монет и получено множество интересных, иногда совсем неожиданных, результатов. Приведем конкретный пример.

В 1970 г., в бейрутском антикварном магазине было приобретено 50 серебряных монет, многие из них выглядели неказисто и

были деформированы, а у некоторых были отломлены более или менее крупные фрагменты. Но когда коллекцию посмотрели эксперты-нумизматы, выяснилось, что монеты представляют собой громадную историческую ценность. По единодушному мнению специалистов, они относятся к самому раннему периоду монетного дела в мире, их возраст приближается к 2,5 тыс. лет. На это указывали прежде всего изображения совы и черепахи, многократно встретившиеся на монетах. Известно, что сова чеканилась на афинских монетах в V в. до н. э., а черепаха — на монетах острова Эпины, где появились первые монеты Древней Греции.

Эпинские и афинские монеты V в. до н. э. чрезвычайно редки, поэтому их неожиданное обнаружение, да еще в большом количестве, можно было объяснить только одним: где-то недавно найден клад. В пользу такого объяснения говорили и другие поступления к нумизматам разных стран, относившиеся к тому же году. Как и в случае бейрутской коллекции, их составляли древнегреческие монеты.

Мало-помалу раскрылся первый секрет необычного клада. Оказалось, что в начале лета 1969 г. трое рабочих-египтян обнаружили в Асьюте, который находится в 350 км к югу от Каира, искусно сделанный тайник, в котором были спрятаны более 900 монет и несколько слитков из чистого серебра. Впоследствии удалось установить дату захоронения клада — приблизительно 475 г. до н. э. Тайник был устроен, бесспорно, богатым по тем временам человеком.

Значительная часть монет, обнаруженных в Асьюте, — 118 экземпляров — подвергалась детальному исследованию с помощью методов нейтронно-активационного, атомно-абсорбционного и масс-спектрометрического анализа. Инициатором этого эксперимента был профессор Вольфганг Гентнер из Института ядерной физики в Гейдельберге. С Гентнером, специалистом в области ядерной физики, работали Отто Мюллер и Гюнтер Вагнер, первый из них — химик, а второй — геолог.

Гейдельбергские ученые поставили перед собой несколько задач. Прежде всего предстояло идентифицировать источники серебряных руд, которыми располагала Древняя Греция. Далее, нужно было найти ответы на ряд важных вопросов. Где находились главные месторождения серебра, металл которых шел на изготовление монет? Ограничивались ли греки собственным серебром или же им приходилось его импортировать? Насколько чистым и свободным от посторонних примесей является серебро в монетах, отчеканенных без малого 25 столетий назад? Одинаков

ли металл в монетах, выпускающихся в разных древнегреческих полисах?

На все эти вопросы в результате проведенных изысканий были получены ответы.

**Нейтроны уточняют обстоятельства смерти исторических личностей.** В 1692 г. И. Ньютон, только что отметивший пятидесятилетие, тяжело заболел. Болезнь, тянувшаяся более года, была серьезной и непонятной. Она подорвала физические силы ученого, нарушила его душевное равновесие. Биографы называют период 1692 — 1693 гг. «черным годом» в жизни И. Ньютона. Он потерял сон и аппетит, находился в состоянии глубокой депрессии, избегал контактов даже с близкими друзьями. Временами он испытывал нечто вроде мании преследования, а иногда его начинала подводить память. К этому периоду относятся довольно странные письма Ньютона, все исследователи отмечают их «иррациональный характер».

Ни сам ученый (после того как непонятная болезнь прошла, И. Ньютон прожил еще 33 года), ни те, кто занимался изучением его жизни и творчества, не смогли объяснить причины заболевания. Одно время считали, что И. Ньютон испытал нервный шок, получив известие о смерти матери. Точная дата ее смерти долго оставалась неизвестной, но в конце концов выяснилось, что она умерла в 1679 г., т. е. за тринадцать лет до болезни Ньютона. Предполагали, что И. Ньютон перенес нервное потрясение, когда во время пожара сгорели его рукописи, это действительно имело место, но тоже задолго до 1692 г.

В 1979 г. группа американских и английских исследователей выдвинула предположение о том, что болезнь И. Ньютона была связана с отравлением ртутью. Они еще раз внимательно изучили письма ученого 1692 и 1693 гг., особенно те места, где он описывает симптомы болезни. Кроме того, заново просмотрели собственноручные записи И. Ньютона в дневниках и тетрадах, в которых он фиксировал данные экспериментов. Нужно было уточнить, с какой целью и с какими реактивами работал И. Ньютон, ставя химические опыты.

Первый химический опыт был осуществлен И. Ньютоном, когда ему было 26 лет, в конце 1678 г. Затем на протяжении 18 лет И. Ньютон часто обращался к химии, а также к алхимии. Ртуть и ее минералы играли в опытах И. Ньютона ведущую роль. Из записей в рабочих тетрадах следовало, что нередко ученый работал с большим количеством ртутных соединений, подолгу нагревал их, чтобы получить летучие вещества. Разумеется, никаких вытяжных

шкафов в то время не существовало, и вредные пары и газы наполняли лабораторию. Более того, судя по записям, И. Ньютон часто пробовал на вкус то, что у него получалось: в рабочих тетрадях 108 раз встречаются заметки типа «вкус — сладковатый», «безвкусно», «солонатовато», «очень едкое». Большая серия алхимических экспериментов с неизменным участием ртути, сурьмы и других токсичных элементов датирована в записях 1692 г. Как по письмам И. Ньютона, так и по дошедшим до нас воспоминаниям современников получалось, что симптомы болезни напоминают признаки ртутного отравления.

Чтобы проверить гипотезу об отравлении, решили исследовать волосы И. Ньютона. Найти их удалось сравнительно легко. Оказалось, что две пряди волос И. Ньютона хранятся у графа Портсмутского, а еще несколько — в библиотеке Тринити-колледжа в Кембридже. Владельцы согласились предоставить часть волос для анализа. Имелись веские доводы, что волосы действительно принадлежали Исааку Ньютону. Особенно это касалось графских семейных реликвий — внучатая племянница И. Ньютона Екатерина вышла замуж за некоего Джона Уоллопа, ставшего первым графом Портсмутским. У Екатерины было много рукописей и личных вещей ученого, они передавались по наследству. Волосы из коллекции графа и из библиотеки в Кембридже отличало внешнее сходство, все они были серебристо-белыми и очень тонкими (известно, что у И. Ньютона появилась седина, когда ему было чуть более 30).

Сотрудник английского ядерного центра в Олдермастоне Ч. Паундс провел нейтронно-активационный анализ полученных волос. Каждый из 15 волосков анализировался в отдельности. Использование интенсивного потока нейтронов ядерного реактора для облучения и полупроводникового спектрометра для измерения облученной активности позволило определить концентрацию целого ряда элементов. Сначала для определения натрия, хлора, марганца, брома, цинка и алюминия применялся неразрушающий метод анализа: образцы облучались нейтронами в течение получаса, а затем непосредственно по гамма-спектрам активированных образцов измерялась концентрация перечисленных элементов. С помощью неразрушающего анализа удалось также измерить концентрацию золота и ртути, но для них длительность облучения пришлось увеличить до пяти дней. Для определения концентрации мышьяка, сурьмы и серебра потребовалась радиохимическая обработка облученных образцов: после длительного (от 5 до 14 дней) облучения нейтронами образцы волос подверглись

разложению, названные элементы отделялись от других, после чего выделенные активности измерялись.

Результаты анализа показали, что в волосах И. Ньютона концентрации металлов с высокой токсичностью значительно превышают нормальный уровень. Но наибольшее отклонение от нормы дала ртуть, в исследованных волосах ее средняя концентрация составляла 0,0075%, а максимальная доходила даже до 0,02%. Полученные данные подтвердили предположение о том, что в течение некоторого времени И. Ньютон перенес тяжелые последствия довольно сильного ртутного отравления.



### **ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ВЫВОДЫ**

1. Физика оказала огромное влияние на другие науки, обеспечив их быстрое развитие.
2. Месторасположение археологических памятников можно определить с помощью электромагнитного поля.
3. Возраст археологических находок определяют изотопным и палеомагнитным методами.
4. Физические методы исследования, в частности с использованием радиотермолюминесценции, применяются при проверке подлинников произведений искусства.
5. Используя нейтронно-активационный анализ волос, уточняют обстоятельства смерти исторических личностей.



### **КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ**

1. Какую роль играет физика в современном обществе?
2. Какое влияние оказывает физика на развитие вашей личности?
3. Какие физические методы исследования произведений искусства, памятников истории и архитектуры вы знаете?
4. Нужна ли физика художнику и музыканту?
5. Есть ли основания утверждать, что нередко физики дописывают историю?
6. В чем заключается единство мира и красоты?

### 21.1. Научно-технический прогресс и проблемы экологии

На протяжении многих столетий искусственные, т. е. антропогенные, источники загрязнения окружающей среды не оказывали заметного воздействия на экологические процессы, хотя некоторые отрасли индустрии, в частности металлургия и обработка металлов, были довольно широко распространены еще до нашей эры. Наибольшее значение в те времена имели производства металлов (меди, серебра, золота, свинца, олова, железа, сурьмы, ртути), стекла, мыла, гончарных изделий, красок, хлеба, вина и некоторых других продуктов. Как правило, указанные продукты получали в результате окислительно-восстановительных реакций, условия протекания которых определялись эмпирическим путем. В атмосферу выделялись такие соединения, как окислы углерода, серы и азота, пары металлов, в частности ртути, в водоемы попадали отходы красильных и пищевых производств.

Первым законом об охране окружающей среды принято считать вердикт английского короля Эдуарда IV (1273), запрещающий использование каменного угля для отопления жилищ Лондона. За его нарушение полагалась смертная казнь.

До XVIII в. основными источниками загрязнения окружающей среды были бытовые сточные воды, а также продукты сгорания топлива, применяемого для отопления помещений: окись и двуокись углерода, сажа, зола, а также сернистый ангидрид в районах, где применялся каменный уголь. Накапливание отходов еще существенно не влияло на общую экологическую обстановку.

Интенсивное загрязнение окружающей среды начинается со второй половины XIX в. С изобретением паровой машины промышленность постепенно становится все более значительным

источником загрязнений, так как резко возрастает потребление топлива. Развитие черной металлургии сначала с использованием древесного угля, а затем кокса вносит свой вклад в общее загрязнение атмосферы. Интенсифицируется развитие сопряженных с металлургией отраслей, таких как добыча угля, добыча и производство концентратов и шихтовых материалов, наконец, возникает коксохимия, что приводит к образованию сточных вод и твердых отходов. В связи с развитием железных дорог все более значимым источником загрязнения атмосферы становится транспорт. В этот период число ингредиентов-загрязнителей медленно увеличивается вместе с ростом их общего количества.

С появлением двигателей внутреннего сгорания и крупных тепловых электростанций, а также в связи с дальнейшим развитием химической промышленности качественный состав загрязнителей существенно изменился. В воздушный бассейн стали выбрасывать значительное количество оксидов азота, соединений свинца и ртути, а также аммиак, сероводород, углеводороды, альдегиды, бенз(α)пирен и др.; в водоемы поступало большое количество различных химических соединений. Появились горы золошлаковых отходов и терриконы, первые «белые моря» содового производства, были построены шлакоаккумуляторы.

Потребительским отношением к природе, неразумным вмешательством в нее человек создал многие экологические проблемы, которые теперь вызывают оправданную тревогу.

Ежегодно в результате сжигания топлива в атмосферу поступает 20 млрд т диоксида углерода. Только при использовании угля и мазута выделяется более 150 млн т сернистого газа. Каждый год в реки сбрасывается около 160 км<sup>3</sup> промышленных стоков. За такой же отрезок времени в почвы вносится свыше 500 млн т минеральных удобрений и примерно 3 млн т ядохимикатов, треть которых смывается в воды суши и океана.

Наблюдаются опасные явления, которые могут радикально изменить облик планеты, угрожают существованию многих видов растений и животных, представляют опасность и для человеческого рода. Ежегодно примерно 6 млн га производительных земель превращается в пустыни. Через три десятилетия площадь, подвергающаяся таким образом опустыниванию, будет примерно равна площади Саудовской Аравии. Ежегодно губится более 11 млн га леса, и через три десятилетия площадь уничтоженных лесов будет приблизительно равна площади Индии. Значительная часть территории, на которой ранее росли леса, превращается в сельс-

кохозяйственные земли низкого качества, которые не могут прокормить живущих на этих землях людей.

В Европе кислые осадки уничтожают леса и озера, наносят ущерб художественному и архитектурному наследию наций; не исключается вероятность того, что вследствие подкисления почвам на громадных участках был нанесен практически непоправимый ущерб.

В результате сжигания минерального топлива в атмосферу выбрасывается диоксид углерода, что является причиной постепенного глобального потепления климата. В результате такого «парникового эффекта» средние глобальные температуры могут возрасти в XXI в. настолько, что изменятся районы сельскохозяйственного производства, моря выйдут из берегов и затопят прибрежные города, экономике будет нанесен серьезный ущерб.

Другие газы промышленного происхождения способны повредить защитный озоновый слой планеты, в результате чего резко возрастет число заболеваний человека и животных раком.

**Озоновый слой** (озоносфера) — находящийся на высоте 10...50 км слой атмосферы с максимальным количеством озона. Своим существованием обязан деятельности фотосинтезирующих растений и действию на кислород ультрафиолетовых лучей. Озоновый слой защищает все живое на Земле от губительного действия этих лучей. В последние годы ученые обеспокоены тем, что толщина озонового слоя постепенно уменьшается.

В 1986 г. английским исследователем Дж. Фарманом была обнаружена озоновая дыра — разрыв в озоновом слое атмосферы Земли (диаметром свыше  $10^3$  км), возникший над Антарктидой и перемещающийся в населенные районы Австралии. Озоновая дыра возникла, предположительно, в результате антропогенного воздействия, в том числе широкого использования в промышленности и быту хлорсодержащих хладонов (фреонов), разрушающих озоновый слой. Озоновая дыра представляет опасность для живых организмов, поскольку озоновый слой защищает поверхность Земли от чрезмерных доз ультрафиолетового излучения Солнца. В 1992 г. озоновая дыра обнаружена также над Арктикой, а в 1996 г. — и над центральными районами России.

Одной из актуальных и серьезных проблем, которую следует решать незамедлительно, является органическое загрязнение. Это хлоруглеводороды, диоксиды, углеводороды, полициклические ароматические углеводороды, являющиеся результатом сжигания природного топлива. Все они обладают мутагенными и канцерогенными свойствами.

Ученые Земли обеспокоены такими процессами, происходящими в природе. Растущая индустриализация отравляет атмосферу, загрязняет реки, озера, моря. Добыча полезных ископаемых разрушает покров Земли. Гидроэлектростанции изменяют географию целых регионов. Слишком часто неразумно и бесхозяйственно вырубаются лес. Неграмотное ведение сельского хозяйства вызывает эрозию почв. Различные химикаты изменяют состав земли и воды. Мы строим города и дороги, отнимая у живой земной растительности все большую территорию. Каждый день один вид мелких животных, каждый год один вид крупных уходит в небытие. Человечество испытывает нехватку в землях, пригодных для сельского хозяйства, а ведь население Земли неуклонно растет.

Если климат Земли потеплеет только на один градус, сразу же пострадают неустойчивые природные системы, расположенные в тропической зоне. Достаточно лишь на несколько процентов сократиться количеству осадков, и жизнь на значительных пространствах исчезает. Так в свое время закончила свое существование населенная Сахара, на территории которой находилась целая цивилизация. Следовательно, надо знать не только существующие тенденции изменения среды, но и то, как они будут трансформироваться в будущем.

В 1875 г. австрийский геолог Э. Зюсс ввел понятие «биосфера». Он выделил биосферу в качестве самостоятельной оболочки Земли (наряду с литосферой, гидросферой и атмосферой), в которой живые организмы и среда их обитания органически связаны и взаимодействуют друг с другом. Наибольший вклад в науку о биосфере внес выдающийся отечественный естествоиспытатель В. И. Вернадский. Еще в 1926 г. им была опубликована книга «Биосфера», в которой он рассмотрел закономерности функционирования биосферы как единой системы с определяющей ролью живого вещества. Четких границ биосфера не имеет. На континентах ее нижняя граница уходит на глубину до 2...3 км, а под океанами достигает глубин 0,5...1 км. Верхней границей биосферы служит озоновый экран, располагающийся на высоте 23...25 км над уровнем моря.

Несмотря на колоссальные экологические резервы биосферы, некоторые антропогенные воздействия приводят к резко отрицательным последствиям, с которыми она справиться не в состоянии (во всяком случае, быстро). В этом отношении большое значение имеет загрязнение окружающей среды химическими веществами. Не меньший, а иногда и больший ущерб наносит интенсивное, нерациональное использование природных ресурсов, при

котором может подрываться сама возможность природы к их воспроизводству, если они возобновляемые; а невозобновляемые ресурсы будут исчерпываться, истощаться быстрее, чем человеческое общество сумеет соответственно перестроить экономику, свою хозяйственную деятельность.

Экологи одними из первых осознали эти проблемы. К этому предрасполагает сама их наука, изучающая единство жизни, взаимоотношения природы и общества, животных, растений и человека и их отношение к среде обитания, взаимоотношения человека с окружающей средой.

Человечество подходит к такому рубежу, где его ждет революционный переход (он уже начат) к природосберегающим, экологически обоснованным технологиям, производствам, проектам, к тому, чтобы деятельность человека вписывалась в природные процессы, а не подавляла их.

На основе широкого использования новейших достижений научно-технического прогресса появляется возможность создания новой прогрессивной технологии, соответствующего ей аппаратного оформления, базирующегося на них производства, которые по своему существу становятся экологически чистыми, не несут ущерба окружающей среде. Реальным является одновременное решение экономических, технических, организационных и экологических проблем развития общественного производства при меньших затратах.

Развитее биотехнологии будет иметь серьезные последствия для окружающей среды. Продукты генной инженерии могут существенно улучшить здоровье людей и животных. Исследователи находят новые лекарства, методы терапии и способы борьбы с переносчиками болезней. Новые высокоурожайные виды зерновых, а также сорта, устойчивые к неблагоприятным климатическим условиям, могут привести к коренным изменениям в сельском хозяйстве. Более доступными станут комплексные методы борьбы с сельскохозяйственными вредителями. Биотехнология может также обеспечить экологически безвредные и эффективные альтернативы многим неэкономичным процессам и продуктам, являющимся источником загрязнения. Новые методы обработки твердых и жидких отходов могут помочь решить и насущную проблему их удаления.

В лаборатории конструирования и моделирования замкнутых систем Института биофизики Сибирского отделения РАН разработан оригинальный способ выращивания тионовых бактерий, способных окислять железо и сульфиды различных металлов.

Биомасса таких бактерий может использоваться в биометаллургии для выщелачивания сульфидных руд и концентратов цветных металлов.

Достижения в космической технологии также являются многообещающими. Прогнозы погоды, предоставляемые через сеть спутников и другие средства связи, помогают людям принимать решения о том, когда сеять, поливать, вносить удобрения и собирать урожай. Дистанционное зондирование и спутниковые съемки могут обеспечить оптимальное использование ресурсов Земли, позволяя производить мониторинг и оценку долгосрочных тенденций в изменениях климата, загрязнении морской среды, темпах эрозии почвы и растительного покрова.

Особенно актуальной становится проблема комплексного, рационального использования природного сырья.

К мероприятиям по комплексному использованию природного сырья следует отнести создание и внедрение малоотходных и замкнутых технологий, организацию использования вторичных ресурсов. В настоящее время в нашей стране проводится работа по вовлечению в народнохозяйственный оборот многотоннажных отходов, вредных для окружающей природы и заменяющих дефицитные виды сырья и материалов.

Основными направлениями использования отходов производства и улавливаемых очистными установками веществ являются возврат их в производстве в качестве сырья и полупродуктов, использование в качестве готового продукта и топлива; в сельском хозяйстве — в качестве регуляторов роста растений и для нейтрализации почв; в производстве строительных материалов — как исходное сырье. Таким образом, проблема рационального использования вторичных материальных ресурсов (и на основе этого сокращение потребности в первичных, в том числе и природных) сочетает интересы охраны природы с повышением экономической эффективности производства.

Большое значение имеет использование новых, наиболее эффективных физических, химических или биологических принципов действия в том или ином производстве или процессе. Примером может служить совершенствование методов водоочистки за счет перехода от испарительных систем к мембранным технологиям. Эффективность затрат при решении задач подобного класса возрастает в 8 — 10 раз.

В нашей стране разработаны методы комплексного энерготехнического использования низкосортного твердого топлива, из которого с помощью термического разложения получают каче-

ственное твердое, жидкое и газообразное топливо, а также сырье для химической промышленности и производства строительных материалов. Зольный остаток используется в сельском хозяйстве.

Ускорение научно-технического прогресса дает в распоряжение государства огромные возможности в развитии производительных сил, совершенствовании человеческой личности, построении гармоничных отношений с природой. Глобальная экологическая проблема может быть решена. Но для этого нужны мир, разоружение, осознанные совместные усилия всех государств. Опыт сотрудничества стран земного шара в благородном деле охраны окружающей среды свидетельствует о том, что сделаны лишь первые шаги в нужном направлении.

Охрана природы требует активной жизненной позиции каждого человека, каждого государства, ныне живущих и будущих поколений всей планеты. И на этом пути предстоит еще многое сделать.

## **21.2. Виды и запасы энергетических ресурсов на Земле**

Энергетические ресурсы Земли — этот продукт непрерывной деятельности Солнца — могут быть разделены на две основные группы: аккумулированные природой, в большинстве случаев невозобновляемые, и неаккумулированные, но постоянно возобновляющиеся. К первой группе относятся запасы горючих ископаемых (нефть, каменные и бурые угли, сланцы, торф, подземные газы), термоядерная и ядерная энергия; ко второй — бурные потоки рек, морские волны и приливы, солнечное излучение, тепловая энергия Земли, морей и океанов, ветер, растительный и животный мир. Запасы аккумулированных ресурсов в земных недрах ограничены; неаккумулированные, постоянно возобновляющиеся — практически неисчерпаемы.

Из всех видов энергии в значительных масштабах используются только энергия органических видов топлива и энергия текущей воды рек. В то же время ежегодный приток энергии солнечных лучей, достигающих земной поверхности, примерно в десять раз превышает все потенциальные запасы энергии органических горючих и примерно равны потенциальным запасам ядерной энергии. В последние десятилетия интенсивно работают над проблемой управляемого термоядерного синтеза. Однако в ближайшем

будущем создание большого числа управляемых термоядерных реакторов является проблематичным.

С течением времени запасы невозобновляемых источников энергии будут уменьшаться, и это неизбежно приведет к увеличению удельного веса возобновляемых источников энергии в общем энергетическом балансе нашей планеты.

Прав был К. А. Тимирязев, отмечая, что каждый луч Солнца, не пойманный, а бесплодно отразившийся назад в мировое пространство, — кусок хлеба, вырванный изо рта отдаленного потомка.

Таково общее положение в области запасов энергии.

Рост промышленности — основы цивилизации — невозможен без опережающего развития энергетики. Наряду с общеизвестными благами, которые энергетика приносит людям, стали проявляться и отрицательные явления, теневые стороны количественного роста традиционной энергетики. Около 80% всех видов загрязнения биосферы обусловлены энергетическими процессами, включая добычу, переработку и использование топлива.

Наша страна относится к тем немногим индустриальным государствам, которые полностью обеспечивают себя топливом и энергией за счет собственных энергоресурсов. Это создает основу устойчивого развития народного хозяйства на длительную перспективу.

В ближайшие годы нагрузка на ресурсный потенциал планеты существенно возрастет. Абсолютные объемы потребления угля, нефти, природного газа значительно увеличатся.

Современная энергетика в качестве топлива использует в основном горючие ископаемые, по сути дела, аккумулярованную солнечную энергию. Главное их преимущество состоит в высокой концентрации энергии в единице вещества. Концентрация энергии в химическом органическом топливе составляет до  $10^4$  Вт·ч на 1 кг массы. За счет сжигания топлива вырабатывается электрическая и тепловая энергия при сравнительно небольших капиталовложениях. Органическое топливо могло бы служить основой энергетики и в будущем, если бы запасы не были ограничены.

Однако, исходя из разведанных запасов топлива, при таких же темпах его добычи в будущем можно установить, что приблизительно через 80 лет все природные топливные ресурсы мира будут исчерпаны. Так как число разведанных месторождений ежегодно возрастает, этот срок может быть увеличен до 150 лет. Любые пессимистические и оптимистические прогнозы сводятся к тому, что запасы горючих ископаемых будут исчерпаны в обозримом будущем.

Необходимость перехода на новые виды энергии диктуется и тем, что современные заводы, электростанции и двигатели внутреннего сгорания выбрасывают в атмосферу в результате сжигания топлива огромное количество углекислоты, сернистого ангидрида, сажи, золы и других вредных веществ.

Основная доля электроэнергии вырабатывается на тепловых электростанциях. В последние годы количество выработанной электроэнергии на ТЭС уменьшается, но их роль в энергетике будет еще долгое время оставаться определяющей. Основным химическим топливом на ТЭС являются уголь, нефть, газ, торф, сланец и др. Большинство крупных тепловых электростанций в настоящее время работают на угле.

Особенно велики угольные запасы в Сибири. Так, балансовые запасы угля в Канско-Ачинском бассейне составляют 115 млрд т. На базе этого месторождения планируется построить ТЭС общей мощностью в  $5 \cdot 10^4$  МВт.

Вторым по значению источником электрической энергии в общем балансе страны являются гидравлические электрические станции.

Электрическая энергия ГЭС самая дешевая, а мобильность ГЭС, т.е. способность в считанные минуты входить в режим, во много раз выше, чем тепловых и атомных станций. Это особенно важно при автоматизированном уровне управления энергосистемами. Немаловажную роль имеет, несмотря на существенные первичные затраты и длительность строительства, достаточно быстрая самокупаемость. Образование водохранилищ при бережном учете всех факторов должно способствовать улучшению обработки земель, принести воду в засушливые районы. К сожалению, развитие гидроэнергетики далеко не всегда сопровождалось у нас бережным отношением к природе. Печальные результаты этого хорошо известны: затопление больших участков плодородных земель при строительстве равнинных гидроэлектростанций, нарушение водного баланса целых регионов, например Арала, и др.

Важное достоинство ГЭС заключается в неиссякаемости энергоресурсов рек и весьма низкой себестоимости вырабатываемой ими электроэнергии. Крупнейшим в России является Ангаро-Енисейский каскад ГЭС суммарной мощностью  $25 \cdot 10^3$  МВт. В него входят Красноярская ГЭС ( $6 \cdot 10^3$  МВт), Братская ( $4 \cdot 10^3$  МВт), Иркутская ( $0,65 \cdot 10^3$  МВт), Усть-Илимская ( $4,3 \cdot 10^3$  МВт), Саяно-Шушенская ( $6,4 \cdot 10^3$  МВт) и др. И все же энергия рек, видимо, не сможет стать основой энергетики будущего. Специалисты считают,

что уже через 100 лет практически все гидроресурсы в разных странах будут задействованы. Даже при этом гидроэлектростанции дадут не более 20% всей требуемой энергии.

В отличие от энергии, получаемой от сжигания органического и переработки атомного топлива, энергия самовозобновляющихся источников не сконцентрирована в определенных местах, а рассеяна на больших пространствах. Это является одной из причин незначительного пока ее использования. Чтобы получить положительный экономический эффект, необходимо создавать крупные накопители энергии. Но существует много потребителей, использующих низкие концентрации энергии, поэтому выработка большого количества энергии, сосредоточенной в определенном месте, не всегда полезна. Действительно, основные источники жизни, такие как земля, вода и кислород, сконцентрированы на больших пространствах. Поэтому для повышения КПД фотосинтеза необходима энергия низкой концентрации, рассеянная на больших площадях. Такая энергия нужна и для поддержания жизнедеятельности растений, животных. Выработка энергии для таких потребителей в одном пункте подчас приводит к весьма нежелательным последствиям, вызванным строительством крупных электростанций, прокладкой железнодорожных путей для подвозки тяжелого оборудования и топлива, сооружением крупных магистральных тепловых и электрических линий и сетей с подстанциями для передачи и распределения энергии, больших резервуаров воды. А это приводит к сокращению площадей плодородных земель, большим капитальным затратам, огромным расходам металла, строительных материалов и т. д. Выработка энергии в одном пункте с последующим ее распределением по площади приводит и к увеличению потерь энергии в результате превращения энергии из одного вида в другой. При этом коэффициент использования всех видов энергетических ресурсов значительно снижается.

Самовозобновляющиеся источники энергии наиболее рационально могут быть использованы в непосредственной близости от потребителей, без передачи энергии на расстояние. Это обстоятельство должно сыграть решающую роль при проектировании систем энергоснабжения отдаленных аграрных районов нашей страны, создании парникового и тепличного хозяйств, опреснительных установок, при добыче материалов из Мирового океана.

Энергия солнечных лучей может быть непосредственно использована как тепловая. Это весьма важно, так как на долю тепловой приходится примерно 75% всей потребляемой энергии. Однако при построении схем энергоснабжения от самовозобнов-

ляющихся источников энергии, в том числе солнечной, следует учитывать, что энергия солнечных лучей, ветра, морских волн переменна во времени и пространстве.

### 21.3. Атомная и термоядерная энергетика

После пуска в 1954 г. первой в мире атомной электростанции в г. Обнинске был накоплен большой научно-технический и производственный опыт проектирования, сооружения и эксплуатации крупных АЭС различного типа: на тепловых и быстрых нейтронах с разными замедлителями и теплоносителями, рассчитанных на различную мощность. Атомная энергетика стала самостоятельной отраслью электроэнергетического производства и прочно вошла в жизнь человечества. В настоящее время в мире действует более 400 АЭС. Атомные электростанции производят около 20% мировой электроэнергии. Наибольшее число действующих АЭС расположено в США.

До аварии на Чернобыльской АЭС в энергетике ряда стран АЭС играли ведущую роль. Так, в Болгарии на их долю приходится 30% всей производимой энергии, в Швейцарии — 35%, в Швеции — 39%, в Бельгии — 50%, во Франции — 65%.

Но авария в Чернобыле, ряд аварий и инцидентов на АЭС США, Англии, Японии обострили понимание того, что мирный атом требует к себе особого подхода. То же самое относится и к другим современным достижениям технического прогресса, будь то космонавтика, использование сверхвысоких давлений или высокотоксичных веществ. Научно-технический прогресс дает в руки человека все более совершенные и мощные орудия труда, но одновременно требует заметного повышения культуры их использования, иного уровня технического мышления.

АЭС не только экономически выгодны по сравнению с тепловыми при нормальной работе, не только экологически более чистые, но они готовят базу для очередного рывка в технологии. Будущее цивилизации немислимо без мирного использования атомной энергии.

В условиях возрастающей ограниченности невозпроизводимых топливных ресурсов, усложнения и удорожания их добычи удовлетворение потребностей в электроэнергии опирается во все большей мере на ускоренный рост атомной энергетике. Правильность такого пути подтверждает и мировой, и отечественный опыт. Вместе с тем здесь, как ни в одной другой отрасли, огромное значение

имеет определение технической политики, обеспечивающей высокую эксплуатационную надежность атомных электростанций.

Где строить атомные станции? После чернобыльской аварии мнение многих людей было однозначно: подальше от густонаселенных районов страны — в пустынях, тундре, горах. Но у экономики свои законы. Если перевести АЭС в отдаленные районы, то станции потеряют свои преимущества. Стоимость их строительства значительно возрастет, часть вырабатываемой энергии будет теряться при передаче в центр (до 8,5% на 1 000 км). Более того, и в малонаселенных районах нельзя эксплуатировать реактор, в надежности которого не уверены.

Необходим качественно новый подход к предпроектным и проектным разработкам в атомной энергетике. Устранение допущенных на этих этапах ошибок очень дорого обходится государству. Планы размещения АЭС необходимо заранее и всесторонне согласовывать с планами развития всего народного хозяйства, электростанций и тепломеханических производств, учитывать сложившиеся энергетические потребности и тщательно продумывать вопросы обеспечения безопасности. Для повышения безопасности действующих станций необходимо создание специальных электронных систем сбора и анализа информации для диагностики состояния реактора и его отдельных элементов в процессе эксплуатации, а также выдачи рекомендаций операторам по действиям в аварийных ситуациях. Такие системы должны быть оснащены банком данных об отечественных и зарубежных авариях.

Ядерная энергетика — это не только атомные электростанции, но и большой комплекс предприятий, связанных с изготовлением ядерного топлива, его перевозкой, хранением, переработкой облученных материалов, захоронением одних и использованием других радиоактивных отходов. И в этой части ядерного топливного цикла также должно решаться множество задач во имя повышения экономичности и экологической безопасности ядерной энергетике.

В настоящее время при выборе места для строительства АЭС учитывают целый комплекс вопросов: сейсмичность района, наличие достаточного количества воды, более или менее развитой инфраструктуры, определенные удобства для работников станции и их семей и т.д. Известно, что на обслуживание одного реактора требуется примерно 1 000 человек. А если учесть и членов семьи, обслуживающие социально-культурные и медицинские учреждения, то названная цифра увеличится еще минимум в 3 раза. Наконец, требуется найти оптимальное расстояние от потребителей.

Опыт сооружения и эксплуатации атомных электростанций, имеющийся научно-технический задел позволяют приступить к более широкому использованию ядерных энергоисточников в народном хозяйстве.

Атомная энергетика, испытав тяжелый урок Чернобыля, продолжает развиваться, максимально обеспечивая безопасность и надежность.

При нормальной работе в окружающую среду попадают лишь немногие ядра газообразных и летучих элементов типа криптона, ксенона, йода. Установки проектируются и строятся так, чтобы окружающее население не испытывало ущерба своему здоровью.

На АЭС предусматриваются меры для полного исключения сброса сточных вод, загрязненных радиоактивными веществами. В водоемы разрешается отводить только строго определенное количество очищенной воды с концентрацией радионуклидов, не превышающей уровень для питьевой воды. При существующих уровнях сброса радиоактивных изотопов в водоемы — охладители АЭС со средней минерализацией — радиационное воздействие этих сбросов на население незначительно, и данный водоем можно беспрепятственно использовать для целей народного хозяйства.

Большое внимание уделяется разработке замкнутых циклов охлаждения и новым способам отвода тепла, в том числе и воздушно-конденсационным установкам. Важное значение имеет эффективное использование низкопотенциального сбросного тепла АЭС с целью повышения общей эффективности использования установки, самое главное — с целью понижения величины рассеиваемой в окружающую среду энергии. Seriously обсуждается проблема создания крупных комплексов, рассчитанных на максимальное использование тепловых сбросов. В этих комплексах «сбросное тепло» электростанций будет использоваться в различных тепличных хозяйствах, в рыбных водоемах и в других объектах.

Удельный вес атомной энергетике в настоящее время достигает почти 40% в общей выработке электроэнергии в мире. Но и в данном случае речь идет о так называемой «урановой энергетике», в основе которой лежит использование также невозобновляемых и небеспредельных природных запасов урана. Поэтому необходимо сделать все для исследования возможностей использования источников энергии, запасы которых практически неисчерпаемы в природе. Это заставляет ученых искать новые источники энергии.

Одним из них может стать управляемый термоядерный синтез, который откроет путь к неорганическим источникам энергии. Есть сравнительный расчет: современной электростанции мощно-

стью в 1 млн кВт каждый день требуется примерно 750 т угля, или 100 т нефти, или 250 г урана-235, а тяжелого водорода для термоядерного реактора — лишь 34 г. В то же время тяжелый водород — дейтерий — очень распространенное вещество, запасы его практически неисчерпаемы.

О том, какую гигантскую энергию таит в себе термоядерная реакция, люди узнали еще при первых взрывах водородных бомб. И когда ученые решили использовать «термояд» для выработки электроэнергии, казалось, что вот-вот это осуществится. Но прошло более сорока лет, а термоядерный синтез обуздать пока не удалось. Почему?

Следует учесть, что термоядерная реакция протекает при колоссальной температуре — до 100 млн градусов Цельсия. Ученые сумели достичь таких значений в лабораторных условиях. Однако при этом энергию плазмы можно удержать лишь десятые доли секунды: при выключении средств нагрева плазма быстро остывает и реакция прекращается. Хотя и это уже успех, поскольку прежде счет велся на сотые доли. Но чтобы термоядерный синтез стал управляемым, превратился в непрерывный процесс, необходимо продлить время остывания плазмы до 1—2 с, чего можно достичь за счет увеличения ее объема.

К настоящему времени ученые выяснили многие теоретические вопросы. Создано новое направление физики, изучающее плазму — очень подвижное и трудно управляемое газообразное вещество. Дело за воплощением идей. Для управления раскаленной плазмой наши ученые предложили использовать специальные магнитные ловушки, разработали установку «Токамак» (от начальных букв слов «тороидальная камера с магнитными катушками»). Общеизвестно, что путь к управлению термоядерным синтезом наиболее перспективен, поэтому подобные установки созданы в разных странах.

#### **21.4. Экологически чистые возобновимые источники энергии**

Солнечная энергия относится к числу так называемых возобновляемых, или нетрадиционных, источников энергии, ресурсы которых не зависят (не уменьшаются) от деятельности человека. К ним относят также энергию ветра, морских приливов и волн.

Часто возобновляемые источники энергии включают и глубинное тепло Земли — геотермальную энергию, хотя она на самом

деле не является восполняемой. Вероятно, поступают так потому, что ее ресурсы очень велики, практически неисчерпаемы.

Наоборот, хотя гидроэнергия — энергия рек, имеющая солнечное происхождение, с человеческой точки зрения, действительно восполняема, ее все же не включают в это число, может быть, потому, что она никак не может рассматриваться как нетрадиционная: гидроэнергия одной из самых первых была поставлена на службу человеку.

Итак, о солнечной энергии. Сразу же отметим: в ответе на вопрос, будет ли солнечная энергия широко использоваться в энергетике, нет единства. Одни считают: да, будет, другие отвечают: нет, не будет, мотивируя последнее большей рассеянностью солнечной энергии на Земле.

Солнце — самый мощный источник энергии по сравнению со всеми другими, доступными человеку. Полная мощность солнечного излучения равна  $4 \cdot 10^{26}$  Вт, или  $4 \cdot 10^{14}$  млрд кВт. Эта цифра настолько велика, что трудно выбрать для сопоставления с ней какую-либо подходящую величину, привычную для нас в наших земных масштабах. Даже вблизи Земли, на расстоянии около 150 млн км от Солнца, на каждый квадратный метр поверхности, расположенной перпендикулярно солнечным лучам, приходится 1,4 кВт лучистой энергии, а на  $1 \text{ м}^2$  поверхности сферы земли — 0,35 кВт.

Средний радиус Земли равен 6370 км, а поперечное сечение Земли составляет  $127,6 \cdot 10^6 \text{ км}^2$ . Легко подсчитать, что полная мощность солнечной радиации, поступающей на Землю, равна  $178,6 \cdot 10^{12}$  кВт. Из этого следует, что в течение года на Землю в виде лучистой энергии передается  $1,56 \cdot 10^{18}$  кВт·ч. Огромная цифра!

Следует, однако, иметь в виду, что больше половины энергии солнечной радиации не доходит непосредственно до поверхности Земли (суши и океана), а отражается атмосферой. Считается, что на  $1 \text{ м}^2$  суши и океана Земли приходится в среднем около 0,16 кВт солнечной радиации. Следовательно, для всей поверхности Земли солнечная радиация составляет величину, близкую к  $10^{14}$  кВт, или 105 млрд кВт. Эта цифра, вероятно, намного превышает не только сегодняшнюю, но и перспективную потребность человечества в энергии.

Гораздо сложнее вопрос: каким образом ее использовать?

Солнечная энергия может использоваться как для производства электроэнергии (точнее говоря, путем преобразования солнечной радиации в электрическую энергию), так и для отопления

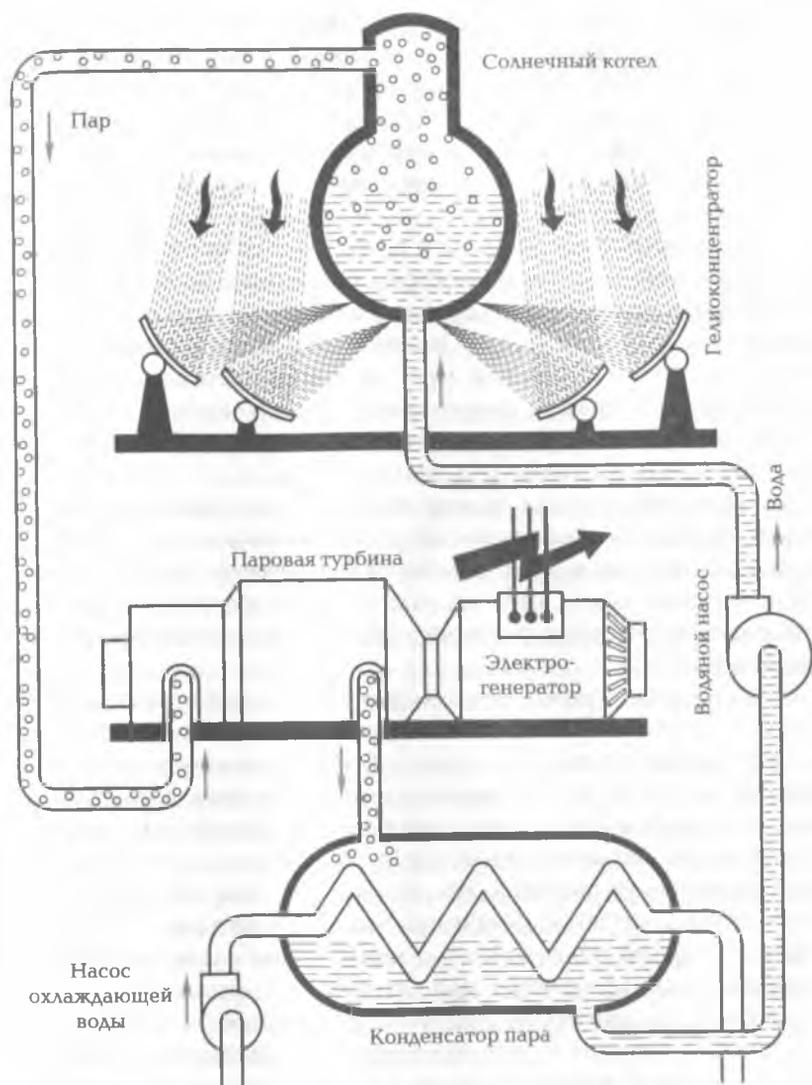


Рис. 21.1

и горячего водоснабжения. Остановимся сначала на первой, более важной, хотя и более трудной задаче: преобразовании солнечной лучистой энергии в электрическую.

В настоящее время в попытках преобразовать энергию солнечного излучения в электрическую энергию применяются два способа:

1) использование для этой цели полупроводниковых фотоэлектротеплопреобразователей (ФЭП), способных превращать лучистую энергию непосредственно в электрическую (рассмотрен при изучении фотоэффекта);

2) создание паросиловых установок, в которых обычный паровой котел, работающий, например на угле, заменяется «солнечным» паровым котлом.

Остановимся более подробно на втором способе преобразования солнечной энергии в электрическую (рис. 22.1). Схема солнечной паросиловой установки настолько ясна, что не требуется дополнительных пояснений. Заметим только, что задачей гелиоконцентраторов (зеркал или линз) является повышение плотности солнечной радиации (иначе сказать, фокусировка солнечных лучей) и, следовательно, повышение температуры нагреваемого объекта, в нашем случае, солнечного котла.

Заметим, что зеркала гелиоконцентратора с целью их эффективного использования должны быть подвижными. Другими словами, каждое зеркало в зависимости от географического расположения солнечного котла, времени года и времени суток должно занимать соответствующую позицию. Лучше всего это можно сделать с помощью ЭВМ.

К сожалению, приходится констатировать, что стоимость 1 кВт мощности солнечной электростанции очень велика.

Теперь обратимся к вопросу об использовании солнечной энергии для отопления и горячего водоснабжения. К сожалению, здесь приходится иметь дело с таким противоречием: больше всего необходимо подавать тепла, когда обогреваемые объекты находятся на высоких широтах, но именно там Солнце светит менее интенсивно. Считается, например, что на территории России солнечную энергию целесообразно использовать (для отопления и горячего водоснабжения) только южнее Волгограда.

Кроме того, очевидно, что если не принимать специальных мер, то обогреваемая Солнцем поверхность будет иметь температуру, близкую к температуре окружающей среды. Объясняется это большой рассеянностью солнечной энергии на поверхности Земли. Конечно, такая температура (теплоносителя) неприемлема для отопления и горячего водоснабжения.

Простейшее средство для получения более высокой температуры за счет солнечной радиации — создание солнечного коллектора. Один из простейших солнечных коллекторов представляет собой ящик с плохо проводящими теплоту стенками. Внутри ящика размещаются трубы, по которым протекает теплоноситель, обыч-

но вода. Трубы для лучшего восприятия теплоты окрашиваются черной краской. На стороне ящика, обращенной к Солнцу, плохо проводящая теплоту стенка заменяется стеклом. Это устройство имеет свой секрет. Он заключается в том, что большая часть энергии солнечного излучения лежит в видимой части спектра, для которой стекло практически прозрачно. Другими словами, тепло Солнца свободно проходит через стекло, как будто бы его и нет. Наоборот, поверхность относительно слабо нагретых труб коллектора излучает в основном в инфракрасной области спектра, для которой стекло практически непрозрачно. Таким образом, стекло коллектора пропускает излучение Солнца и не пропускает излучение нагретых труб коллектора.

Гелиоустановки для получения солнечной энергии могут быть как с концентраторами солнечной энергии, так и без них. В первом случае их стоимость выше, зато выше и эффективность. Солнечные установки без концентратора обычно делаются для отопления и горячего водоснабжения, для опреснения воды, содержащей примеси (соли), бытового назначения (например, душевые), для сушки фруктов и др.

Учитывая непостоянство солнечной радиации в зависимости от погоды, времени суток и года, географического расположения, в большинстве случаев необходим аккумулятор тепла, которым чаще всего служит бак с водой.

Солнечная установка для отопления и горячего водоснабжения может принести экономию топлива на 50...60%, но не на 100%. Следовательно, полностью заменить обычную отопительную установку она не может. И все же распространение солнечных установок рассматриваемого типа имеет хорошую перспективу. Особенно после некоторого снижения их цены.

Использование энергии ветра, так же как и использование энергии рек, имеет длинную историю, многие столетия ветряные мельницы были привычными сооружениями в сельскохозяйственных районах Европы. Но это время позади.

Большая трудность в использовании энергии ветра заключается в его непостоянстве как по силе, так и по направлению. Противопоставить этому можно либо применение электрического аккумулятора, либо использование энергии ветра для процессов, не требующих постоянства действия механизма, либо передачу электрической энергии непосредственно в достаточно мощную электрическую систему, для которой относительно небольшие колебания количества поступающей электроэнергии малочувствительны.

В нашей стране ведутся работы по всем трем направлениям. Выпускаются ветроустановки, предназначенные для привода электрогенераторов относительно небольшой мощности (до 100 кВт, в большинстве случаев до 10 кВт), как правило, в комплекте с электрическими аккумуляторами. Они используются с самыми различными целями, включая электроснабжение небольших коттеджей в местах, как правило, еще не электрифицированных.

В настоящее время ведется работа по созданию более мощных ветроэлектрогенераторов (мощность которых будет, вероятно, измеряться тысячами киловатт) для подачи выработанной электроэнергии непосредственно в электросети.

По-видимому, на широкое использование ветра в энергетике можно смотреть с оптимизмом.

Еще одним видом энергии, которую человечество пытается использовать с давних пор, является энергия морских приливов и отливов.

Энергия морских приливов — естественная природная энергия. Она в значительной степени постоянна и не зависит от погоды или времени года, т. е. она всегда существует, неисчерпаема. Возможно преобразование лишь ничтожной части этой энергии, но и эта небольшая часть тем не менее велика, и ее всегда можно будет преобразовывать в электрическую энергию.

Преобразованная энергия приливов дешевая. К числу затрат, сопряженных с оборудованием установок, можно добавить лишь стоимость технического обслуживания и ремонтных работ. В результате эксплуатации этих установок обеспечивается косвенная защита окружающей среды, так как исключаются выбросы в атмосферу продуктов сгорания топлива.

В средние века для укрощения «лунной», как тогда говорили, энергии отгораживали бухту от моря, и приливно-отливные потоки воды вращали мельничные колеса.

Особенностью энергии приливов является пульсирующий прерывистый ее характер, что, конечно, осложняет возможность ее использования. Обычно приливные электростанции (ПЭС) работают в тех районах, где есть тепловые электростанции, увеличивая количество вырабатываемой электроэнергии в периоды наибольшего ее потребления.

Успешная работа Кислогубской ПЭС (Россия) на Кольском полуострове позволяет рассматривать возможность строительства таких же станций в Тугурском заливе Белого моря и в Пенжинском заливе Охотского моря.

Недалеко от норвежского города Бергена сооружается экспериментальная электростанция, которая будет превращать в электричество энергию морских волн. Как полагают специалисты, по стоимости вырабатываемой электроэнергии она сможет конкурировать с тепловыми станциями, работающими на мазуте.

Экономичность преобразования энергии приливов зависит от количества воды и ее напора в точке преобразования. Напор имеет первостепенное значение, так как при одной и той же преобразующей способности установки количество воды, необходимое для ее работы, уменьшается с увеличением напора. Например, в Германии на побережье Северного моря величина прилива достигает в среднем 3 м и не может быть экономично использована. Приходится создавать искусственный напор.

Для непрерывного преобразования энергии необходима специальная аккумулирующая система, которая сможет работать в период приливного подпора — стояния воды на наиболее высоком уровне.

Электростанции, использующие земное тепло, работают в Италии, Новой Зеландии, США, Мексике, Японии. В России первая геотермальная ТЭС — Паужетская — построена в 1966 г. на Камчатке.

Делаются попытки использовать разность температуры поверхностных и глубинных вод океана, на этом принципе построена электростанция в Гвинейском заливе.

Перечисленные выше виды энергии широко распространены, но используются недостаточно. Кроме того, в природе существуют виды энергии, которые еще не пытались осваивать, к их числу можно отнести энергию перепадов температур земной поверхности и ее недр, атмосферное электричество, магнитное поле Земли и др.

Разность температур у земной поверхности и на глубине несколько сот метров можно было бы использовать на обширных просторах Сибири, Канады, Аляски, на Чукотке, где долгие суровые зимы вынуждают затрачивать огромное количество энергии только на обогрев зданий, однако возможность сооружения таких термоэлектрических установок пока даже не обсуждалась.

В природе существует и другой вид энергии, который пока никак не используется. Это атмосферное электричество. Попытки использовать атмосферное электричество, преобразовать электрические разряды в электрический ток, научиться аккумулировать, сохранять огромную энергию гроз пока малочисленны, но они важны и необходимы.

Возможность использования энергии магнитного поля Земли до настоящего времени также всерьез не рассматривалась. В этом направлении открывается широкое поле деятельности для физиков, геофизиков, метеорологов. Надо надеяться, что человечество научится использовать новые виды и источники энергии прежде, чем будут исчерпаны известные энергетические запасы.



## **ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ВЫВОДЫ**

1. **Экология** — наука, изучающая взаимоотношения природы и общества, животных, растений и человека и их отношение к среде обитания; взаимоотношения человека с окружающей средой.

2. **Загрязнение среды** — привнесение в окружающую среду или возникновение в ней новых, обычно нехарактерных веществ и соединений или превышение естественного многолетнего уровня (в пределах его крайних колебаний) концентрации этих веществ и соединений. Загрязнение среды возникает в результате антропогенных воздействий (например, загрязнения атмосферного воздуха, рек, водоемов, почвы и др.). По характеру территории выделяют глобальное, региональное и локальное загрязнение среды.

Загрязнение среды неблагоприятно влияет на состояние природных ресурсов, а также на здоровье населения. Проблема борьбы с загрязнением среды может быть полностью или частично решена при комплексном использовании ресурсов, внедрении безотходной и малоотходной технологий, создании различного рода очистных сооружений и т. д.

3. **Антропогенное воздействие** — любой вид хозяйственной деятельности человека в его отношении к природе; представляет собой, как правило, источник большого числа различных антропогенных факторов.

4. **Антропогенные факторы** — факторы, обязанные своим происхождением деятельности человека.

5. **Энергетика** — получение энергии для социально-экономических нужд. Одна из форм природопользования не только из-за извлечения природных ресурсов, но и в связи с ее воздействием на среду жизни. По перспективному объему получаемой энергии безгранична.

6. **Топливо** — вещество, при сгорании которого выделяется значительное количество теплоты; используется как источник получения энергии.

7. Биосфера — одна из оболочек (сфер) Земли, состав, структура и энергетика которой обусловлены главным образом деятельностью живых организмов.

8. Тепловое загрязнение — форма физического загрязнения среды, характеризующаяся периодическим или длительным превышением температуры против естественного уровня.

9. Тепловая электростанция (ТЭС) вырабатывает электрическую энергию в результате преобразования тепловой энергии, выделяемой при сжигании органического топлива (твердого, жидкого, газообразного). Основные виды ТЭС: паротурбинные (преобладают), газотурбинные, дизельные. Доля вырабатываемой ТЭС электроэнергии в мире — около 75% (в России и США — около 80%). Иногда к ТЭС условно относят атомные и геотермальные электростанции. ТЭС наносят наибольший вред окружающей среде, загрязняя ее газообразными продуктами сгорания, аэрозолями, золой, шлаками. В состав дымовой смеси входят обычно оксиды азота — примерно 18%, оксиды углерода — около 12%, диоксид серы — примерно 0,2%, вода — около 1%, взвешенные частицы и сотни соединений с малой концентрацией, многие загрязнители благодаря высоким трубам попадают в атмосферу и переносятся воздушными течениями на значительные расстояния.

10. Гидроэлектростанция (ГЭС) преобразует энергию водяного потока в электрическую энергию посредством гидравлических турбин, приводящих во вращение гидроагрегаты, мощность современных крупных ГЭС — до нескольких ГВт.

11. Атомная электростанция (АЭС) в качестве топлива использует ядра тяжелых элементов — плутония и урана. При делении 1 г урана выделяется столько же теплоты, сколько при сгорании 3 т каменного угля.

12. Солнечная электростанция использует солнечную радиацию для выработки электрической энергии. Различают термодинамические солнечные электростанции, в которых солнечная энергия последовательно преобразуется в тепловую, а затем в электрическую, и фотоэлектрические станции, непосредственно преобразующие солнечную энергию в электрическую (с помощью фотоэлектрического генератора). Солнечные электростанции перспективны как экологически чистые источники энергии.

13. Ветроэнергетическая установка преобразует кинетическую энергию ветрового потока в какой-либо вид энергии. Состоит из ветроагрегата (ветродвигателя в комплекте с одной или несколькими рабочими машинами), устройства, аккумулирующего энергию или резервирующего мощность, а также в ряде случа-

ев дублирующего двигателя. КПД ветродвигателей достигает 48%. Недостаток ветроустановок — их шумность, создание помех приему телевизионных программ, необходимость больших площадей для мощных установок. Такие установки относятся к экологически чистым источникам энергии.



## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что такое экология?
2. В чем заключается суть технократических преобразований мира и как они связаны с экологическими проблемами?
3. Грозит ли человечеству экологическая катастрофа?
4. Почему проблемы экологии относятся к глобальным?
5. Каковы перспективы развития теплоэнергетики?
6. Как будет дальше развиваться гидроэнергетика?
7. Могут ли АЭС стать безопасными и необходимы ли они?
8. Решат ли энергетическую проблему термоядерные электростанции?
9. Что можно сказать о перспективах использования солнечной энергии в энергетике?
10. Будет ли использоваться энергия ветра?
11. Какова перспектива использования приливных электростанций?
12. Какова перспектива использования энергии морских волн?
13. Как можно использовать геотермальную энергию?
14. Как влияет энергетика на окружающую среду?
15. Каковы перспективы развития энергетики в России?

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

### Современная физическая картина мира

Вы завершили изучение курса физики. Изученный вами материал — это результат громадной исследовательской работы, выполненной на протяжении многих столетий учеными всего мира по исследованию различных форм движения материи, строения и свойств материальных тел.

В ходе изучения физики и других наук вы убедились в том, что при всем своем разнообразии окружающий мир обладает единством. Это единство выражается прежде всего в том, что все явления, какими бы сложными они ни казались, являются различными состояниями и свойствами движущейся материи, имеют в конечном счете *материальное происхождение*. Единство мира проявляется также во *взаимосвязи всех явлений*, возможностях взаимных превращений форм материи и движения. Вместе с тем единство мира проявляется в существовании ряда *общих законов движения материи* (законы сохранения энергии, импульса, электрического заряда, взаимосвязи массы и энергии и др.). Задача физики и других естественных наук состоит в том, чтобы обнаружить наиболее общие законы природы и объяснить на их основании конкретные явления и процессы.

Отражением единства мира в познании является синтез научных знаний, полученных в процессе исследований природы различными науками. На каждом этапе развития науки возникает необходимость объединения научных знаний в единую систему знаний о явлениях природы — в *естественно-научную картину мира*.

Под естественно-научной картиной мира понимают всю совокупность знаний о предметах и явлениях природы, объединенных основополагающими идеями, получившими экспериментальное подтверждение и сохранившими свою объективную ценность в развитии человеческой мысли.

Физическая картина мира доставляет часть всей системы знаний о природе, поскольку она касается только физических свойств материальных тел и физических форм движения материи. *Физическая картина мира* — совокупность представлений о природе (материи, движении, пространстве и времени), основанных на наиболее общих принципах, гипотезах и теориях на определенном этапе ее развития. Так, например, возникновение классической механики сопровождалось созданием механической, электродинамики — электромагнитной, а теории относительности и квантовой механики — квантово-релятивистской картин мира.

В развитии человеческого познания и практического освоения мира всегда проявлялось стремление сформулировать наиболее общие законы и принципы, знание которых давало бы ключ к объяснению всех процессов. Раскрытие таких законов всегда считалось важнейшим условием построения единой научной картины мира.

Основу единства мира составляет прежде всего единство строения материи. С точки зрения современной физики существуют две основные формы материи — *вещество* и *поле*. Вещество имеет прерывистое (дискретное) строение, а поле — непрерывное. При соответствующих условиях частицы вещества могут превращаться в кванты соответствующих полей и, наоборот, кванты полей могут превращаться в частицы вещества.

Все атомы имеют одинаковую структуру и построены из элементарных частиц трех сортов. У них есть ядра из протонов и нейтронов, окруженных электронами. Взаимодействие между ядрами и электронами осуществляется электромагнитным полем, квантами которого являются фотоны. Взаимодействие же между протонами и нейтронами в ядре осуществляют в основном  $\pi$ -мезоны, которые представляют собой кванты ядерного поля. При распаде нейтронов появляются нейтрино. Кроме того, открыто много других элементарных частиц. Но только при взаимодействии частиц очень больших энергий они начинают играть заметную роль.

В первой половине XX в. был открыт фундаментальный факт: все элементарные частицы способны превращаться друг в друга.

После открытия элементарных частиц и их превращений на первый план единой картины мира выступило единство в строении материи. В основе этого единства лежит материальность всех элементарных частиц. Различные элементарные частицы — это различные конкретные формы существования материи.

**Единство мира проявляется и в законах движения частиц, и в законах их взаимодействия.**

Несмотря на удивительное разнообразие взаимодействий тел друг с другом, в природе, по современным данным, имеются лишь четыре типа сил: гравитационные силы, электромагнитные, ядерные и слабые взаимодействия. Последние проявляются, главным образом, при распаде элементарных частиц. С проявлением всех четырех типов сил мы встречаемся в безграничных просторах Вселенной, в любых телах на Земле (в том числе и в живых организмах), в атомах и атомных ядрах, при всех превращениях элементарных частиц.

Революционное изменение классических представлений о физической картине мира произошло после открытия квантовых свойств материи. С появлением квантовой физики, описывающей движение микрочастиц, начали вырисовываться новые элементы единой физической картины мира.

Разделение материи на вещество, имеющее прерывное строение, и непрерывное поле потеряло абсолютный смысл. Каждому полю соответствуют кванты этого поля: электромагнитному полю — фотоны, ядерному —  $\pi$ -мезоны и т. д. В свою очередь, все частицы обладают волновыми свойствами. *Корпускулярно-волновой дуализм присущ всем формам материи.*

Итак, современная физика демонстрирует нам черты единства природы. Но все же многое, может быть, даже физическую суть единства мира уловить пока еще не удалось. Неизвестно, почему существует столь много различных элементарных частиц, почему они имеют те или иные значения масс, зарядов и других характеристик. До сих пор все эти величины определяются только экспериментально. Однако все отчетливее вырисовывается связь между различными типами взаимодействий. Электромагнитные и слабые взаимодействия уже объединены в рамках одной теории. Выяснена структура большинства элементарных частиц.

«Здесь скрыты столь глубокие тайны и столь возвышенные мысли, что, несмотря на старания сотен остроумнейших мыслителей, трудившихся в течение тысяч лет, еще не удалось проникнуть в них, и радость творческих исканий и открытий все еще продолжает существовать». Эти слова, сказанные Г. Галилеем около четырех столетий назад, нисколько не устарели.

Фундаментальные законы, устанавливаемые в физике, по своей сложности и общности намного превосходят те факты, с которых начинается исследование любых явлений. Но они столь же достоверны и столь же объективны, как и знания о простых явлениях, наблюдаемых непосредственно. Эти законы не нарушаются никогда, ни при каких условиях.

Материальное единство мира проявляется также в абсолютности и относительности существования материи, в ее несоздаваемости и неуничтожимости, подтвержденных всем развитием естествознания. Об этом свидетельствуют конкретные законы сохранения и превращения физических величин, характеризующие различные свойства материи и ее движения. Эти отдельные законы являются конкретными выражениями объективных общих свойств несоздаваемости и неуничтожимости материи и движения.

Современная физическая картина мира является результатом обобщения важнейших достижений всех естественных наук. Однако хоть эта картина мира и отличается большой обобщенностью и успешно объясняет многие явления, все же в природе существует неисчерпаемое количество явлений, которые современная физическая картина мира объяснить не может. Из числа таких затруднений следует прежде всего указать те, которые связаны с созданием единой теории элементарных частиц, единой теории поля, единой теории электромагнитных явлений и т.п. Поэтому нельзя считать современную физическую картину мира сколько-нибудь завершенной. Сложность мира превосходит и всегда будет превосходить сложность человеческих представлений о ней.