

Н. С. Пурышева,  
Н. Е. Важеевская, Д. А. Исаев

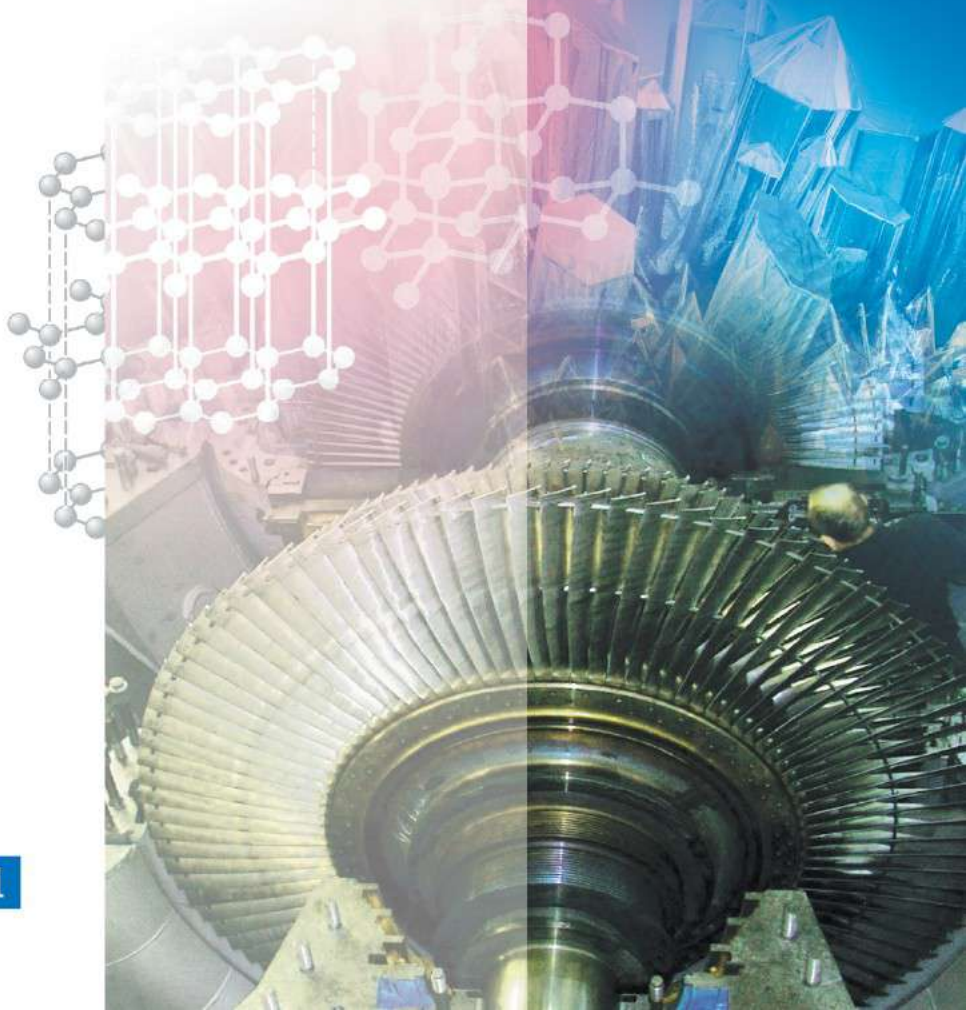
# ФИЗИКА



БАЗОВЫЙ И УГЛУБЛЁННЫЙ  
УРОВНИ

# 10

к л а с с



 дрофа

Н. С. Пурешева,  
Н. Е. Важеевская, Д. А. Исаев

# ФИЗИКА

Учебник

Рекомендовано  
Министерством просвещения  
Российской Федерации

*8-е издание, переработанное*

МОСКВА

 дрофа

2019

БАЗОВЫЙ  
И УГЛУБЛЁННЫЙ  
УРОВНИ

# 10

к л а с с

 | российский  
учебник

# Введение

## § 1. Что и как изучает физика

1. **Физика — наука о природе.** Как вам хорошо известно, физика — одна из наук о природе, или, как говорят, одна из естественных наук. Другими естественными науками являются астрономия, биология, химия, география.

Физика изучает *физические явления*: механические, тепловые, электромагнитные, световые и др. К физическим явлениям относятся движение молекул, различных машин и механизмов, планет и их спутников, нагревание и охлаждение тел, плавление, кристаллизация и парообразование, изменение ориентации магнитной стрелки вблизи проводника, по которому идёт электрический ток, фотоэффект, радиоактивный распад и многие другие. Во всех этих явлениях участвуют материальные объекты или объекты окружающего нас материального мира.

*Материя — всё то, что существует реально, независимо от нас, наших органов чувств, то, что мы можем воспринимать с помощью органов чувств непосредственно или используя приборы.*

В настоящее время известны два вида материи: вещество и поле. К вещественному виду материи относятся атомы, молекулы, окружающие нас тела, астрономические объекты. С полевым видом материи вы уже тоже знакомы — это гравитационное, электрическое, магнитное, электромагнитное поля.

Кроме явлений, физика изучает *физические свойства* материальных объектов, такие как теплопроводность, электропроводность, упругость, прочность и т. п.





Помимо физических явлений, существуют химические, биологические, астрономические явления. Например, рост растений представляет собой биологическое явление, превращение веществ при химических реакциях — химическое. При этом объяснение того, почему происходит та или иная химическая реакция, лежит в области физики; рост растений происходит благодаря таким процессам, как диффузия и всасывание, механизм которых имеет физическую природу. Таким образом, физические, химические и биологические явления так же, как и науки физика, химия, биология, тесно связаны. Особенно сильно с физикой связана астрономия, которая изучает небесные объекты (планеты, их спутники, звёзды, галактики и пр.) и использует при этом физические методы исследования и законы.



Принято условно выделять три структурных уровня материи: микромир (атомы, элементарные частицы, типичные размеры которых меньше или равны  $10^{-10}$  м), макромир (от молекул до тел Солнечной системы), мегамир (типичные размеры  $10^{22}$  м).

**Физика изучает свойства объектов и физические явления, происходящие с объектами микромира, макромира и мегамира.**

**2. Научные методы познания окружающего мира.** Возникает вопрос, как физика получает знания о природе, как она изучает материальный мир.

Научное знание отличается от обыденного прежде всего объективностью, точностью, достоверностью. Стремление исследователей к объективности научного знания привело к тому, что в естествознании к концу XVII в. сложился научный метод познания. Основоположителем научного метода исследования, обосновавшим роль эксперимента в научном познании окружающего мира, считается итальянский учёный **Галилео Галилей (1564—1642)**.

*Научный метод познания включает наблюдение, создание модели изучаемого явления, выдвижение гипотезы о её поведении и законах, управляющих поведением модели, проведение экспериментов, которые должны подтвердить или опровергнуть гипотезу.*

В науке различают **эмпирический** и **теоретический** уровни познания (исследования). Каждый уровень познания характеризуется определённой логикой и использует как общие, так и специфические, свойственные данному уровню познания методы. Так, для получения научных фактов применяют наблюдение и эксперимент, которые являются основными методами эмпирического ис-

следования, при разработке гипотез и построении теории используются моделирование и мысленный эксперимент, которые свойственны теоретическому уровню познания.

Представления о материальном мире, о происходящих в нём явлениях и о свойствах объектов материального мира складываются в процессе *наблюдения*. Так, наблюдая падение тел, Галилей пытался найти закономерности этого движения; наблюдая сокращение лапки лягушки при касании её металлическими предметами, Гальвани пытался найти причину этого явления. Именно желание объяснить причину наблюдаемого явления, найти закономерности, которым оно подчиняется, побуждает учёных выдвигать *гипотезы*, т. е. предположения о природе явления, или о его причинах, или о законах, по которым оно происходит.

После того как выдвинута гипотеза, учёный может продвигаться в познании двумя путями. Первый путь характерен для эмпирического уровня познания. В этом случае ставится эксперимент и с его помощью проверяются гипотезы. Те из них, которые подтверждаются, принимаются, а те, которые не подтверждаются, являются ложными и отбрасываются. Затем, если это возможно, гипотеза получает теоретическое подтверждение при объяснении результатов эксперимента.

Второй путь характерен для теоретического уровня познания. При этом учёный строит *модель* объекта или явления, выполняет теоретическое исследование модели и проводит эксперимент с целью подтверждения справедливости выдвинутой гипотезы и правильности построенной модели. Окончательное заключение о том, что полученные выводы верны, позволяет сделать возможными их применение в практике.

**3. Моделирование.** Особую роль на теоретическом уровне познания играет метод моделирования.

**Идеальная модель** — это мысленно представляемая система, которая отражает существенные особенности и свойства реального объекта, явления или процесса и изучение которой даёт новую информацию об этом объекте.

В основе всех физических теорий и законов лежат идеальные модели объектов. Например, классическая механика Ньютона построена для модели «материальная точка». Напомним, что материальная точка — тело, размерами которого можно пренебречь в условиях данной задачи. Законы изменения параметров состояния газа (давления, объёма и температуры) записаны для модели «идеальный

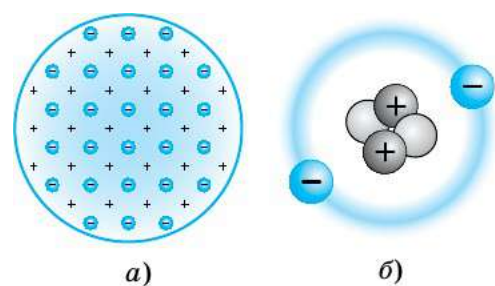


Рис. 1

газ», т. е. газа, для которого можно пренебречь размерами молекул и их взаимодействием.

В процессе накопления научных знаний, совершенствования экспериментальных средств происходит усложнение моделей. Например, первой моделью атома была модель Дж. Дж. Томсона, который представлял атом в

виде шара с равномерно распределённым в нём положительным зарядом и вкрапленными в него отрицательно заряженными электронами (рис. 1, а). Эта модель объясняла известные в то время явления проводимости и электризации.

После того как Э. Резерфорд провёл опыты по зондированию тонких металлических пластинок, появилась более сложная модель атома — так называемая планетарная модель, в соответствии с которой в центре атома находится положительно заряженное ядро, а вокруг него вращаются отрицательно заряженные электроны (рис. 1, б). Эта модель, объясняя ряд электрических явлений, не позволяла понять происхождение линейчатых спектров и устойчивость атомов.

Модель Резерфорда была усовершенствована Н. Бором. В соответствии с моделью Бора электроны, находясь на стационарных орбитах, не излучают и не поглощают энергию. Излучая или поглощая энергию, атомы переходят с одной орбиты на другую. С помощью этой модели можно объяснить происхождение линейчатых спектров, устойчивость атомов, она достаточно хорошо описывает строение атома водорода, но не позволяет объяснить строение более сложных атомов.

Таким образом, результаты экспериментов показывают ограниченность той или иной идеальной модели, в итоге модель развивается и совершенствуется.

В ряде случаев для изучения природы объектов или процессов используют **модели-анalogии**. Аналогия позволяет на основе установленного сходства одних свойств объектов делать выводы о сходстве других их свойств. Например, Х. Гюйгенс, выявив общие свойства звука и света, такие как отражение, преломление, интерференция, дифракция, пришёл к выводу, что свет имеет волновую природу. В этом случае звуковые волны служили моделью-анalogией для световых волн. Механические колебания выступали в роли модели-анalogии для электромагнитных колебаний.

**Мысленный эксперимент** — это познавательный процесс, имеющий структуру реального эксперимента и осуществляемый с идеальной моделью. Мысленный эксперимент позволяет переходить от реальных объектов и процессов к идеальным моделям, действие с которыми позволяет получить результаты, применимые к реальным объектам.

Г. Галилей применял мысленный эксперимент как метод естественно-научного познания при изучении законов движения.

В современной науке мысленный эксперимент используется при изучении явлений, происходящих с микробъектами, недоступными непосредственному наблюдению.

В современных научных исследованиях всё шире применяют **математическое моделирование**. Сущность математического моделирования состоит в замене исходного объекта его математической моделью и в дальнейшем изучении модели с помощью математических методов, в том числе реализуемых на ЭВМ.

Из приведённых рассуждений следует, что эксперимент и теоретический анализ (теория), являясь методами научного познания окружающего мира, выступают в единстве. Процесс научного познания начинается с наблюдений, и именно несоответствие наблюдаемого сложившейся системе знаний, противоречие между уже известным и экспериментальными фактами, которые не могут быть объяснены с помощью существующих законов и теорий, приводит к возникновению нового знания. В этом случае эксперимент является источником наших знаний об окружающем мире. При этом ни одно знание не может считаться истинным до тех пор, пока оно не будет подтверждено соответствующими экспериментальными данными и не найдёт своего практического применения. В этом смысле эксперимент является критерием истинности наших знаний.

Таким образом, *эксперимент является источником знания и критерием истинности полученных знаний.*

Естественно, экспериментальные факты представляют собой один из элементов системы знаний о природе. Более полными эти знания могут стать только при создании теории для их объяснения. Так, предположение о том, что вещества состоят из частиц, находящихся в непрерывном хаотическом движении, оставалось гипотезой и после того, как были поставлены эксперименты, косвенным образом доказывающие его справедливость. И лишь после создания классической статистической теории данное предположение превратилось в научное знание.

## Вопросы для самопроверки

1. Что изучает физика?
2. Приведите примеры физических явлений и физических свойств тел.
3. Покажите, что физические законы имеют место в биологических и химических явлениях.
4. Какова логика процесса научного познания? Проиллюстрируйте её на примере.
5. Какова роль эксперимента в познании? Поясните на примере.
6. Что такое гипотеза? Приведите примеры научных гипотез.
7. Какова роль моделирования в процессе научного познания?
8. Какова роль эксперимента в уточнении моделей объектов и явлений? Приведите примеры.

## Упражнение 1

1. Составьте таблицу известных вам идеальных моделей объектов и процессов.
2. Предложите алгоритм (последовательность действий) построения идеальной модели, проиллюстрируйте этот алгоритм на примере построения какой-либо идеальной модели.
3. Составьте классификацию физических моделей, представив результаты работы в виде таблицы.

---

## За страницами учебника

### **Физика и культура.**

#### **Естественно-научная и гуманитарная культура**

**1. Наука и культура.** В процессе развития человеческого общества складывалась система научных знаний, появлялись различные науки, формировался определённый тип культуры, развивалось искусство. Возникают вопросы, имеется ли различие между естественно-научным и гуманитарным знанием, что такое культура и каково соотношение между наукой и культурой. Постараемся на них ответить.

Окружающий нас мир крайне разнообразен: с одной стороны, это природа и явления, которые происходят с объектами природы, с другой стороны, это человек как объект природы и как носитель духовности и культурных ценностей. Этот мир непрерывно изменяется, и каждый этап его развития характеризуется определённым типом культуры.

*Культура в широком смысле этого слова понимается как система ценностей и мировоззренческих ориентиров, которые*



*определяют жизнедеятельность человека и человеческого общества.*

Эти ориентиры и ценности в обществе складываются в процессе развития общественных отношений, наук, искусства. Наука вносит существенный вклад в формирование ценностей и мировоззренческих ориентиров, именно поэтому общечеловеческая культура немыслима без научного знания. А физика как основа современного миропонимания создаёт базу для познания и объяснения окружающего мира.

**2. Естественно-научная и гуманитарная культура.** Развитие науки, накопление научных знаний привело к выделению двух областей: естественно-научного и гуманитарного знания или, как принято говорить, естественно-научной и гуманитарной культур. В разные периоды развития цивилизации соотношение этих культур было различным. В период накопления научных знаний науки не делились на гуманитарные и естественные, или точные, существовало единое научное направление — *натурфилософия*. По мере становления научного знания происходил процесс дифференциации наук и увеличивался разрыв между естественными и гуманитарными культурами. Корни противопоставления этих двух культур кроются в различных методах познания в научной и гуманитарной практике и характере естественно-научного и гуманитарного знания.

Так, естественно-научное (физическое) знание объективно, а гуманитарное — субъективно. Это связано с тем, что исследователь-физик изучает объективно существующие законы природы, а социальные или культурологические явления, с одной стороны, обусловлены объективными причинами, а с другой стороны, на их анализ оказывает влияние личность исследователя.

Процессы исследования природных и социальных явлений также различаются. В первом случае исследуется объективно существующий мир, экспериментатор не только не вмешивается в ход изучаемых процессов, но и стремится ограничить влияние факторов, не имеющих отношения к этим процессам. В гуманитарном познании исследователь, как правило, влияет на то, что хочет познать.

Результатом исследований в естественно-научной сфере является знание, в гуманитарной области — не только знание, но и определённая точка зрения, оценка познаваемого объекта или явления. Кроме того, результаты социальных, культурологических, политологических и других гуманитарных исследований направлены на изменение действительности.

Ещё одним отличием гуманитарной культуры от естественно-научной является то, что её язык — язык образов, в то время как естественные науки требуют точных языковых форм — понятий (терминов) и формул. Эти понятия однозначно понимаются всеми учёными и имеют чёткие формулировки; величины, характеризующие явления и объекты, измеряются по определённым правилам и их значения выражаются в общепринятых единицах.

**3. Взаимосвязь естественно-научной и гуманитарной культур.** В настоящее время ситуация изменяется, она характеризуется всё большим сближением и более тесной взаимосвязью естественно-научной и гуманитарной культур. Это связано, с одной стороны, с тем, что естествознание обладает огромным гуманитарным потенциалом. Естествознание и физика прежде всего создают тот цельный образ реальности, который даёт возможность человеку свободно ориентироваться в окружающем мире. Физика позволяет продемонстрировать процесс поиска, открытий и изобретений, показать взаимосвязь и взаимовлияние науки и техники, выделить глобальные проблемы человеческого общества. С другой стороны, ещё в древности проблемы науки находили своё отражение в литературе, в частности в поэзии. Через стихотворные строки порой передавали научные идеи и представления.

В Средние века происходило интенсивное накопление научных знаний, осознание роли науки в жизни общества, что не могло не сказаться и на литературном творчестве. Так, в «Божественной комедии» великого поэта Средневековья Данте Алигьери, описывающего Ад и Рай, называются имена философов, поэтов и учёных: Сократа, Платона, Гераклита.

Много примеров описания физических процессов и научных открытий можно найти в поэзии великого русского учёного М. В. Ломоносова. Ломоносов — яркий пример человека, в творчестве которого объединились «две культуры»: естественно-научная и гуманитарная. Он — автор выдающихся открытий в естествознании и создатель великолепных образцов поэтического творчества, в которых просвещал народ, популяризируя научные знания.

Размышляя о процессах, происходящих в недрах Солнца, Ломоносов писал:

*Там огненны валы стремятся  
И не находят берегов,  
Там вихри пламенны крутятся,*

*Борючись множество веков;  
Там камни, как вода, кипят,  
Горящи там дожди шумят.*

Для настоящего времени характерно усиление взаимодействия природы и общества, нарастающие темпы преобразования окружающей среды человеком, острота глобальных экологических проблем. Именно это приводит к необходимости рассмотрения мира как целостной системы: мир — единая система, мир — интегрированная система, мир — живая самоорганизующаяся система, мир — развивающаяся система. Такой подход называют *холистическим* (от англ. *hole* — целый, целостный). Холистический подход к миру как к целостной системе объединяет гуманитарную и естественно-научную культуры.

Помимо общих проблем, гуманитарную и естественно-научную культуры объединяют общие методы исследования. Для исследований в гуманитарной сфере в настоящее время характерны такие методы, как моделирование, в том числе на ЭВМ, количественные методы оценки результатов, их статистический анализ. В естествознании существует общекультурная составляющая: идеи, методологические общенаучные принципы, понятия, использование культурологического подхода в оценке достижений науки и научно-технического творчества. Конечно, нельзя недооценивать роль физики и других естественных наук в сохранении культурного наследия (современные методы реставрации, защиты и пр.).

## Вопросы для самопроверки

1. Что называют культурой?
2. Почему наука считается компонентом культуры?
3. Каков смысл понятий «естественно-научная культура» и «гуманитарная культура»? В чём их различие?
4. Проиллюстрируйте взаимосвязь естественно-научной и гуманитарной культур.
5. Что, кроме науки и искусства, входит в понятие «культура»?

---

## § 2. Физические законы и теории

**1. Физические законы.** Для того чтобы описать физическое явление, необходимо выделить физические величины, его характеризующие. Так, механическое движение характеризуется пере-

мещением, временем, скоростью, ускорением; прохождение электрического тока по участку цепи — напряжением, силой тока и сопротивлением. Величины, характеризующие то или иное явление, оказываются связанными друг с другом. Например, сила тока на участке цепи прямо пропорциональна напряжению на концах этого участка и обратно пропорциональна его сопротивлению; скорость при равноускоренном движении линейно зависит от времени. Связь между величинами, характеризующими явление или свойства тела, может быть установлена экспериментально или теоретически. Если связь между величинами носит устойчивый характер, т. е. повторяется в экспериментах, то её называют **физическим законом**.

Вам уже известны законы Ньютона, Архимеда, Паскаля, Гука, Ома и др. Некоторые физические законы являются частными, т. е. описывают ограниченный круг явлений. Например, закон Ома для участка цепи относится к постоянному электрическому току; закону Паскаля подчиняется передача давления, производимого на жидкость или газ. Другие законы носят более общий характер, они относятся к целому разделу физики и описывают большой круг явлений определённой физической природы. Например, законы Ньютона описывают различные виды механического движения и взаимодействия тел.

Физические законы имеют границы применимости. Так, законы Ньютона применимы к макроскопическим телам, которые можно считать материальными точками, движущимися в инерциальных системах отсчёта со скоростями, много меньшими скорости света; закон Ома для участка цепи не выполняется при высоких температурах; закон Архимеда получен для несжимаемой жидкости, плотность которой не изменяется с глубиной погружения.

Существуют и ещё более общие, фундаментальные, законы, например законы сохранения энергии, импульса, электрического заряда. Закон сохранения энергии справедлив не только для физических процессов, но и для химических и биологических, а закон сохранения электрического заряда применим не только в электричестве, но и в ядерной физике. Эти законы также имеют границы применимости, в частности они справедливы для замкнутых систем.

Некоторые законы были получены экспериментально, например законы Паскаля, Архимеда, Ома. Закон сохранения энергии также является результатом обобщения большого числа экспериментальных фактов. Другие законы представляют собой результат

теоретических выводов. Например, британский физик *Джеймс Максвелл* (1831—1879), используя модель газа, теоретически получил закон, описывающий характер движения молекул газов (распределение молекул газа по скоростям). Значительно позже этот закон был подтверждён экспериментально.

Физические законы, так же как и физические теории, можно разделить на две большие группы: *динамические* и *статистические*. К динамическим относятся законы, отражающие однозначное соответствие между причиной и следствием. Такими законами являются законы классической механики, термодинамики, классической электродинамики. Так, если на макроскопическое тело массой  $m$  действует сила  $\vec{F}$ , то тело будет двигаться с вполне определённым ускорением  $\vec{a} = \frac{\vec{F}}{m}$ . Если в магнитном поле, модуль вектора магнитной индукции которого равен  $B$ , перпендикулярно вектору  $\vec{B}$  расположен проводник длиной  $l$ , сила тока в котором  $I$ , то на этот проводник будет действовать определённая сила  $F = BIl$ .

Иным законам подчиняется поведение микроскопических объектов. Эти законы являются статистическими. Так, невозможно точно определить скорость или кинетическую энергию каждой отдельной молекулы тела в некоторый момент времени. Это связано с тем, что тело состоит из огромного числа взаимодействующих частиц, и указать, сколько частиц участвует во взаимодействии с данной частицей, каковы силы взаимодействия, чему будет равна результирующая сила и в какую сторону она будет направлена, невозможно. Законом, которому подчиняется поведение молекул, является закон распределения молекул по скоростям, который позволяет установить, какое число молекул имеет скорости, лежащие в определённом диапазоне.

Точно так же закон радиоактивного распада говорит о том, в течение какого промежутка времени распадётся половина исходного числа частиц, но не говорит о том, какие именно частицы распадутся, а какие останутся нераспавшимися. В этом смысле для конкретной частицы её распад является случайным событием.

**2. Физические теории.** В процессе научного познания важно не только установить законы, но и объяснить причины явления. Здесь на помощь приходит теория. Именно теория, теоретические знания позволяют ответить на вопрос: «Почему?» Так, учёным

давно было известно, что под действием внешних сил тела сжимаются, причём газы сильнее, чем жидкости, но только молекулярно-кинетическая теория строения вещества позволила объяснить, почему это происходит. Эта же теория и теория электрических и магнитных явлений (электродинамика) позволили объяснить природу трения и упругости.

Теория позволяет не только объяснять явления и свойства вещества, но и предсказывать их. Например, знание молекулярно-кинетической теории строения вещества, влияния примесей на твёрдость, прочность, теплопроводность твёрдых тел даёт возможность получать материалы с заданными свойствами.

**Физическая теория** — это целостная система понятий, принципов и законов, позволяющих достаточно полно описывать определённый круг явлений.

Например, молекулярно-кинетическая теория объясняет явления, природа которых связана со строением вещества.

В физической науке выделяют *четыре фундаментальные теории*: классическую механику, молекулярно-кинетическую теорию, электродинамику и квантовую теорию. Каждая из этих теорий включает в себя частные теории. Например, в электродинамику входят теория проводимости, теория электромагнитной индукции, электростатика и др.

Все теории — и фундаментальные, и частные — имеют одинаковую структуру. Можно выделить *основание, ядро, следствия* и *интерпретацию* (рис. 2). К основанию относят эксперименталь-

### Структура физической теории

<i>Основание</i>	<i>Ядро</i>	<i>Следствия</i>
Эмпирический базис Идеализированный объект Система величин Процедуры измерения	Система законов Постулаты и принципы Фундаментальные постоянные	Объяснение фактов Практическое применение Предсказание нового
<i>Интерпретация</i> : истолкование основных понятий и законов, осмысление границ применимости		

Рис. 2

ные факты, модели тех объектов, для которых строится теория, физические величины. Ядро включает постулаты и принципы, законы изменения состояния изучаемых объектов и законы сохранения, физические постоянные. Следствия представляют собой применение основных законов для объяснения экспериментальных фактов, получение выводов и их экспериментальную проверку, практическое применение теории. Интерпретация предполагает установление границ применимости теории.

По мере развития физики возникают новые теории. При этом старые и новые теории оказываются связанными между собой **принципом соответствия**. Принцип соответствия, являясь общенаучным принципом, говорит о том, что при создании новых физических теорий старые теории не отбрасываются, а входят в новые как предельный случай. Например, классическая механика является предельным случаем специальной теории относительности, законы которой превращаются в законы классической механики при скоростях движения, много меньших скорости света.

## Вопросы для самопроверки

1. Что называют физическим законом? Приведите примеры физических законов. Кем и как они были установлены?
2. Приведите примеры границ применимости физических законов.
3. Какие законы являются динамическими; статистическими? Приведите примеры.
4. Какова роль теории в познании? Приведите примеры фундаментальных и частных теорий. Какие явления они объясняют?
5. Приведите примеры физических явлений и свойств тел, которые объясняются с помощью молекулярно-кинетической теории строения вещества, классической электронной теории проводимости, классической механики.
6. Как вы понимаете смысл принципа соответствия?

## § 3. Физическая картина мира

**1. Эволюция физической картины мира.** С самого зарождения науки учёные стремились объединить научные знания в определённую систему. Обобщённую и систематизированную совокупность физических знаний об окружающем мире называют **физической картиной мира**.

Физическая картина мира — это, по существу, идеальная модель природы, включающая в себя общие понятия, теории и принципы физики и характеризующая определённый этап её развития.

К концу XVII в. физическая картина мира, которая названа механической, сложилась благодаря работам Галилея и английского физика **Исаака Ньютона** (1643—1727). В ней материя представлялась только в виде вещества, пространство и время считались абсолютными, движение понималось как изменение положения тела в пространстве, а все взаимодействия сводились к гравитационному. Единственной известной теорией к концу XVII в. была классическая механика Ньютона.

В это же время зародилась и электродинамическая картина мира, которая окончательно сложилась в конце XIX — начале XX в. В частности, были открыты такие явления, как электромагнитная индукция, магнитное поле тока и др., которые не могли быть объяснены с позиций классической механики.

Материя теперь представлялась не только в виде вещества, но и в виде электромагнитного поля, пространство и время считались относительными и связанными между собой; движение — не только перемещение в пространстве вещественных объектов, но и распространение электромагнитного поля; взаимодействие — гравитационное и электромагнитное. К этому времени были уже известны три фундаментальные теории: классическая механика, молекулярная теория (классическая статистическая теория) и классическая электродинамика.

Вместе с тем в конце XIX — начале XX в. были обнаружены такие экспериментальные факты, которые в рамках электродинамической картины мира не находили объяснения. В частности, было обнаружено существование линейчатых спектров, явление фотоэффекта, радиоактивности. Эти и другие факты получили своё объяснение в квантово-полевой картине мира, построение которой продолжается и сейчас.

В квантово-полевой картине мира материя существует в виде вещества и поля, эти два вида материи связаны между собой и могут превращаться друг в друга: например, при столкновении электрона и позитрона образуются два фотона, т. е. электромагнитное поле; движение понимается как изменение состояния не только макроскопических объектов, но и микрообъектов; помимо двух известных в электродинамической картине мира взаимодействий, существуют ещё два: сильное (ядерное) и слабое, ответственные за





Рис. 3

изменение состояния при ядерных реакциях; пространство и время связаны между собой и с материей.

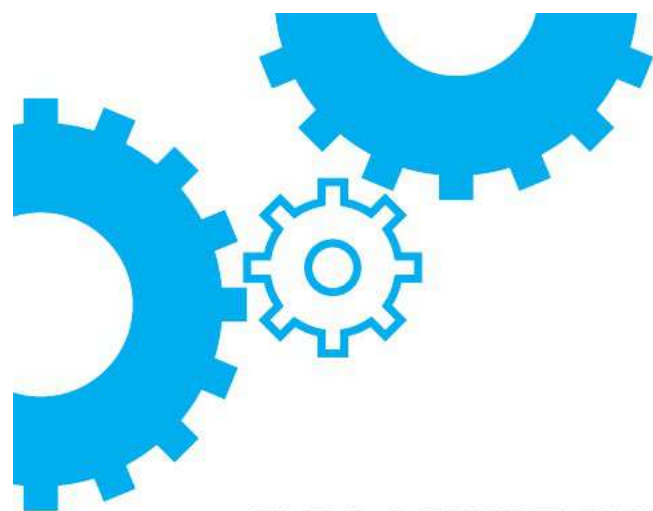
**2. Структура физической картины мира.** Физическая картина мира объединяет представления о материи, пространстве и времени, движении и взаимодействии, а также физические теории. Кроме того, физическая картина мира включает принципы, выражающие связи между физическими теориями (рис. 3).

Важно понимать, что представления о материи, пространстве и времени, движении и взаимодействии, которые являются общенаучными, философскими категориями, складываются в физической науке и меняются в соответствии с её развитием.

### Вопросы для самопроверки

1. Что называют физической картиной мира? Какие физические картины мира существовали в истории физической науки?
2. Какова структура физической картины мира?
3. Как изменялись представления о материи, движении и взаимодействии по мере эволюции физической картины мира?





## КЛАССИЧЕСКАЯ МЕХАНИКА

Окружающий нас мир материален. Движение — это способ существования материи. Наиболее просто можно наблюдать **механическое движение** — изменение положения тела в пространстве относительно других тел, происходящее с течением времени. Как вам уже известно, изучением механического движения занимается такой раздел физики, как механика.

**Классическая механика**, или механика Ньютона, стала первой из существующих сегодня фундаментальных физических теорий не случайно: круг явлений, описываемых ею, связан с объектами, которые доступны наблюдению человеком даже без применения специальных приборов. В старшей школе вы опять возвращаетесь к изучению механики. Однако задача, которая стоит перед вами сейчас, несколько иная, чем прежде. Вам предстоит не только повторить уже известные законы, но также познакомиться с новыми явлениями и научиться описывать их. И ещё вы должны постараться увидеть классическую механику как стройную систему эмпирических фактов (основание), законов и принципов (ядро) и их следствий — систему, которая и представляет собой одну из фундаментальных физических теорий.

До настоящего времени законы классической механики применяются при конструировании машин и механизмов, расчёте траекторий полёта снарядов, космических аппаратов, а также в других сферах деятельности человека.

Классическая механика, подобно другим физическим теориям, имеет определённые *границы применимости*. Законы классической механики выполняются для макроскопических объектов, скорости которых существенно меньше скорости света  $c = 3 \cdot 10^8$  м/с.



## Основание классической механики

*Как вам уже известно, Ньютон сформулировал три закона динамики. При их формулировке он опирался на значительный эмпирический базис (основание) — результаты, полученные в ходе наблюдений, экспериментов и теоретических исследований Галилеем, Кеплером и многими другими учёными, а также в ходе собственных экспериментов.*

*В этой главе речь пойдёт об основных понятиях, величинах и моделях классической механики.*

### § 4. Из истории становления классической механики

#### 1. Первые представления о механическом движении.

Представление о механическом движении, его характере и причинах многократно изменялось на протяжении истории человечества. Впервые эти представления были систематизированы в Античности. Учение о мироздании, о движении тел, изложенное древнегреческим философом *Аристотелем* (384—322 до н. э.) в трактатах «Физика», «Механика» и др., господствовало в науке на протяжении 15 веков! Одна из причин такого долголетия в том, что выводы, сделанные Аристотелем на основе наблюдений и простых рассуждений, вполне соответствовали обыденным представлениям людей о механическом движении. Так, например, согласно представлениям Аристотеля, тело движется до тех пор, пока его толкают, и останавливается, когда его перестают толкать; чем тя-





Рис. 4

желее тело (чем больше его масса), тем быстрее оно должно падать на Землю. Очевидно, что и наш современник, плохо знакомый с основами физики, вполне может разделить эти взгляды.

**2. Системы мира.** Представление о движении формировалось на основе наблюдений за движением не только тел на поверхности (или вблизи поверхности) Земли, но и небесных тел — планет, Луны, Солнца и других звёзд. Для объяснения движения небесных тел древнегреческий учёный **Клавдий Птолемей** (II в.) в трактате «Великое математическое построение астрономии в XIII книгах» изложил представления о **геоцентрической** (от греч. geo — земля) **системе мира**. Согласно представлениям Птолемея, Луна, планеты и Солнце обращались вокруг Земли по круговым орбитам (рис. 4). Система мира Птолемея просуществовала вплоть до середины XVI в., когда польский учёный **Николай Коперник** (1473—1543) обосновал **гелиоцентрическую** (от греч. helios — солнце) **систему мира** (рис. 5, а). Она фактически отвечает и современному состоянию науки: в центре Солнечной системы находится Солнце, и вокруг него по орбитам обращаются планеты (рис. 5, б).

Система мира, предложенная Коперником, долгие годы не принималась его современниками, поскольку противоречила античным представлениям о движении, которые были признаны церковью. Таким образом, получалось, что Коперник покушался на догматы католической церкви, имевшей в средневековой Европе огромную власть. И только работы немецкого учёного **Иоганна Кеплера** (1571—1630), сформулировавшего на основе астрономических наблюдений законы, которым подчиняется движение планет, стали решающим аргументом в пользу учения Коперника.

**3. Научные методы исследования Галилея и Ньютона.** Исследования Галилея ознаменовали новый этап в развитии представлений о механическом движении. Но, что ещё более важно, Галилей сыграл решающую роль в становлении современной научной методологии: именно он ввёл в науку такие методы познания,

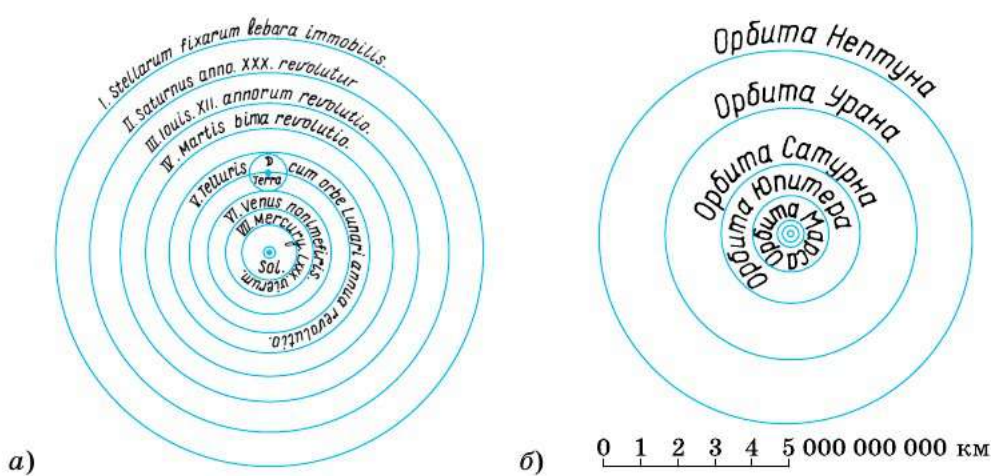


Рис. 5

как моделирование, мысленный эксперимент и натуральный эксперимент. По мнению многих учёных, Галилею удалось заложить основы современной физики.

Галилей опроверг учение Аристотеля о движении тел. Проведя ряд экспериментов (в том числе мысленных), он, в частности, сформулировал принцип инерции и закономерности равноускоренного движения тел. Галилей изучил и установил закономерности свободного падения, хотя и не сумел точно определить значение ускорения свободного падения. Впервые это удалось сделать нидерландскому учёному **Христиану Гюйгенсу** (1629—1695) в 1673 г.

Начиная работу над рукописью «Математические начала натуральной философии», Ньютон преследовал одну основную цель: обосновать и записать математически закон всемирного тяготения. Для этого Ньютон применил разработанный им научный метод исследования. Этот метод включал этапы, которые сам Ньютон описывал примерно так:

- изучить опытные факты, результаты наблюдений;
- на основе анализа этих фактов вывести общие принципы — постулаты;
- используя эти постулаты, показать, почему именно таким образом протекают наблюдаемые явления.

Применение такого метода и позволило Ньютону создать стройную научную теорию.

## Вопросы для самопроверки

1. Каковы основные представления Аристотеля о механическом движении? Почему эти представления господствовали в науке в течение нескольких веков?
2. Почему Галилея часто называют основателем современной физики?
3. В чём состоит научный метод исследования Ньютона?

## Вопросы для дискуссии

1. Почему мы уверены в том, что Земля участвует в сложном движении: вращается вокруг своей оси, обращается вокруг Солнца, движется вместе с Солнечной системой и т. д.?
2. Почему гелиоцентрическая система мира Коперника не была сразу всерьёз воспринята не только католической церковью, но и научным сообществом того времени? При подготовке используйте интернет-ресурсы и другие источники информации.

## § 5. Основные понятия классической механики

**1. Макроскопические тела.** Объекты, которые доступны наблюдению человеком даже без применения специальных приборов, называют **макроскопическими**. В настоящее время диапазон объектов, имеющих макроскопические размеры, увеличился: к их числу относят даже невидимые человеку тела, движение которых подчиняется законам классической механики. Условно считают, что нижней границей макромира являются тела, размеры которых не меньше  $10^{-8}$  м. Таким образом, макроскопическими телами можно считать как космические объекты — звёзды, планеты и др., так и тела, окружающие человека на Земле, — деревья, камни, животных, а также песчинки, пылинки и т. д.

**2. Пространство и время.** Наблюдая за движением различных тел — падением камня со скалы, полётом стрелы, выпущенной из лука, парением птицы, бегом животного, течением реки, — люди стали рассуждать о таких категориях, как пространство и время. Эти понятия, несмотря на кажущуюся простоту, относятся к числу сложнейших философских категорий. В классической механике, согласно пониманию Ньютона, принято считать, что *пространство* — «пустоеместилище» тел — *однородно* и *изотропно* (т. е. его свойства одинаковы во всех точках и по всем направлениям), а *время* *однородно*: оно равномерно течёт в одном направлении — от прошлого к будущему.

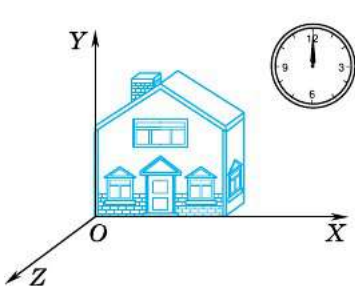


Рис. 6

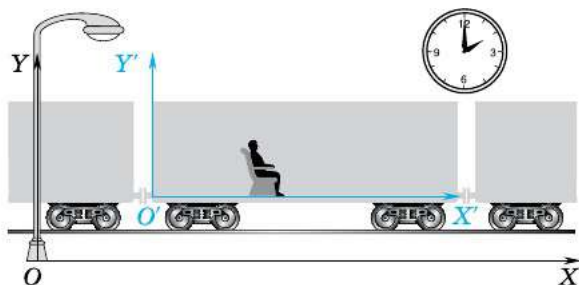


Рис. 7

**3. Тело отсчёта и система отсчёта.** Из определения механического движения следует, что говорить о движении или покое тела можно только лишь относительно какого-либо другого тела — **тела отсчёта**. Для описания движения тела, т. е. определения его положения в пространстве, необходимо с телом отсчёта связать систему координат. Чаще всего используют декартову систему координат, в которой положение точки в пространстве задаётся тремя координатами (на плоскости — двумя, при движении по прямой — одной).

Поскольку движение происходит во времени, то при описании движения необходимо использовать прибор для измерения времени (часы). Таким образом,

**тело отсчёта, связанная с ним система координат и часы составляют систему отсчёта** (рис. 6).

В зависимости от выбора системы отсчёта (тела отсчёта) рассматриваемое тело в одно и то же время может покоиться или двигаться. По этой причине говорят об **относительности механического движения**. Например, пассажир может покоиться относительно системы отсчёта  $X'O'Y'$ , связанной с вагоном поезда (рис. 7), и в то же время вместе с поездом двигаться относительно системы отсчёта  $XOY$ , связанной с землёй.

**4. Прямолинейное и криволинейное движение.** Напомним, что *траектория — это линия, вдоль которой происходит движение тела*. В зависимости от формы траектории движение может быть **прямолинейным** или **криволинейным**. Например, лифт, поднимаясь или опускаясь в шахте, движется прямолинейно, а хоккеист на вираже — криволинейно. Частным случаем криволинейного движения является **движение по окружности**.

Относительность механического движения проявляется и в том, что траектории одного и того же тела в разных системах отсчёта

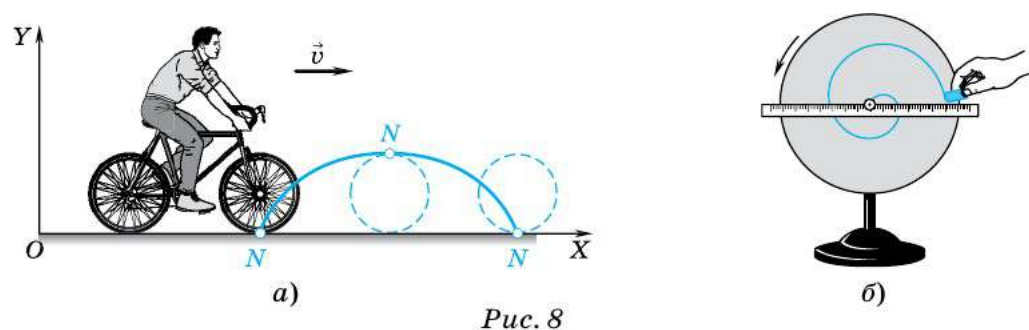


Рис. 8

могут отличаться. Например, трамвай, прямолинейно движущийся на некотором участке пути относительно Земли, в то же время совершает сложное криволинейное движение относительно Солнца вместе с Землёй, которая обращается вокруг него и вращается вокруг собственной оси. Ещё один пример: траекторией движения нишпеля колеса относительно велосипеда является окружность (рис. 8, а), а относительно Земли — кривая, называемая *циклоидой*.

Проделаем опыт. Установим диск на горизонтальной оси и укрепим горизонтально линейку таким образом, чтобы её верхняя грань проходила через ось вращения диска. Равномерно вращая диск, будем перемещать кусочек мела по линейке от центра диска к его краю (рис. 8, б). При этом мел относительно системы отсчёта, связанной с Землёй, будет двигаться прямолинейно. В то же время в системе отсчёта, связанной с вращающимся диском, траекторией движения мела будет спираль, которую можно увидеть, поскольку мел оставляет след на поверхности диска.

## Вопросы для самопроверки

1. Какие тела относят к макроскопическим?
2. Каковы представления классической механики о пространстве и времени?
3. Что составляет систему отсчёта?
4. Что называют траекторией движения тела?
5. Докажите, что траектория движения тела относительна.
6. Каким может быть движение в зависимости от формы траектории?

## § 6. Путь и перемещение

**1. Кинематические характеристики движения.** Достаточно часто при решении практических задач бывает важно узнать, в какое именно время то или иное тело окажется в той или иной точке



пространства. При этом не имеет значения, какие причины заставляют тело двигаться именно таким образом. Например, пассажир должен иметь информацию о том, в какое время отправится его автобус и в какое время он прибудет в пункт назначения. Водитель этого автобуса должен рассчитать и поддерживать скорость движения по маршруту, чтобы не нарушить график движения. Ни водителю, ни пассажиру в этом случае не важно, какие силы толкают автобус вперёд по трассе, заставляют совершать повороты на перекрёстках и т. д. Их будут интересовать только кинематические характеристики движения — путь, перемещение, скорость и т. д. Кинематическими они называются потому, что используются в кинематике.

**Кинематика** (от греч. *kinema* — движение) — раздел механики, который описывает движение, не изучая причин, вызывающих его.

**2. Путь и перемещение.** Как вы уже знаете, *путь* — это расстояние, пройденное телом вдоль траектории. Если известны начальные координаты тела  $(x_0; y_0)$  и пройденный им путь  $l$ , но неизвестна траектория движения, то определить положение этого тела в любой момент времени невозможно. Траектории тела могут быть самыми разнообразными, и, пройдя один и тот же путь, тело может оказаться в любой точке, удалённой от начальной не далее чем на расстояние  $l$  (рис. 9, а). Однако, перемещаясь из точки  $A(x_0; y_0)$  в точку  $B(x; y)$ , тело может пройти совершенно разные пути  $l_1, l_2, l_3$  и т. д. (рис. 9, б), но его конечное положение при этом будет одним и тем же. Поэтому движение характеризуют с помощью физической величины, называемой перемещением.

**Перемещение** — вектор, соединяющий начальное и конечное положения тела.

Например, можно пойти в школу пешком дворами, а можно отправиться на автобусе или на автомобиле по шоссе. Пути, пройденные в каждом из этих случаев, ве-

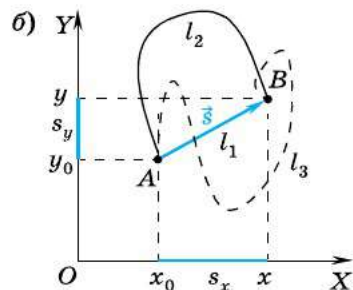
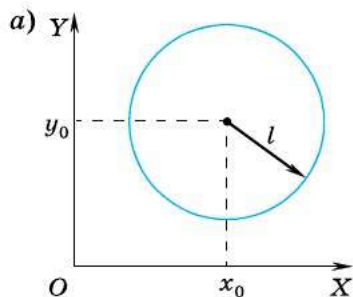


Рис. 9

роятнее всего, окажутся разными. В то же время перемещение получается одно и то же: начальное положение школьника расположено у двери его дома, а конечное — у дверей школы.

В случае, когда движение начинается и заканчивается в одной и той же точке, перемещение оказывается равным нулю, в то время как пройденный путь нулю не равен. Так, выходя утром из дома, школьник идёт в школу, там он переходит из кабинета в кабинет, в столовую, в спортивный зал и т. д., а затем после уроков возвращается домой. И хотя школьником в течение дня пройден достаточно большой путь, его перемещение за день равно нулю: движение закончилось в той же точке, в какой оно началось.

Как видно из рисунка 9, проекция перемещения тела на ось координат равна разности его конечной и начальной координат:

$$s_x = x - x_0, \quad (1)$$

$$s_y = y - y_0.$$

**3. Расчёт перемещения и координат.** Вспомним, что в зависимости от характера изменения скорости тела механическое движение может быть равномерным или неравномерным.

**Равномерным** называют движение, при котором тело за любые равные промежутки времени совершает одинаковые перемещения.

Если же тело за равные промежутки времени совершает разные перемещения, то движение является **неравномерным**. Наиболее простым случаем неравномерного движения является равноускоренное движение.

**Равноускоренным** называют движение, при котором скорость тела за любые равные промежутки времени изменяется на одну и ту же величину.

Как вам известно, формула для расчёта перемещения при равноускоренном движении имеет вид:

$$\vec{s} = \vec{v}_0 t + \frac{\vec{a} t^2}{2}, \quad (2)$$

где  $\vec{v}_0$  — начальная скорость тела,  $\vec{a}$  — ускорение тела.

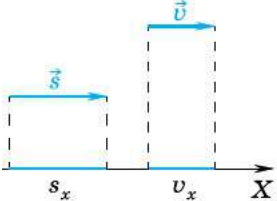


Рис. 10

Найдём проекцию вектора перемещения  $\vec{s}$  на ось  $OX$  (см. рис. 9, б). Из выражения (2) следует, что проекция  $s_x$  равна:

$$s_x = v_{0x}t + \frac{a_x t^2}{2}. \quad (3)$$

Обратим внимание, что левые части выражений (1) и (3) равны. Следовательно, равны и их правые части:

$$x - x_0 = v_{0x}t + \frac{a_x t^2}{2}.$$

Из полученного равенства выразим координату  $x$  и получим формулу для расчёта координаты тела через время  $t$  после начала движения. Такую зависимость называют **уравнением движения**.

$$x = x_0 + v_{0x}t + \frac{a_x t^2}{2}. \quad (4)$$

Аналогично можно получить выражение для координаты  $y$ :

$$y = y_0 + v_{0y}t + \frac{a_y t^2}{2}.$$

Наиболее просто использовать формулу (4) при прямолинейном движении, когда есть возможность направить ось  $X$  вдоль вектора перемещения (рис. 10).

В случае, когда тело движется равномерно и прямолинейно, его ускорение  $a$  равно нулю. Подставляя это значение в формулу (3) и учитывая, что скорость не изменяется, т. е.  $v = v_0$ , получаем формулу для расчёта проекции перемещения при равномерном прямолинейном движении:

$$s_x = v_x t.$$

### Вопросы для самопроверки

1. Что такое кинематика? Какие кинематические характеристики вам известны?
2. Что называют перемещением? Может ли перемещение оказаться равным нулю, если путь нулю не равен? В каких случаях это происходит?
3. Как рассчитать перемещение при равномерном движении; неравномерном движении?

## Упражнение 2

1. Найдите проекции вектора перемещения на оси координат (рис. 11).

2. Автомобиль совершает разворот, радиус которого 5 м. Найдите модуль перемещения автомобиля, когда он совершил половину разворота; завершил разворот.

3. Совершая учебный полёт, истребитель взлетел с аэродрома, поразил учебную цель на расстоянии в несколько сотен километров от своей базы, а затем вернулся на ту же площадку аэродрома, что и до полёта. Каково в этом случае перемещение истребителя?

4. Чтобы дойти до школы, ученик от двери своего дома проходит 300 м до перекрёстка, а затем сворачивает на перпендикулярную улицу и проходит ещё 400 м. Каков модуль перемещения ученика?

5. Лампа на фонарном столбе висит на высоте 6 м. Электрик заметил перегоревшую лампу, находясь в 8 м от столба. Вычислите модуль перемещения, которое совершит электрик, добравшись до лампы для её замены. По столбу он поднимется с помощью специальных приспособлений на обуви — «кошек».

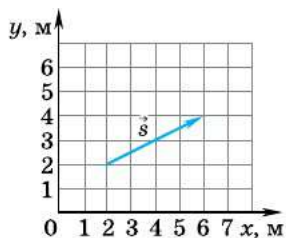


Рис. 11

## § 7. Скорость

1. **Скорость равномерного прямолинейного движения.** Наиболее просто можно сформулировать определение скорости тела при равномерном прямолинейном движении.

**Скорость равномерного прямолинейного движения — векторная физическая величина, равная отношению перемещения  $\vec{s}$  ко времени  $t$ , в течение которого оно произошло.**

$$\vec{v} = \frac{\vec{s}}{t}.$$

Единица скорости равна отношению единицы перемещения к единице времени. В СИ — это *метр в секунду* (м/с). В практических целях, например на транспорте, часто используют внесистемную единицу скорости — *километр в час* (км/ч).

График зависимости проекции скорости от времени при равномерном прямолинейном движении представляет собой прямую,



параллельную оси времени (рис. 12). Из этого графика можно узнать значение проекции перемещения, совершённого за время  $t$ : оно численно равно площади прямоугольника, ограниченного осями координат, графиком и перпендикуляром, восставленным к графику из точки  $t$ . Стороны этого прямоугольника равны соответственно проекции скорости  $v_x$  и времени  $t$ , а их произведение даёт значение проекции перемещения  $s_x$ .

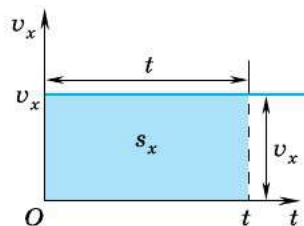


Рис. 12

**2. Средняя скорость.** При неравномерном движении тела формула скорости приобретает иной физический смысл: она является формулой **средней скорости**  $\vec{v}_{\text{ср}}$ .

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

При решении большинства практических задач описывать движение с помощью этой величины неудобно. Например, вычисленная по этой формуле средняя скорость современного военного самолёта-истребителя оказывается равной нулю, поскольку равно нулю его перемещение: истребитель начинает и заканчивает движение в одной и той же точке на аэродроме. В то же время в полёте приборы этого самолёта фиксируют значения скорости, составляющие несколько тысяч километров в час.

В практических целях удобнее применять величину, называемую **средней путевой скоростью**  $v_{\text{ср.п}}$  и равную отношению всего пройденного телом пути  $l$  ко всему затраченному на это времени.

$$v_{\text{ср.п}} = \frac{l}{t}.$$

Однако и средняя путевая скорость не даёт точного представления о движении тела по траектории. Так, тело в отдельные промежутки времени может двигаться со скоростью меньшей или большей, чем значение  $v_{\text{ср.п}}$ , или даже останавливаться на некоторое время. Например, если автобус проехал 200 км из одного города в другой за 4 ч, то средняя скорость его движения равна:

$$v_{\text{ср.п}} = \frac{200 \text{ км}}{4 \text{ ч}} = 50 \text{ км/ч}.$$

Однако во время движения скорость автобуса могла быть равной 50 км/ч лишь в некоторые моменты времени. Так, начиная

движение, водитель увеличивал скорость от нуля до некоторого значения, подъезжая к остановке, он уменьшал скорость, а на остановке какое-то время автобус стоял не двигаясь.

**3. Мгновенная скорость.** Вы уже знаете, что если тело движется неравномерно, то в каждой точке траектории значения его скорости разные. Скорость тела в данной точке траектории или в данный момент времени называют **мгновенной скоростью**.

Чтобы понять физический смысл мгновенной скорости, проведём опыт.

Установим направляющую рейку под углом к горизонту таким образом, чтобы с неё скатывалась каретка (рис. 13), в боковую поверхность которой вмонтирован магнит. На рейке установим два датчика, соединённые с секундомером: первый будет включать секундомер, когда мимо этого датчика проходит каретка, а замыкание второго датчика останавливает счёт времени. Измерив расстояние между датчиками и разделив его на время движения каретки между ними, получим значение средней скорости тела на выделенном участке.

Будем последовательно уменьшать расстояние между датчиками, приближая их к точке А. Вычисляемые в каждом опыте значения средней скорости сначала будут отличаться. Однако, начиная с некоторого расстояния между датчиками, значение средней скорости изменяться перестанет. Но если средняя скорость на участке траектории не изменяется, значит, движение на этом участке можно считать равномерным.

Таким образом,

**мгновенная скорость** — векторная физическая величина, равная отношению малого перемещения  $\vec{\Delta s}$  к малому промежутку времени  $\Delta t$ , за которое это перемещение произошло.

Отметим, что перемещение  $\vec{\Delta s}$  должно быть настолько малым, чтобы на нём не было заметно изменения скорости: только в этом случае можно считать, что средняя скорость на этом перемещении — это мгновенная скорость в любой из его точек, например в точке А.



Рис. 13



Убедимся в том, что *мгновенная скорость в каждой точке траектории направлена по касательной к ней*. Для этого выберем произвольную точку  $M$  траектории, а также точки  $A$  и  $B$ , лежащие на траектории на малых расстояниях по обе стороны от точки  $M$  (рис. 14). Как следует из определения мгновенной скорости, её направление совпадает с направлением малого перемещения  $\Delta\vec{s}$ . Последовательно сближая точки  $A$  и  $B$ , будем получать всё меньшие векторы  $\Delta\vec{s}_1, \Delta\vec{s}_2, \Delta\vec{s}_3$  и т. д., параллельные друг другу. Чем ближе точки  $A$  и  $B$ , тем точнее отношение  $\frac{\Delta\vec{s}}{\Delta t}$  будет соответствовать вектору мгновенной скорости. Таким образом, вектор мгновенной скорости в точке  $M$  направлен по касательной к траектории.

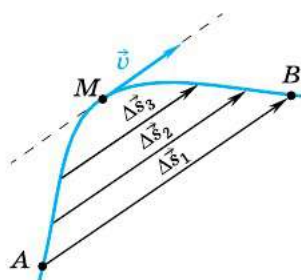


Рис. 14

Наиболее просто можно вычислить мгновенную скорость в случае равноускоренного движения.

### Вопросы для самопроверки

1. Как вычисляется скорость равномерного прямолинейного движения?
2. Что называют средней скоростью; средней путевой скоростью?
3. Что называют мгновенной скоростью? Как она направлена в произвольной точке траектории?

### Упражнение 3

1. По графику зависимости  $v_x = v_x(t)$  (рис. 15) вычислите проекцию перемещения тела за 5 с.
2. Сравните понятия «средняя скорость» и «средняя путевая скорость».
3. Автомобиль совершил разворот на  $180^\circ$  за 5 с. Каковы при этом его средняя путевая скорость и модуль средней скорости, если радиус разворота 5 м?
4. Следуя по междугороднему маршруту, автобус до первой остановки проехал 50 км за час, затем остановился на полчаса, а после этого следовал без остановок 2,5 ч, проехав при этом 150 км. С какой по модулю средней скоростью двигался автобус?

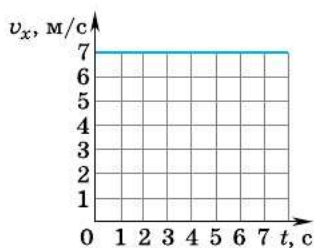


Рис. 15

5. Антилопа гну может двигаться со скоростью 80 км/ч, а акула — примерно 10 м/с. Кто из них перемещается быстрее и примерно во сколько раз?

## § 8. Ускорение

**1. Ускорение при равноускоренном движении.** Каждый наблюдал, как автомобили стоят на перекрёстке дорог, дожидаясь разрешающего сигнала светофора. Как только загорается зелёный свет, наиболее нетерпеливый из водителей резко трогается с места. Другой водитель начинает движение плавно. В результате оба автомобиля могут разогнаться до одной и той же скорости, но первый из них достигает необходимой скорости быстрее. В этом случае принято говорить, что первый автомобиль, набирая скорость, двигался с бóльшим ускорением, чем второй.

Таким образом, ускорение характеризует быстроту изменения скорости. Исходя из этого, можно записать формулу ускорения по аналогии с формулой скорости.

**Ускорение — векторная физическая величина, равная отношению изменения скорости  $\Delta\vec{v}$  ко времени  $\Delta t$ , за которое произошло это изменение.**

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

Эта формула позволяет рассчитать среднее ускорение. Если рассматривать малый промежуток времени, то расчёты по этой формуле позволяют определить мгновенное ускорение. В случае равноускоренного движения среднее и мгновенное ускорения равны. В дальнейшем мы будем рассматривать только движение с постоянным ускорением.

В СИ единица ускорения — *метр на секунду в квадрате* (м/с<sup>2</sup>).

Из формулы для расчёта ускорения тела можно выразить значение скорости в момент, когда с начала движения прошло время  $\Delta t$ .

$$\vec{v} = \vec{v}_0 + \vec{a}\Delta t.$$

В полученном выражении  $\Delta t = t - t_0$ , и если время отсчитывается с момента, когда началось движение, то  $t_0 = 0$ . Тогда формула для расчёта скорости через время  $t$  после начала движения принимает вид:

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



**2. График скорости и формула перемещения.** При прямолинейном движении, если направление оси  $OX$  параллельно перемещению тела, формула скорости, записанная через проекции величин, будет иметь вид:

$$v_x = v_{0x} + a_x t.$$

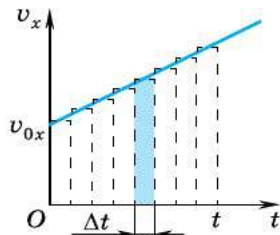


Рис. 16

График зависимости проекции скорости от времени, соответствующий этому уравнению, представляет собой прямую, поскольку это линейная зависимость. На рисунке 16 приведён график зависимости  $v_x(t)$  для случая, когда значения проекций начальной скорости и ускорения положительны. По аналогии со случаем равномерного прямолинейного движения логично предположить, что проекция перемещения, совершённого телом за время  $t$ , будет равна площади фигуры, ограниченной графиком, осями координат и перпендикуляром, восставленным к графику из точки  $t$ . В данном случае эта фигура — трапеция.

Для доказательства этого предположения рассмотрим малый отрезок времени  $\Delta t$  внутри промежутка  $Ot$ . Чем меньше  $\Delta t$ , тем больше оснований утверждать, что за это время скорость тела не изменяется (вспомним определение мгновенной скорости). Поэтому за время  $\Delta t$  движение можно считать равномерным и значение проекции перемещения равным площади соответствующего прямоугольника. Разделим трапецию на множество таких прямоугольников (см. рис. 16). Поскольку площадь рассматриваемой трапеции равна сумме площадей этих прямоугольников, то значение проекции перемещения также равно этой площади. Из курса геометрии известно, что площадь трапеции равна произведению полусуммы её оснований и высоты. В нашем случае основания равны  $v_{0x}$  и  $(v_{0x} + a_x t)$ , а высота  $t$ . Следовательно,

$$s_x = \frac{1}{2}(v_{0x} + v_{0x} + a_x t)t,$$

или окончательно получаем формулу для расчёта проекции перемещения при равноускоренном движении:

$$s_x = v_{0x}t + \frac{a_x t^2}{2}.$$



**3. Линейная скорость. Период обращения. Центробежное ускорение.** Напомним, что если тело разгоняется или тормозит, двигаясь по прямой, то векторы ускорения и скорости направлены вдоль этой прямой. Если же векторы скорости и ускорения направлены под углом друг к другу, то это означает, что скорость изменяет направление: тело поворачивает, т. е. движется криволинейно. Наиболее простым случаем криволинейного движения является движение по окружности с постоянной по модулю скоростью. Так движутся, например, скамейки на вращающейся с постоянной скоростью карусели или бегут дрессированные животные вдоль бортика цирковой арены.

Мгновенную скорость, с которой тело движется по окружности, называют **линейной скоростью**. Если при движении по окружности модуль линейной скорости  $v$  остаётся неизменным, то каждый оборот тело совершает за одно и то же время, называемое **периодом обращения**  $T$ . Чтобы рассчитать период обращения, следует путь  $l$ , проходимый телом за один полный оборот, разделить на линейную скорость. Поскольку этот путь равен длине окружности, по которой движется тело, то период равен:

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

где  $l = 2\pi R$  — длина окружности,  $R$  — её радиус.

При движении по окружности с постоянной по модулю скоростью направление линейной скорости непрерывно изменяется. При этом в каждой точке окружности ускорение направлено вдоль радиуса окружности к её центру (рис. 17, а). Из курса физики основной школы вам уже известно, что такое ускорение называют **центробежным**  $a_{ц.с.}$ , и его модуль можно рассчитать, зная радиус окружности  $R$  и модуль линейной скорости  $v$ .

$$a_{ц.с.} = \frac{v^2}{R}.$$

Любое криволинейное движение можно с достаточной степенью точности предста-

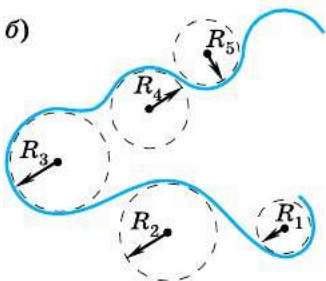
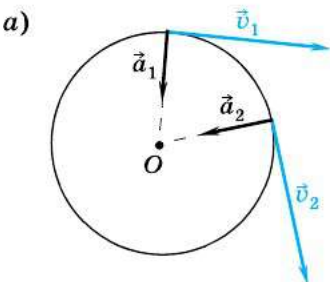


Рис. 17

вить как движение по окружностям разных радиусов (рис. 17, б). Поэтому формулу центростремительного ускорения можно применять в случае любого криволинейного движения с постоянной по модулю скоростью, подставляя в неё значение радиуса, соответствующее кривизне того или иного участка траектории.

### Вопросы для самопроверки

1. Дайте определение ускорения по плану (см. Приложение).
2. Как вычисляется ускорение при равноускоренном движении?
3. Как вычислить перемещение при равноускоренном движении, используя график скорости?
4. Как связаны центростремительное ускорение, линейная скорость и радиус траектории при движении тела по окружности с постоянной по модулю скоростью?

### Упражнение 4

1. Скорость материальной точки изменяется по закону  $v = 4t$  (м/с). Запишите уравнение движения  $x = x(t)$ , если в начале движения координата точки была  $x_0 = 5$  м.
2. При экстренном торможении автомобиль, двигавшийся со скоростью 60 км/ч, остановился через 3 с после начала торможения. Какой тормозной путь он прошёл?
3. Считая радиус земного шара равным 6400 км, вычислите линейную скорость и центростремительное ускорение точки земной поверхности, расположенной в Санкт-Петербурге, географическая широта которого  $60^\circ$ .
4. Постройте график зависимости  $v_x = v_x(t)$ , если тело начинает равноускоренно двигаться из состояния покоя и через 4 с его скорость становится равной 2 м/с. Каково ускорение тела? Используя график, вычислите перемещение тела за 2 с.
5. По графику зависимости  $v_x = v_x(t)$  (рис. 18) определите: а) проекцию начальной скорости  $v_{0x}$ ; б) проекцию ускорения  $a_x$ ; в) перемещение за первые 4 с движения.

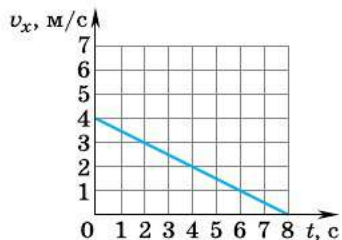


Рис. 18

## § 9. Динамические характеристики движения

**1. Кинематика и динамика.** Кинематика описывает механическое движение, однако не даёт информации о причинах, его вызывающих. Ещё одним разделом механики является динамика (от греч. dynamikos — сильный, мощный).

**Динамика изучает движение макроскопических тел, рассматривая причины различных видов движения.**

Для этого приходится рассматривать взаимодействие между телами, что вызывает необходимость, наряду с кинематическими характеристиками движения, использовать динамические характеристики, основными из которых являются масса, сила, импульс.

**2. Масса.** Человек, как правило, сталкивается с термином «масса», совершая покупки. На упаковках многих товаров указана их масса в килограммах или граммах, причём чаще всего чем крупнее упаковка, тем больше её масса. Стоимость товара тоже может зависеть от его массы. Так, например, чем больше вы покупаете яблок, тем больше их масса, а значит, большей будет и стоимость покупки. Таким образом, масса может восприниматься как некая мера количества вещества. Именно такое понимание массы сложилось в науке к XVII в.

В классической механике, с одной стороны, *масса характеризует инертные свойства тел*, т. е. является мерой инертности тел. Опыт показывает, что даже при работающем на максимальных оборотах двигателе автомобиль будет дольше разгоняться до определённой скорости, когда в нём помимо водителя будут находиться и пассажиры. Когда автомобиль имеет бóльшую массу (с учётом массы пассажиров), он более инертен.

С другой стороны, *масса характеризует гравитационные свойства тел, т. е. свойства, связанные с тяготением*. Вы знаете, что сила тяжести, действующая на тело, зависит от его массы. Например, поднимать чемодан, преодолевая силу тяжести, гораздо легче, когда он пуст, нежели когда он заполнен. Опыты показывают, что *инертная масса тела в точности равна его гравитационной массе*.

В классической механике *масса аддитивна* (от лат. *additio* — прибавление): *масса системы тел равна сумме масс тел, составляющих эту систему*.

В СИ массу ( $m$ ) измеряют в килограммах (кг). Наиболее распространённым способом её измерения является взвешивание.

**3. Сила.** Катящийся по футбольному полю мяч в конце концов остановится. Причиной остановки станет либо трение о траву, либо удар о ногу футболиста или стойку ворот, либо действие со стороны какого-либо другого тела. *Действие одного тела на другое характеризует физическая величина сила ( $\vec{F}$ )*.

Сила — величина векторная. Результат действия силы зависит от её *направления* и *модуля*. Так, в зависимости от направления, в котором локомотив потянет вагоны, они начнут движение в ту или другую сторону. Чем больше модуль силы, приложенной к вагонам, тем быстрее они будут разгоняться. В СИ единица силы — **ньютон (Н)**.

Результат действия силы определяется и *точкой её приложения*. Проведем опыт. Поставим вертикально деревянный брусок

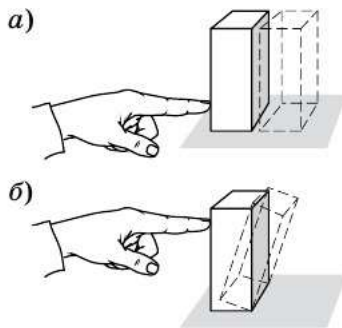


Рис. 19

на стол и несильно надавим на брусок пальцем. В первом случае палец приложим у основания бруска (рис. 19, а), а во втором — у верхней грани (рис. 19, б). Результат действия силы будет разным: в первом случае брусок сдвинется с места, а во втором — опрокинется.

Вам известно, что силы, действующие на тело, имеют разную природу. На уроках физики вы познакомились с различными видами сил и научились их рассчитывать. Так, например, сила тяжести равна произведению массы тела и ускорения свободного падения:  $F_{\text{тяж}} = mg$ .

Значение силы упругости, возникающей при деформации, вычисляется как произведение удлинения  $x$  и жёсткости  $k$ :  $F_{\text{упр}} = -kx$ . Знак «минус» в формуле означает, что сила упругости направлена в сторону, противоположную смещению частиц тела при деформации.

Сила трения скольжения прямо пропорциональна силе реакции опоры:  $F_{\text{тр}} = \mu N$ , где  $\mu$  — коэффициент трения скольжения.

Поскольку сила является мерой действия одного тела на другое, то, говоря о действии силы, всегда можно указать тело, со стороны которого эта сила действует. Например, стрела, выпущенная из лука, начинает движение под действием силы упругости натянутой тетивы, а автомобиль останавливается при торможении под действием силы трения, действующей со стороны дорожного полотна. Однако, как вы убедитесь несколько позже, определённо указать, со стороны какого тела действует та или иная сила, можно лишь при рассмотрении движения в *инерциальных системах отсчёта*.

**4. Импульс тела и импульс силы.** Если о кирпичную стену ударятся движущиеся с одинаковыми скоростями футбольный мяч и пушечное ядро, то результаты этих ударов будут разными. Разными будут и результаты удара о преграду двух снарядов, один

из которых подлетает к ней со скоростью 30 м/с, а другой — со скоростью 3 м/с. В первом случае снаряд может пробить преграду, а во втором слегка её деформировать. Для описания подобных явлений используют понятие **импульс тела** ( $\vec{p}$ ).

Вам известно, что

**импульсом тела называют векторную физическую величину, равную произведению массы тела  $m$  и его скорости  $\vec{v}$ .**

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

Таким образом, импульс стоящего у перрона многотонного электровоза будет меньше импульса движущегося вдоль перрона велосипеда, поскольку скорость электровоза и его импульс равны нулю. Но если электровоз начнёт двигаться вдоль перрона с той же скоростью, что и велосипед, то его импульс будет во столько же раз превышать импульс велосипеда, во сколько раз отличаются их массы.

В СИ единица импульса тела — *килограмм-метр в секунду* (кг·м/с).

Опыты показывают, что результат действия силы зависит от времени её действия. Рассмотрим опыт. Подвесим гирию на тонкой нити (рис. 20, а). Снизу привяжем к гире вторую такую же нить. Резко дернем за конец нижней нити, она при этом порвётся, а гирия останется висеть (рис. 20, б). Если же медленно тянуть за конец нижней нити, то оборвётся верхняя нить, и гирия упадёт (рис. 20, в). В рассмотренных опытах различалось время, в течение которого сила действовала на гирию.

**Импульсом силы называют векторную физическую величину, равную произведению силы  $\vec{F}$  и времени  $\Delta t$ , в течение которого**

**эта сила оказывает действие на тело:  $\vec{F}\Delta t$ .**

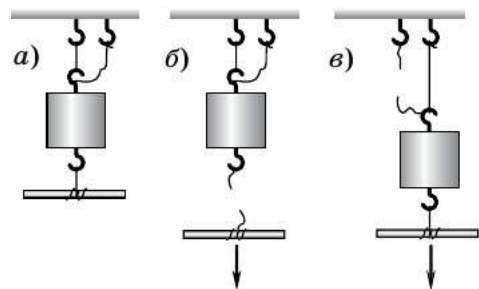


Рис. 20

В первом рассмотренном опыте импульс силы был недостаточно большим, чтобы привести гирию в движение, поскольку сила действовала кратковременно.

В СИ единица импульса силы — *ньютон-секунда* (Н·с).

## Вопросы для самопроверки

1. Какие свойства тела характеризует масса?
2. Что понимают под аддитивностью массы?
3. Что характеризует сила?
4. Что называют импульсом тела; импульсом силы?

## Упражнение 5

1. Со стороны какого тела действует сила, продвигающая пловца вперёд по водной дорожке?
2. Какую силу в горизонтальном направлении необходимо приложить, чтобы сдвинуть стоящий на горизонтальном полу ящик массой 20 кг, если коэффициент трения между ящиком и полом 0,5?
3. На сколько сантиметров растянется пружина жёсткостью 100 Н/м, если к ней подвесить гирию массой 200 г?
4. С какой скоростью должен ехать мотоцикл, чтобы его импульс был равен импульсу легкового автомобиля, движущегося со скоростью 60 км/ч? Масса мотоцикла 350 кг, масса автомобиля 1,05 т.

## Вопросы для дискуссии

1. Можно ли объяснить инертность тел действием какой-либо силы? Если можно, то обоснуйте ответ.
2. Какие повседневные наблюдения свидетельствуют о том, что результат действия силы зависит не только от её значения, но и от точки приложения?
3. Как вы считаете, полезно или вредно трение?

## § 10. Идеализированные объекты

**1. Модели.** Любое явление природы чрезвычайно многогранно. Чтобы его изучить и описать, в науке применяют идеализированные объекты — **модели**. Идеализированный объект отличается от реального тем, что отражает только его главные, основные, существенные в данных условиях свойства и не отражает несущественные. Например, часто считают, что Земля имеет шарообразную форму (рис. 21, а), хотя уже давно известно, что земной шар несколько сплюснут у полюсов (рис. 21, б). Кроме того, на поверхности Земли есть высокие горные системы, а также низменности, что ещё больше отличает

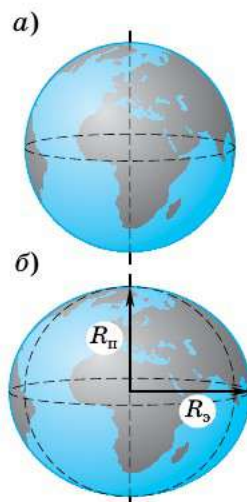


Рис. 21

форму Земли от шарообразной. Однако можно использовать шарообразную модель Земли при решении таких задач, в которых форма планеты не оказывает существенного влияния на рассматриваемые процессы и явления.

Позволяя получать научную информацию о реальных физических объектах и явлениях, модели могут существенно отличаться от этих объектов. Физические законы и физические теории, описывая идеализированные объекты и взаимодействия между ними, дают возможность распространять получаемые выводы на реальные объекты и явления. Но именно по этой причине приходится говорить о границах применимости того или иного закона, той или иной теории.

В классической механике используется целый ряд идеализированных объектов. Некоторые из них вам уже знакомы, например материальная точка, абсолютно упругое тело.

**2. Материальная точка.** Описывая механическое движение тела, указывают его положение в пространстве в различные моменты времени. Однако любое макроскопическое тело имеет размеры (длину, высоту, ширину) и занимает в пространстве некоторый объём. Таким образом, возникает проблема: координаты какой из бесконечного множества точек, составляющих движущееся тело, необходимо отслеживать? Наиболее простое решение этой проблемы даёт использование модели, называемой **материальной точкой**.

**Материальная точка** — макроскопическое тело, размерами которого при решении данной задачи можно пренебречь.

Понятие «материальная точка» отличается от понятия «точка», применяемого в геометрии: материальная точка, в отличие от точки геометрической, имеет массу.

Тело можно рассматривать как материальную точку в задачах, связанных с поступательным движением тел. *При поступательном движении все точки тела движутся одинаково.* В поступательном движении участвуют, например, поршень в цилиндре двигателя внутреннего сгорания (рис. 22), лифты в зданиях и шахтах, кабинки аттракционов «Колесо обозрения», купе в железнодорожных вагонах на прямолинейных участках траектории.

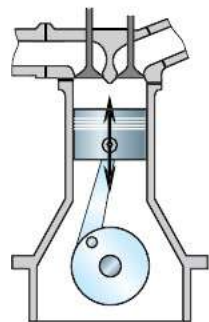


Рис. 22







Рис. 23

Тело можно принимать за материальную точку при решении задач, в которых *пройденный путь существенно больше собственных размеров тела*. Так, описывая географические открытия Колумба, Магеллана и других мореплавателей, можно указывать их маршруты на глобусе или карте, принимая «Санта-Марию» и другие корабли за материальные точки. Вам известно, что в качестве материальных точек могут рассматриваться и тела гигантских размеров, такие как Солнце и планеты, если в задачах фигурируют расстояния между этими телами или рассматривается движение, совершаемое ими в течение длительного времени (рис. 23).

Одно и то же тело в некоторых ситуациях можно считать материальной точкой, а в некоторых — нельзя. Так, оценивая период обращения Земли вокруг Солнца, нашу планету можно принять за материальную точку, а при вычислении расстояний, проходимых верхней точкой Останкинской башни (рис. 24) вследствие вращения Земли вокруг своей оси, этого делать нельзя. Другой пример: автомобиль при движении по скоростной трассе, соединяющей два города, можно считать материальной точкой. Но если автомобиль попадает в аварию и рассматривается деформация его кузова, то модель материальной точки неприменима: в такой задаче становятся существенными перемещение и взаимодействие отдельных частей корпуса автомобиля.

При решении большинства задач, говоря о движении тела, мы рассматривали и будем рассматривать в дальнейшем движение материальной точки.

**3. Абсолютно упругое тело.** Вспомним опыт по градуировке шкалы динамометра.



Рис. 24



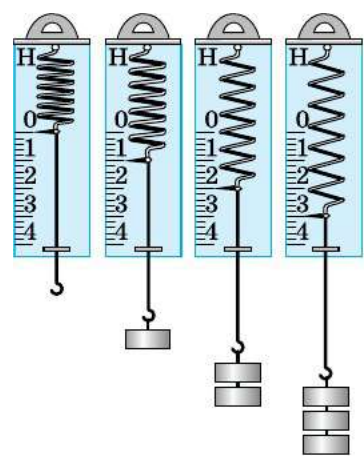


Рис. 25

К пружине, верхний конец которой закреплён, а к нижнему концу прикреплена стрелка, подвесим сначала один груз массой 100 г, а затем два, три, четыре таких же груза, каждый раз отмечая положение стрелки на шкале. Результаты этого опыта (рис. 25) и подобных ему показывают, что возникающая в пружине сила упругости прямо пропорциональна удлинению пружины. Однако эта закономерность проявляется лишь при удлинениях, незначительных по сравнению с длиной самой пружины. Опыт показывает, что, если пружину сильно растянуть, она уже не примет первоначальной формы после снятия внешнего воздействия: в

этом случае говорят, что при деформации пройден предел упругости. Но при решении ряда задач удобно и вполне допустимо считать, что никакого предела упругости не существует и сила упругости остаётся прямо пропорциональной удлинению при любой деформации. Такое тело называют **абсолютно упругим телом**.

Абсолютно упругое тело — модель, которая позволяет существенно упростить решение задач, связанных, например, с рассмотрением соударений тел.

**4. Абсолютно твёрдое тело.** Если бы в рассмотренном опыте с пружиной к ней подвесили груз массой не 100 г, а 1 г, пружина тоже деформировалась бы. Но деформация эта была бы крайне незначительной, незаметной на глаз. Точно так же невозможно заметить деформацию крышки парты под действием лежащей на ней книги или полотна дороги под весом большегрузного автомобиля. В ситуациях, когда деформация тела под действием внешней силы крайне мала, можно считать, что деформация отсутствует вовсе, и тем самым перейти от рассмотрения реального физического тела к рассмотрению его модели — **абсолютно твёрдого тела**.

**Абсолютно твёрдым** называют тело, которое при любых воздействиях на него сохраняет форму и размеры.

К рассмотренным в этом параграфе и к другим моделям, которые используются в классической механике, мы будем постоянно обращаться в ходе изучения курса физики.

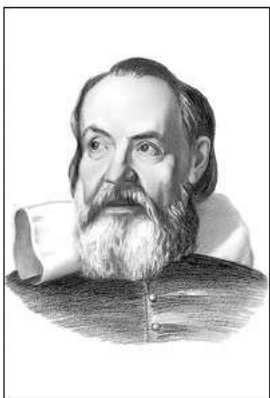


1. Что общего между реальным объектом и его моделью? Чем они различаются?
2. Почему выбор модели определяет границы применимости физических законов и теорий?
3. Чем материальная точка отличается от геометрической? В каких случаях можно применять модель материальной точки?
4. Что такое абсолютно упругое тело; абсолютно твёрдое тело?

## § 11. Основание классической механики

**1. Опыты Галилея.** Вы уже знаете, что представления о механическом движении были систематизированы в Античности, и учение Аристотеля господствовало в науке на протяжении многих столетий. Галилей познакомился с трудами Аристотеля в юности и усомнился в справедливости выводов, сделанных великим философом. Для Аристотеля, как и для других учёных Античности, был характерен подход к изучению природы, который можно назвать созерцательным, умозрительным. Галилея это не устраивало: ему требовались факты, доказывающие верность выводов. Получению этих фактов он посвятил всю свою жизнь.

В частности, Галилей изучал свободное падение тел. Он предположил, а затем сумел установить, что падение разных тел с различной скоростью обусловлено сопротивлением воздуха, а не раз-



*Галилео Галилей* (1564—1642) — выдающийся итальянский физик и астроном, основатель современной экспериментальной физики. Сформулировал принцип относительности; исследовал свободное падение тел; установил принцип инерции; открыл закон сложения движений; построил первую зрительную трубу, с помощью которой открыл горы и кратеры на Луне, пятна на Солнце, четыре спутника Юпитера, доказал, что Млечный Путь состоит из множества звёзд. Астрономические исследования Галилея стали экспериментальным подтверждением учения Коперника. Сконструировал микроскоп, термоскоп, гидростатические весы; предложил применять маятник для измерения времени.

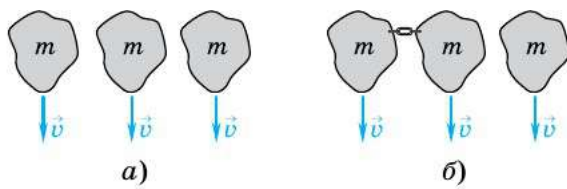


Рис. 26

ностью масс падающих тел (как предполагал Аристотель): скорость свободного падения не зависит от массы тела.

Прежде всего, Галилей провёл мысленный эксперимент, доказывающий правильность его предположения «от обратного»: согласно учению Аристотеля, скорости падения трёх одновременно отпущенных совершенно одинаковых камней будут одинаковы (рис. 26, а). Если же отпустить эти камни, предварительно соединив два из них невесомой цепью (рис. 26, б), то на результат это не повлияет: скорости опять-таки будут одинаковы. Но во втором опыте падают не три тела одинаковой массы, а два, причём масса одного из этих тел в 2 раза больше, чем масса второго. Таким образом, противоречие, полученное в ходе мысленного эксперимента, свидетельствовало в пользу предположения Галилея.

Не ограничиваясь мысленными экспериментами, Галилей проводил натурные опыты, сбрасывая шары с некоторого возвышения (согласно легенде, с Пизанской башни). Опыты показали, что независимо от массы одновременно отпущенные с одинаковой высоты шары достигали поверхности земли также одновременно (рис. 27).

Галилей предположил, что шары падают равноускоренно, но этот факт невозможно было доказать на опыте, поскольку пришлось бы отмечать положения быстро падающих шаров через достаточно малые промежутки времени, а в XVI в. ещё не было точных приборов, позволяющих осуществлять подобные измерения. Поэтому Галилей исследовал качение шаров по наклонному деревянному жёлобу, тем самым замедлив их падение, и показал, что движение шаров равноускоренное. Формула для расчёта пути при равноускоренном движении без начальной скорости  $s = at^2/2$  была впервые получена именно Галилеем.

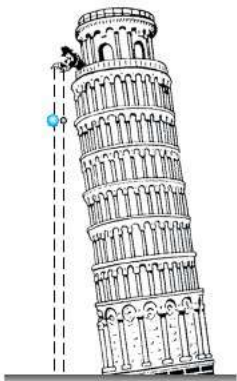


Рис. 27



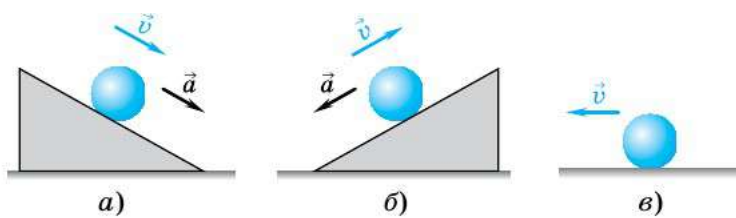


Рис. 28

Анализируя результаты своих экспериментов, Галилей обосновал **принцип инерции**, прибегая для этого к следующим рассуждениям: опыты показывают, что, двигаясь по наклонной плоскости вниз, тело ускоряется (рис. 28, *а*), при движении вверх — замедляется (рис. 28, *б*). А если бесконечная плоскость не имеет наклона, то в таком случае нет причины, которая может заставить движущееся по ней тело ускориться или замедлиться (рис. 28, *в*). Таким образом,

**в отсутствие внешнего воздействия тело находится в состоянии равномерного прямолинейного движения или покоя.**

Галилей изучал акустику, колебания маятников, а в 1609 г. построил телескоп и наблюдал с его помощью Луну и планеты, открыл спутники Юпитера, увидел на Солнце пятна. Эти наблюдения, в частности, заставили Галилея окончательно принять гелиоцентрическую систему мира Коперника.

**2. Астрономические наблюдения.** Попытки проверить состоятельность системы мира Коперника с помощью астрономических наблюдений предпринимались не только Галилеем, но и другими учёными в XVI и начале XVII в. Так, датский астроном **Тихо Браге** (1546—1601) в течение многих лет проводил точные измерения положений и перемещений планет на небе. Результаты своего кропотливого труда он отразил в объёмных таблицах, которыми впоследствии воспользовался его ученик и последователь Кеплер. Дополнив данные Браге результатами собственных наблюдений, Кеплер эмпирически (из наблюдений) установил три закона, по которым происходит движение планет и других тел Солнечной системы.

Прежде чем сформулировать законы Кеплера, необходимо познакомиться с такой фигурой, как эллипс. На плоской доске закрепим концы нити (например, с помощью канцелярских кнопок)



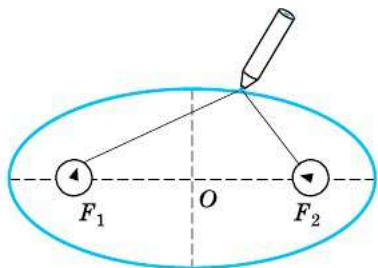


Рис. 29

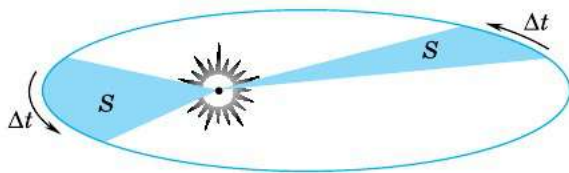


Рис. 30

и, натягивая нить карандашом, начертим на доске замкнутую кривую (рис. 29). Мы получим эллипс.

**Эллипсом** называют геометрическое место точек, сумма расстояний от каждой из которых до двух данных точек — фокусов эллипса — одинакова. На рисунке обозначены:  $O$  — центр эллипса,  $F_1$  и  $F_2$  — его фокусы. Чем ближе друг к другу расположены фокусы эллипса, тем он ближе по форме к окружности. Если оба фокуса находятся в одной точке, то эллипс превращается в окружность.

**Первый закон Кеплера:**

**каждая из планет Солнечной системы движется по эллипсу, в одном из фокусов которого находится Солнце.**

**Второй закон Кеплера:**

**радиус-вектор, соединяющий центр Солнца с планетой, за равные промежутки времени описывает равные площади (рис. 30).**

**Третий закон Кеплера:**

**квадраты периодов обращения планет вокруг Солнца относятся друг к другу как кубы средних расстояний этих планет от Солнца.**

Таким образом, если периоды обращения каких-либо двух планет равны  $T_1$  и  $T_2$ , а их средние расстояния от Солнца составляют соответственно  $R_1$  и  $R_2$ , то третий закон Кеплера можно записать в виде:

$$\frac{T_1^2}{T_2^2} = \frac{R_1^3}{R_2^3}.$$

Сформулировав три закона, Кеплер не мог дать им объяснение: он не знал причину, по которой движение небесных тел подчиняется именно таким законам.



В этом параграфе приведены лишь отдельные примеры, показывающие, что к XVII в. в ходе проведения экспериментов и специально организованных наблюдений, в теоретических исследованиях и в практической деятельности было выявлено множество таких фактов, которые не могли получить объяснение на основе сложившихся к тому времени теоретических представлений. Эти факты и выводы, полученные в результате опытов Галилея, наблюдений Браге и Кеплера, а также опытов и наблюдений других учёных, составили *эмпирический базис*, на основе которого Ньютоном была построена первая физическая теория — классическая механика.

## Вопросы для самопроверки

1. В чём состоял мысленный эксперимент Галилея, показывающий, что скорость свободно падающего тела не зависит от его массы?
2. Какие натурные эксперименты Галилей поставил для изучения закономерностей свободного падения?
3. В чём состоит принцип инерции Галилея? Как Галилей его обосновывал?
4. Сформулируйте законы Кеплера.
5. Почему можно сказать, что работы Галилея, Кеплера и многих других учёных составляют эмпирический базис классической механики?

## Упражнение 6

1. За сколько земных суток делает полный оборот вокруг Солнца Венера, если её среднее расстояние от Солнца составляет 108,2 млн км, а среднее расстояние Земли от Солнца 149,6 млн км?
2. Каково среднее расстояние от Юпитера до Солнца, если год на Юпитере длится 11,86 земного года?

## Самоконтроль

Выполните в рабочей тетради тренировочный тест 1.



## Основное в главе

### 1. Структура классической механики.

#### ОСНОВАНИЕ КЛАССИЧЕСКОЙ МЕХАНИКИ

Основные понятия  
и величины

Идеализированные  
объекты-модели

Эмпирические факты,  
полученные в результате  
опытов и наблюдений

### 2. Основные понятия (табл. 1).

Таблица 1

<i>Понятие</i>	<i>Определение</i>
Механическое движение	Изменение положения тела в пространстве относительно других тел, происходящее с течением времени
Система отсчёта	Тело отсчёта, связанная с ним система координат и часы
Траектория	Линия, вдоль которой происходит движение тела

### 3. Основные величины (табл. 2).

Таблица 2

<i>Величина</i>	<i>Обозначение</i>	<i>Единица</i>	<i>Определение</i>	<i>Формула</i>
Путь	$l$	м	Расстояние, пройденное телом вдоль траектории	$l = v_{\text{cp}}t$
Перемещение	$\vec{s}$	м	Вектор, соединяющий начальное и конечное положения тела	$\vec{s} = \vec{v}_0t + \frac{\vec{a}t^2}{2}$



Величина	Обозначение	Единица	Определение	Формула
Скорость равномерного прямолинейного движения	$\vec{v}$	м/с	Векторная физическая величина, равная отношению перемещения $\vec{s}$ ко времени $t$ , в течение которого оно произошло	$\vec{v} = \frac{\vec{s}}{t}$
Средняя путевая скорость	$v_{\text{ср. п}}$	м/с	Величина, равная отношению всего пройденного телом пути $l$ ко всему затраченному на это времени $t$	$v_{\text{ср. п}} = \frac{l}{t}$
Мгновенная скорость	$\vec{v}$	м/с	Векторная физическая величина, равная отношению малого перемещения $\Delta\vec{s}$ к малому промежутку времени $\Delta t$ , за которое это перемещение произошло	$\vec{v} = \frac{\Delta\vec{s}}{\Delta t}$
Ускорение	$\vec{a}$	м/с <sup>2</sup>	Векторная физическая величина, равная отношению изменения скорости $\Delta\vec{v}$ ко времени $\Delta t$ , за которое произошло это изменение	$\vec{a} = \frac{\Delta\vec{v}}{\Delta t} = \frac{\vec{v} - \vec{v}_0}{\Delta t}$
Масса	$m$	кг	Мера инертных свойств тела и одновременно мера его гравитационных (связанных с тяготением) свойств	
Сила	$\vec{F}$	Н	Векторная величина, мера действия одного тела на другое	

Величина	Обозначение	Единица	Определение	Формула
Импульс тела	$\vec{p}$	кг·м/с	Векторная физическая величина, равная произведению массы тела $m$ и его скорости $\vec{v}$	$\vec{p} = m\vec{v}$
Импульс силы		Н·с	Векторная физическая величина, равная произведению силы $\vec{F}$ и времени $\Delta t$ , в течение которого эта сила оказывает действие на тело	$\vec{F}\Delta t$

## 4. Основные модели (табл. 3).

Таблица 3

Модель	Определение	Чем пренебрегают	Условия применения
Материальная точка	Макроскопическое тело, размерами которого при решении данной задачи можно пренебречь	Размерами тела	Размеры тела малы по сравнению с перемещением или тело движется поступательно
Абсолютно упругое тело	Тело, в котором при любых деформациях сила упругости прямо пропорциональна удлинению	Существованием предела упругости	Деформации незначительны
Абсолютно твёрдое тело	Тело, которое при любых воздействиях на него сохраняет форму и размеры	Деформацией при внешнем воздействии	Деформации незначительны по сравнению с размерами тела

5. Законы, полученные как результат эксперимента (эмпирические законы) (табл. 4).

**Таблица 4**

<i>Эмпирический закон</i>	<i>Формулировка</i>
Принцип инерции Галилея	В отсутствие внешнего воздействия тело находится в состоянии равномерного прямолинейного движения или покоя
Первый закон Кеплера	Каждая из планет Солнечной системы движется по эллипсу, в одном из фокусов которого находится Солнце
Второй закон Кеплера	Радиус-вектор, соединяющий центр Солнца с планетой, за равные промежутки времени описывает равные площади
Третий закон Кеплера	Квадраты периодов обращения планет вокруг Солнца относятся друг к другу как кубы средних расстояний этих планет от Солнца

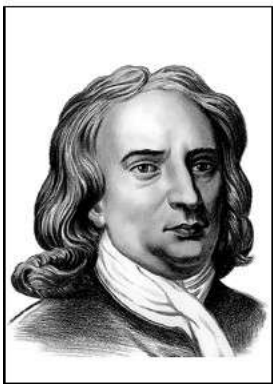


## Ядро классической механики

*Законы Ньютона, а также законы сохранения, являющиеся фундаментальными законами естествознания, и ряд принципов (прежде всего, принцип независимости действия сил) составляют ядро классической механики.*

### § 12. «Математические начала натуральной философии» Ньютона

**1. Применение научного метода Ньютоном.** Английский физик Ньютон, как и некоторые другие учёные — его предшественники и современники, предпринял попытку объяснить многочисленные разрозненные факты, полученные в ходе опытов и наблюдений. Основным законом, с помощью которого можно было



**Исаак Ньютон** (1643—1727) — выдающийся английский учёный, создатель классической физики, член, а затем президент Лондонского королевского общества, иностранный член Парижской академии наук.

Известен своими работами в области механики, математики, оптики, астрономии. Сформулировал основные законы и понятия классической механики; открыл закон всемирного тяготения; разработал теорию движения небесных тел; при помощи трёхгранной стеклянной призмы разложил белый свет в спектр; объяснил происхождение цветов; сконструировал телескоп-рефлектор.

объяснить эти факты, Ньютон считал закон всемирного тяготения. Как вы уже знаете, обоснование этого закона, его формулировка и математическая запись стали основными целями создания труда «Математические начала натуральной философии».

После изучения и анализа опытных фактов и результатов наблюдений Ньютон, следуя своему методу, вывел общие законы, которые сегодня в память о великом учёном называют **законами динамики Ньютона**.

**2. Первый закон Ньютона.** В качестве первого закона Ньютон принял принцип инерции, сформулированный Галилеем, несколько уточнив его. В частности, Галилей, в отличие от Ньютона, относил к движению по инерции случай движения по окружности с постоянной по модулю скоростью. Поправки в формулировку закона вносились и после Ньютона. Наиболее важной из них является поправка о том, что принцип инерции выполняется только в *инерциальных* системах отсчёта. С учётом этого **первый закон Ньютона** формулируется так:

**существуют системы отсчёта, относительно которых тело в отсутствие внешнего воздействия сохраняет своё состояние равномерного прямолинейного движения или покоя.**

Такие системы отсчёта называют **инерциальными**. Первый закон Ньютона называют также **законом инерции**.

В быту возникают ситуации, когда тело в отсутствие внешнего воздействия начинает двигаться ускоренно. Традиционный пример подобного явления — наклон вперёд стоящего в автобусе пассажира при резкой остановке. Пассажир, покоившийся до начала торможения относительно системы отсчёта, связанной с автобусом, в момент торможения начинает ускоренно двигаться. При этом нельзя указать тело, под действием которого пассажир меняет скорость относительно автобуса. Однако ничего парадоксального в этом явлении нет: просто в данном случае рассматривается движение пассажира относительно автобуса, который при торможении движется ускоренно относительно земли. Система отсчёта, связанная с автобусом, является неинерциальной. Если рассмотреть то же явление относительно системы отсчёта, связанной с землёй, можно наблюдать действие первого закона Ньютона: при торможении пассажир наклоняется, так как, согласно закону инерции, продолжает двигаться относительно земли, поскольку нет силы, заставляющей его остановиться. Систему отсчёта, связанную



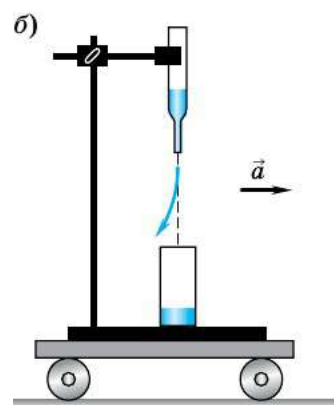
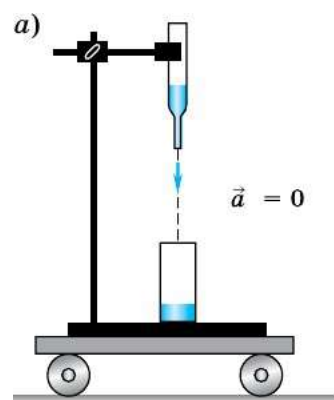


Рис. 31

с землёй, в данном случае можно считать инерциальной.

Проделаем опыт. Укрепим на штативе капельницу и поставим на основание штатива мензурку таким образом, чтобы вода из капельницы падала прямо в неё. Будем перемещать штатив, установленный на тележке, по горизонтальной поверхности стола. В случае равномерного движения тележки (рис. 31, а) капли будут попадать в мензурку так же, как если бы тележка покоилась. При ускоренном движении тележки (рис. 31, б) капли из капельницы в мензурку не попадут. Таким образом, в первом случае систему отсчёта, связанную с тележкой, можно считать инерциальной, а во втором — нет.

Заметим, что, строго говоря, нет ни одной системы отсчёта, связанной с реальным телом, которую можно было бы считать инерциальной. Инерциальная система отсчёта — это идеализированное понятие. Однако во многих реальных ситуациях можно с достаточной точностью считать инерциальной систему отсчёта, связанную с землёй, поскольку ускоренное движение Земли не оказывает существенного влияния на многие механические явления, происходящие вблизи её поверхности.

При необходимости более точных расчётов в качестве инерциальных рассматриваются системы отсчёта, связанные с удалёнными от Земли небесными телами — Солнцем и звёздами.

**3. Второй закон Ньютона.** Вы уже знаете, что в ходе опытов с шарами и наклонной плоскостью Галилей установил: под действием постоянной силы тело движется равноускоренно. Если Галилей обобщил этот вывод для случая свободного падения, то Ньютон, проанализировав ещё и другие опытные факты, сделал более широкое обобщение и постулировал, что

**ускорение, приобретаемое телом, прямо пропорционально действующей на него силе и обратно пропорционально массе тела.**

Этот постулат называют **вторым законом Ньютона** и математически записывают так:

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

Второй закон Ньютона иногда записывают и в таком виде:

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

**4. Третий закон Ньютона.** Свой третий закон Ньютон сформулировал так:

**действию всегда есть равное и противоположное противодействие: взаимные действия двух тел друг на друга между собой равны и направлены в противоположные стороны.**

Учитывая, что действие одного тела на другое характеризует сила, приведём современную формулировку третьего закона Ньютона.

**Два тела взаимодействуют друг с другом с силами, равными по модулю и противоположными по направлению.**

Говоря о равенстве сил по третьему закону Ньютона, необходимо уточнить, что силы:

- всегда возникают парами;
- действуют вдоль одной прямой, соединяющей взаимодействующие тела;
- имеют одинаковую природу.

Математическая запись третьего закона Ньютона такова:

$$\vec{F}_1 = -\vec{F}_2.$$

Действие закона можно наблюдать даже в самых простых ситуациях, например когда книга лежит на столе: книга давит на поверхность стола своим весом вертикально вниз, а стол действует на книгу силой упругости в противоположном направлении (рис. 32). Действие закона можно наблюдать и в более сложных ситуациях.

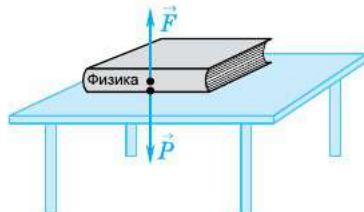


Рис. 32

## 5. Закон всемирного тяготения. Согласно закону всемирного

тяготения,

все тела во Вселенной притягиваются друг к другу с силой, прямо пропорциональной произведению их масс и обратно пропорциональной квадрату расстояния между ними.

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

Этот закон впервые сформулировал, записал математически и обосновал Ньютон. Открытие закона всемирного тяготения позволило объяснить множество эмпирических фактов, накопленных в ходе астрономических наблюдений. Однако именно Ньютон сумел понять и доказать, что многие механические явления, происходящие в космическом пространстве и на Земле, объясняются действием одних и тех же сил — сил тяготения, называемых **гравитационными силами**. Именно гравитационные силы заставляют Луну обращаться вокруг Земли, а Землю — вокруг Солнца. И эти же силы приводят к падению на поверхность Земли снаряда, выпущенного из пушки, или мяча, подброшенного вверх.

Значение коэффициента  $G$ , называемого *гравитационной постоянной*, впервые было экспериментально определено в 1798 г. английским физиком **Генри Кавендишем** (1731—1810). В дальнейшем значение  $G$  было уточнено, и сегодня гравитационную постоянную считают равной

$$G = 6,67259 \cdot 10^{-11} \text{ Н} \cdot \text{м}^2 / \text{кг}^2.$$

**6. Ускорение свободного падения.** Вам хорошо известна формула, которая позволяет вычислить силу тяжести:

$$F_{\text{тяж}} = mg.$$

Её можно получить из закона всемирного тяготения.

Рассмотрим случай взаимодействия Земли и тела массой  $m$ , находящегося на её поверхности (рис. 33). Обозначим массу и радиус Земли соответственно  $M_3$  и  $R_3$ . В рассматриваемой ситуации расстояние между телами будет равно радиусу Земли, и поэтому:

$$F_{\text{тяж}} = G \frac{M_3 m}{R_3^2}. \quad (1)$$

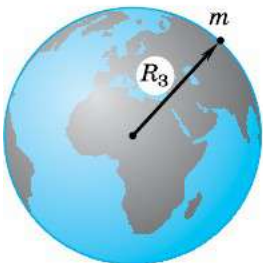


Рис. 33



Как видно, в формуле фигурирует произведение гравитационной постоянной и массы Земли, делённое на квадрат радиуса Земли,  $G \frac{M_3}{R_3^2}$ . Поскольку все величины, входящие в это выражение, постоянны, то и само это выражение также равно некоторой постоянной. Обозначим её  $g$ :

$$g = G \frac{M_3}{R_3^2}. \quad (2)$$

Таким образом, если переписать формулу (1) с учётом такого обозначения, то получим формулу для расчёта гравитационной силы, действующей со стороны Земли на любое тело массой  $m$ , находящееся на её поверхности, т. е. формулу для расчёта силы тяжести:

$$F_{\text{тяж}} = mg.$$

Вычислим значение ускорения свободного падения, подставив в формулу (2) значения массы Земли  $M_3 = 6 \cdot 10^{24}$  кг и среднего радиуса Земли  $R_3 = 6,4 \cdot 10^6$  м:

$$g = 6,67 \cdot 10^{-11} \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{кг}^2} \cdot \frac{6 \cdot 10^{24} \text{ кг}}{(6,4 \cdot 10^6 \text{ м})^2} \approx 9,8 \frac{\text{Н}}{\text{кг}} = 9,8 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}.$$

На некоторой высоте  $h$  над поверхностью Земли ускорение свободного падения имеет меньшее значение. Это и понятно: увеличивается расстояние от центра Земли до центра тела (рис. 34). Формула (2) принимает иной вид:

$$g = G \frac{M_3}{(R_3 + h)^2}.$$

Однако при решении задач, в которых высота  $h$  намного меньше радиуса Земли, значение  $g$  считают постоянным.

Поскольку Земля не шарообразна, то значение её радиуса, а следовательно, и ускорения свободного падения различается на разных широтах. Однако эти различия невелики, и при решении большинства задач их не учитывают.

Формула (2) позволяет вычислить значения ускорений свободного падения не только вблизи Земли, но и вблизи других планет. Для этого в формулу следует подставлять соответствующие значения масс этих планет и их радиусов.

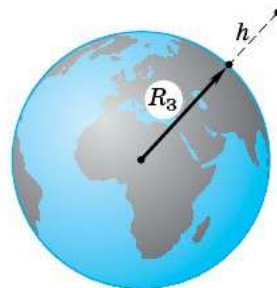


Рис. 34

## Вопросы для самопроверки

1. В чём принципиальное отличие первого закона Ньютона (закона инерции) от принципа инерции, сформулированного Галилеем?
2. Сформулируйте второй закон Ньютона; третий закон Ньютона.
3. В чём состоит закон всемирного тяготения?
4. Как, используя закон всемирного тяготения, вычислить значения ускорения свободного падения вблизи поверхности Земли; других планет?

## Упражнение 7

1. Каково удлинение металлического троса жёсткостью 125 кН/м, если при буксировке легковой автомобиль массой 1 т движется с ускорением  $0,5 \text{ м/с}^2$ ?
2. Определите значение ускорения свободного падения вблизи поверхности Луны, считая её массу равной  $M_{\text{л}} = 7,35 \cdot 10^{19} \text{ т}$ , а диаметр  $D_{\text{л}} = 3500 \text{ км}$ .
3. Во сколько раз и как изменится сила тяжести, действующая на тело, если его поднять с поверхности Земли на высоту, равную двум радиусам Земли?
4. Скатившись с горки на снежокате, мальчик проехал 12,5 м по горизонтальной снежной площадке за 5 с. Каковы сила трения скольжения и коэффициент трения скольжения лыж снежоката о снег, если масса мальчика вместе со снежокатом составляет 50 кг?

## Вопросы для дискуссии

Известно, что Гук оспаривал приоритет Ньютона в открытии закона всемирного тяготения. Изучив аргументацию обоих учёных, выскажите свою точку зрения, обосновав её.

## § 13. Принципы классической механики

**1. Принцип независимости действия сил.** Ядро классической механики, наряду с тремя законами динамики, составляет ряд принципов. Они служат для уточнения основных законов и показывают, каким образом эти законы следует применять в том или ином случае.

Одним из основных принципов классической механики является **принцип независимости действия сил** или **принцип суперпозиции** (от лат. *super* — сверх, над и *positio* — положение). Согласно этому принципу,

**если на тело одновременно действуют несколько сил, то каждая из них сообщает телу такое же ускорение, какое она сообщала бы ему в отсутствие действия других сил.**

Результат одновременного действия нескольких сил на тело можно получить, используя понятие равнодействующей силы.

**Равнодействующая сила равна векторной сумме сил, одновременно действующих на тело.**

Например, груз маятника настенных часов в крайней точке своей траектории находится под действием, по меньшей мере, двух сил — силы тяжести и силы упругости стержня (рис. 35). Равнодействующая этих сил заставляет груз начать движение в сторону положения равновесия. От равнодействующей силы будет зависеть и то, кто из участвующих в борьбе за мяч футболистов, одновременно ударяющих по мячу с противоположных сторон, выиграет единоборство: мяч будет двигаться в том направлении, в котором его будет толкать большая по модулю сила (рис. 36).

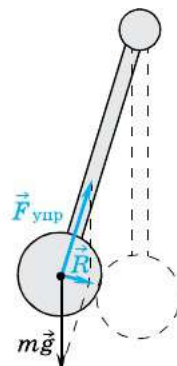


Рис. 35

В реальных ситуациях на любое тело всегда действуют несколько сил. Это необходимо иметь в виду, формулируя законы Ньютона.

Так, во втором законе Ньютона речь идёт именно о равнодействующей силе, и математически этот закон точнее записать следующим образом:

$$m\vec{a} = \vec{R},$$

где  $\vec{R} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \dots + \vec{F}_n$  — равнодействующая всех сил, действующих на тело.

С использованием математического обозначения суммы  $\Sigma$  второй закон Ньютона записывается следующим образом:

$$m\vec{a} = \sum_{i=1}^n \vec{F}_i,$$

где  $n$  — число сил, действующих на тело.

Понятие равнодействующей силы позволяет уточнить формулировку первого закона Ньютона. Дело в том, что реальных ситуаций, когда на тело не оказывалось бы воздействие, не существует. Поэтому *изолированное тело* — тело, на которое не оказывается внешнее воздействие, — это ещё одна модель классической механики. Однако тело можно считать изолированным, если равно-

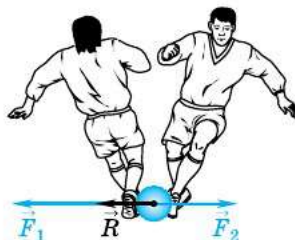


Рис. 36

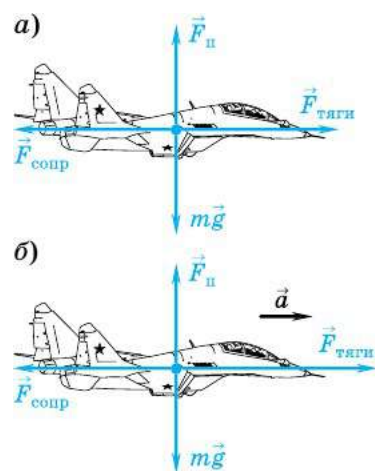


Рис. 37

действующая сил, действующих на него, равна нулю. С учётом этого первый закон Ньютона можно сформулировать таким образом:

**существуют системы отсчёта, относительно которых тело сохраняет состояние равномерного прямолинейного движения или покоя, если равнодействующая сил, действующих на это тело, равна нулю.**

Рассмотрим равномерное прямолинейное движение самолёта. На самолёт действуют четыре силы (рис. 37, а): сила тяжести, подъёмная сила, сила тяги двигателя и сила сопротивления воздуха.

Векторная сумма этих сил, т. е. равнодействующая сила, равна нулю: горизонтально и вертикально направленные силы попарно компенсируют друг друга, а значит, согласно первому закону Ньютона, тело не будет изменять скорость.

Для того чтобы самолёт увеличил скорость, пилот увеличивает силу тяги, и сила сопротивления воздуха перестаёт её компенсировать (рис. 37, б). В такой ситуации равнодействующая уже не равна нулю, и самолёт движется ускоренно.

**2. Принцип относительности.** Важным принципом классической механики является принцип относительности. Этот принцип был впервые сформулирован Галилеем, поэтому его можно отнести к основанию теории. Однако важность этого принципа позволяет включить его в ядро классической механики.

Чтобы понять суть принципа относительности, обратимся к предложенному Галилеем мысленному эксперименту. Галилей предлагал представить просторное помещение без окон под палубой корабля. Пока корабль стоит неподвижно, можно наблюдать, как происходят различные механические явления: как летают мухи, как плавают рыбки в аквариуме, как капает вода из подвешенного сосуда в стоящий под ним другой сосуд. Затем следует наблюдать те же явления, когда корабль движется равномерно и прямолинейно. Во всех наблюдаемых явлениях как в случае покоя, так и в случае равномерного прямолинейного движения, согласно Галилею, невозможно будет обнаружить никаких различий. Поэтому ни по одному из этих явлений нельзя установить, движется корабль или нет.



Таким образом,

все механические явления протекают одинаково во всех инерциальных системах отсчёта при одинаковых начальных условиях.

В этом состоит принцип относительности, часто называемый **принципом относительности Галилея**. Впоследствии принцип относительности был обобщён немецким физиком **Альбертом Эйнштейном** (1879—1955) на все явления природы.

### Вопросы для самопроверки

1. В чём состоит принцип независимости действия сил?
2. Что называют равнодействующей силой?
3. О какой силе идёт речь во втором законе Ньютона? Почему?
4. Какое тело называют изолированным? В каком случае реальное тело можно считать изолированным?
5. В чём состоит принцип относительности Галилея?

### Упражнение 8

1. Падая с высоты 5 м, тело массой 100 г разгоняется до скорости 5 м/с. Какова сила сопротивления воздуха?
2. Каково ускорение бруска, скользящего по наклонной плоскости, если её угол наклона составляет  $30^\circ$ , а коэффициент трения скольжения равен 0,15?
3. Какую силу необходимо приложить к ящику массой 30 кг, чтобы равномерно втащить его вверх по наклонной плоскости, составляющей с горизонтом угол  $30^\circ$ ? Коэффициент трения скольжения считать равным 0,5.
- 4\*<sup>1</sup>. Вычислите силу упругости, возникающую в каждом из тросов *A* и *B*, удерживающих фонарь (рис. 38), если масса фонаря 1,414 кг, а угол  $\alpha$  составляет  $45^\circ$ .

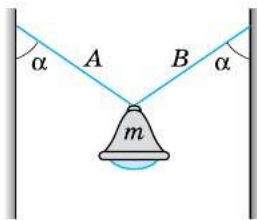


Рис. 38

## § 14. Закон сохранения импульса

**1. Изменение импульса.** Изменение импульса тела или системы тел равно сумме импульсов сил, действующих на это тело или систему тел.

$$\vec{p}_2 - \vec{p}_1 = \vec{F} \Delta t. \quad (1)$$

<sup>1</sup> Звёздочкой обозначены задания повышенной сложности.

Записав в этом выражении импульсы в виде произведений массы на соответствующие скорости, произведём математические преобразования. Получим:

$$m\vec{v}_2 - m\vec{v}_1 = \vec{F}\Delta t;$$

$$m\frac{\vec{v}_2 - \vec{v}_1}{\Delta t} = \vec{F};$$

$$m\frac{\Delta\vec{v}}{\Delta t} = \vec{F}.$$

Однако по определению  $\vec{a} = \frac{\Delta\vec{v}}{\Delta t}$ , а значит, проделав математические преобразования, можно перейти к записи второго закона Ньютона:

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

Вспомним, что приведённое определение ускорения в общем случае справедливо только при рассмотрении малого изменения скорости за малый промежуток времени. А верна ли формула (1), если промежуток времени малым считать нельзя? Поскольку любой промежуток времени можно разбить на множество малых интервалов и затем произвести суммирование изменений импульса за каждый из этих интервалов времени, то формула (1) оказывается верной независимо от значения промежутка времени.

Проиллюстрировать это можно с помощью уже известного вам опыта с гирей и двумя нитями (см. рис. 20, а). Если дёргать за нижнюю нить резко, то время действия силы будет малым и импульс силы будет недостаточно для существенного изменения импульса гири (см. рис. 20, б). Если же за нижнюю нить тянуть медленно, то время действия силы увеличивается, а значит, увеличивается и её импульс. В этом случае импульс силы может существенно изменить импульс гири (см. рис. 20, в).

Проведём опыт. На стакан положим картонную пластинку, а сверху монету (рис. 39, а). Если картонку медленно сдвигать, то монета будет сдвигаться

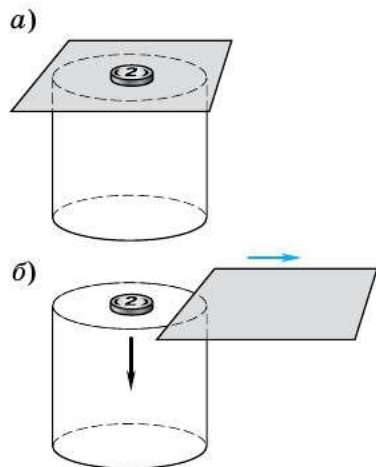


Рис. 39

вместе с ней. Но если резким ударом выбить картонку, то монета упадёт в стакан (рис. 39, б). Объяснить этот опыт также можно, применяя теорему об изменении импульса (выражение (1)). Когда картонка движется медленно, время действия силы трения на монету достаточно для изменения её импульса, и монета приходит в движение вместе с картонкой. Если же картонка резко выбивается, то время действия силы трения оказывается крайне малым, и импульса силы недостаточно для того, чтобы сдвинуть монету: она остаётся на месте. Но после того как картонка выбита, лишённая опоры монета падает в стакан.

**2. Закон сохранения импульса.** Напомним, что при взаимодействии двух тел изменение импульса первого тела равно импульсу силы, действующей на него со стороны второго тела:

$$\Delta \vec{p}_1 = \vec{F}_2 \Delta t_2,$$

откуда

$$\vec{F}_2 = \frac{\Delta \vec{p}_1}{\Delta t_2}.$$

Аналогичное выражение можно записать для силы  $\vec{F}_1$ :

$$\vec{F}_1 = \frac{\Delta \vec{p}_2}{\Delta t_1}.$$

Теперь необходимо учесть два обстоятельства. Во-первых, согласно третьему закону Ньютона,  $\vec{F}_1 = -\vec{F}_2$ , поэтому

$$\frac{\Delta \vec{p}_2}{\Delta t_1} = -\frac{\Delta \vec{p}_1}{\Delta t_2}.$$

Во-вторых, время действия тел друг на друга одно и то же, т. е.  $\Delta t_1 = \Delta t_2 = \Delta t$ , а значит,

$$\frac{\Delta \vec{p}_2}{\Delta t} = -\frac{\Delta \vec{p}_1}{\Delta t}.$$

Умножив обе части равенства на  $\Delta t$ , получим:

$$\Delta \vec{p}_2 = -\Delta \vec{p}_1.$$

Перепишем это равенство, учитывая, что изменение импульса тела равно разности его импульсов после и до взаимодействия:

$$\Delta \vec{p}_1 = \vec{p}_1 - \vec{p}_{01} = m_1 \vec{v}_1 - m_1 \vec{v}_{01},$$

$$\Delta \vec{p}_2 = \vec{p}_2 - \vec{p}_{02} = m_2 \vec{v}_2 - m_2 \vec{v}_{02}.$$

Тогда получим:

$$m_2 \vec{v}_2 - m_2 \vec{v}_{02} = -(m_1 \vec{v}_1 - m_1 \vec{v}_{01}).$$

Теперь соберём импульсы тел, которыми они обладали до взаимодействия, в левой части равенства, а приобретённые после взаимодействия — в правой:

$$m_1 \vec{v}_{01} + m_2 \vec{v}_{02} = m_1 \vec{v}_1 + m_2 \vec{v}_2. \quad (2)$$

Импульс каждого из взаимодействующих тел изменился, однако векторная сумма их импульсов осталась неизменной.

Рассмотренная система состояла из двух тел. Однако полученные выводы справедливы и в общем случае, когда система состоит из любого числа тел и является **замкнутой**: тела, составляющие такую систему, взаимодействуют между собой и не взаимодействуют с другими телами.

Равенство (2) называют **законом сохранения импульса**.

**Векторная сумма импульсов тел, составляющих замкнутую систему, остаётся постоянной при любых взаимодействиях этих тел между собой.**

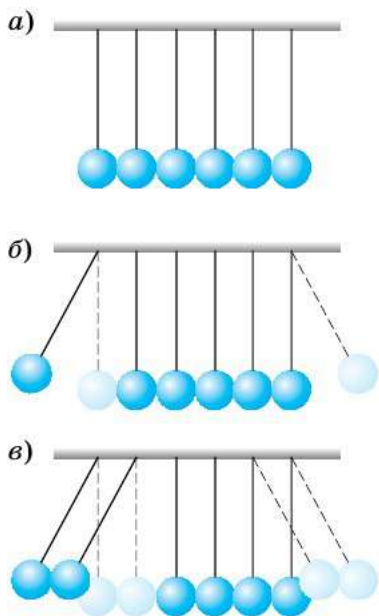


Рис. 40

Проиллюстрировать закон сохранения импульса можно с помощью установки, состоящей из нескольких одинаковых шаров, подвешенных таким образом, что их центры лежат на одной прямой (рис. 40, а). Если отвести в сторону крайний левый шар и отпустить его, то он при ударе передаст свой импульс второму шару, второй — третьему и т. д. В результате можно наблюдать, что отскочит только один шар — тот, что висит с противоположной стороны цепочки шаров, а все остальные шары останутся на месте (рис. 40, б). Таким образом, импульс, потерянный при ударе первым шаром, был передан последнему шару, суммарный же импульс системы не изменился. Аналогичным образом можно отклонить в сторону и отпустить не один,





а несколько шаров. Тогда после удара с противоположной стороны в движение придёт столько же шаров (рис. 40, в).

Закон сохранения импульса — это фундаментальный закон природы.

## Вопросы для самопроверки

1. Чему равно изменение импульса тела, на которое действует сила?
2. Приведите пример опыта, подтверждающего, что изменение импульса тела зависит от времени действия силы.
3. Сформулируйте закон сохранения импульса.
4. Какую систему тел можно считать замкнутой?

## Упражнение 9

1. До какой скорости мальчик разгонит стоящие на снегу санки, прикладывая силу  $10\text{ Н}$  в течение  $0,5\text{ с}$ ? Масса санок  $2,5\text{ кг}$ , действием силы трения пренебречь.
2. Вагон массой  $25\text{ т}$ , двигаясь со скоростью  $0,4\text{ м/с}$ , нагоняет второй такой же вагон, движущийся со скоростью  $0,2\text{ м/с}$ . Какова скорость вагонов после сцепки?
3. Пуля массой  $10\text{ г}$ , двигаясь со скоростью  $1000\text{ м/с}$ , попадает в неподвижную металлическую банку с песком и застревает в ней. С какой скоростью начнёт движение банка с пулей внутри, если её масса  $1\text{ кг}$ ?
- 4\*. При разрыве снаряда массой  $20\text{ кг}$  три осколка разлетелись в горизонтальной плоскости. Масса одного из них  $8\text{ кг}$ , а скорость  $40\text{ м/с}$ . Второй осколок массой  $6\text{ кг}$  полетел перпендикулярно первому со скоростью  $50\text{ м/с}$ . С какой по модулю скоростью полетел третий осколок?

## § 15. Закон сохранения механической энергии

**1. Механическая работа.** Вам предстоит познакомиться с одной из теорем динамики, для чего необходимо вспомнить такие величины, как **механическая работа** и **механическая энергия**.

О совершении механической работы можно говорить в том случае, когда тело перемещается под действием некоторой силы. Причём сила не обязательно должна способствовать перемещению тела: она может препятствовать его перемещению. Например, передвигая тумбу с одного места на другое, человек совершает над ней работу. Во время движения пол действует на тумбу, но трение

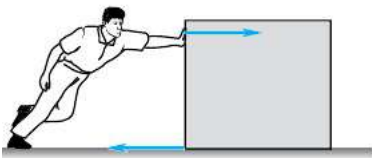


Рис. 41

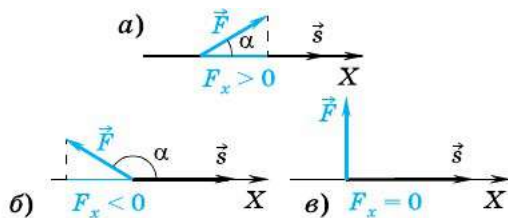


Рис. 42

о пол препятствует движению. Поскольку действие одного тела на другое характеризуется силой, то чаще всего говорят о механической работе, совершаемой какой-либо силой. Так, в рассмотренном примере над тумбой совершают работу две силы: одна из них действует со стороны человека, другая — со стороны пола (рис. 41).

**Механическая работа  $A$  равна произведению модулей векторов силы  $\vec{F}$  и перемещения  $\vec{s}$  и косинуса угла  $\alpha$  между этими векторами.**

$$A = F s \cos \alpha.$$

Если векторы силы и перемещения составляют острый угол (рис. 42, *а*), то работа положительна, поскольку значение косинуса острого угла положительно. Такую ситуацию можно наблюдать, например, при буксировке катером парашютера (рис. 43, *а*). В этом случае сила способствует движению тела. Если векторы силы и перемещения образуют тупой угол (рис. 42, *б*), то работа отрицательна: сила препятствует движению тела. Так, например, собака-вод пытается помешать излишне резвому питомцу слишком быстро бежать (рис. 43, *б*). Работа не совершается силой, перпендикулярной перемещению (рис. 42, *в*): косинус прямого угла равен нулю, а значит, равна нулю и работа. Наибольшее по модулю зна-

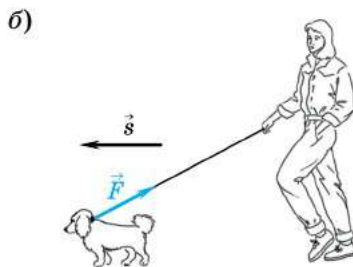
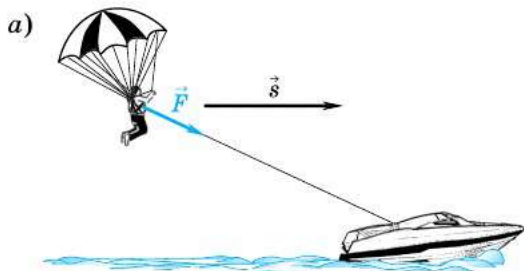


Рис. 43

чение механической работы получается в тех случаях, когда сила сонаправлена перемещению ( $\alpha = 0^\circ$ ,  $\cos 0^\circ = 1$ ) или противонаправлена ему ( $\alpha = 180^\circ$ ,  $\cos 180^\circ = -1$ ).

В СИ единица механической работы — *джоуль* (Дж).

$$1 \text{ Дж} = 1 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Работа 1 Дж совершается силой 1 Н при перемещении тела на 1 м.

**2. Условие равновесия твёрдого тела.** Из второго закона Ньютона следует, что тело находится в равновесии, если сумма сил, действующих на тело, равна нулю:

$$\vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \dots + \vec{F}_n = \mathbf{0}.$$

Рассматривая борьбу футболистов за мяч (см. рис. 36), мы принимали мяч за материальную точку. Так можно поступить в случае, если оба футболиста ударяют по мячу строго с противоположных точек его поверхности. Вероятность такого события невелика, и, наблюдая за футбольным матчем, чаще всего мы видим, что в результате единоборства мяч, закручиваясь, летит в сторону. И его уже нельзя рассматривать как материальную точку.

Объяснить, почему так происходит, достаточно просто: известно, что результат действия силы определяется не только её модулем и направлением, но и точкой приложения. Вспомним опыт с бруском (см. рис. 19). Брусок не вращался и не падал, когда линия действия силы  $\vec{F}_1$  проходила через ось  $OO'$  (рис. 44, а), и начинал вращаться вокруг этой оси, когда линия действия силы  $\vec{F}_2$  не пересекала её и находилась от неё на некотором расстоянии  $l$  (рис. 44, б).

Из курса физики основной школы вам известно, что кратчайшее расстояние  $l$  от оси вращения до линии действия силы называ-

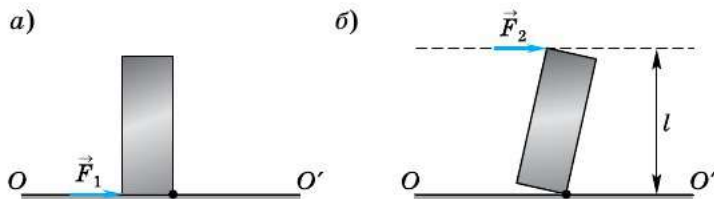


Рис. 44

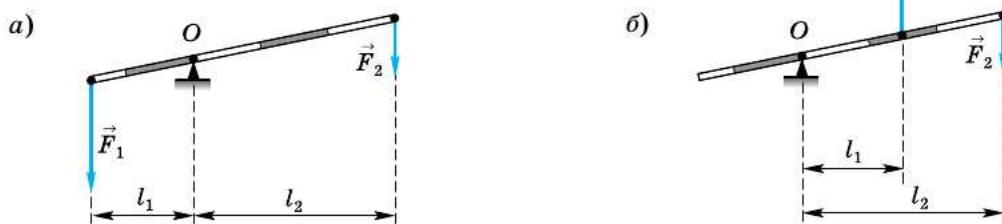


Рис. 45

ют **плечом силы**. Если сила имеет некоторое плечо, то она будет стремиться повернуть рычаг относительно оси.

Вспомним условие равновесия рычага. Пусть на рычаг действуют две силы, пытающиеся повернуть рычаг в противоположных направлениях относительно оси  $O$  (рис. 45). Вы знаете, что рычаг будет находиться в равновесии, если выполняется соотношение:

$$F_1 l_1 = F_2 l_2. \quad (1)$$

Отметим, что не только рычаг, но и любое твёрдое тело, имеющее ось вращения, будет находиться в равновесии, если выполняется условие (1).

Произведение модуля силы на её плечо называют **моментом силы  $M$** :

$$M = Fl.$$

В СИ единица момента силы — *ньютон-метр* ( $\text{Н} \cdot \text{м}$ ).

Момент силы характеризует вращательное действие силы на твёрдое тело. Поскольку момент силы зависит как от модуля силы, так и от её плеча, то вращательное действие большей по модулю силы может быть скомпенсировано меньшей силой за счёт того, что её плечо будет больше. Так, например, ребёнок, действуя на дальний от петель край двери, вполне может помешать открыть её взрослому человеку, если тот давит на середину дверного полотна (рис. 46).



Рис. 46

С учётом определения момента силы условие (1), при котором твёрдое тело не будет вращаться, можно записать так:

$$M_1 = M_2, \text{ или}$$

$$M_1 - M_2 = 0.$$

Если момент силы, стремящейся повернуть тело по ходу часовой стрелки, равен моменту силы, стремящейся повернуть тело против хода часовой стрелки, то тело вращаться не будет.

Вы рассмотрели случай, когда тело пытались привести во вращение две силы, но в общем случае их может быть несколько. Поэтому условие, при котором тело не будет вращаться, следует записывать так:

$$M_1 + M_2 + \dots + M_n = 0. \quad (2)$$

При этом необходимо учитывать, что моменты сил могут быть как положительными, так и отрицательными. Момент силы принято считать положительным, если сила стремится повернуть тело против часовой стрелки, и отрицательным, если по ходу часовой стрелке.

С использованием обозначения суммы  $\sum$  выражение (2) приобретает вид:

$$\sum_{i=1}^n M_i = 0.$$

Таким образом, условие равновесия твёрдого тела, имеющего ось вращения, может быть сформулировано так:

твёрдое тело будет находиться в состоянии равновесия, если равнодействующая сил, действующих на него, равна нулю, и сумма моментов этих сил также равна нулю.

$$\sum_{i=1}^n \vec{F}_i = 0, \quad \sum_{i=1}^n M_i = 0.$$

**3. Механическая энергия.** Рассмотрим ситуацию, когда на покоящееся тело действует некоторая сила (рис. 47). Скорость, которую приобретёт тело через время  $t$ , и перемещение, совершённое за это

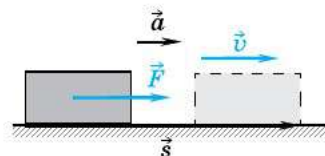


Рис. 47



время, можно рассчитать по известным вам формулам:  $v = at$  и  $s = at^2/2$ .

Выразим из формулы скорости время  $t = v/a$  и подставим это выражение в формулу перемещения. Получим

$$s = \frac{a}{2} \left( \frac{v}{a} \right)^2 = \frac{av^2}{2a^2} = \frac{v^2}{2a}. \quad (3)$$

Воспользовавшись выражением (3) и вторым законом Ньютона, вычислим работу силы по разгону тела до скорости  $v$ :

$$A = Fs = ma \frac{v^2}{2a} = \frac{mv^2}{2}. \quad (4)$$

В результате работы, совершённой силой при разгоне тела, оно приобрело некоторую скорость и теперь само может совершить работу. Так, например, движущийся товарный вагон может, столкнувшись с другим вагоном, привести его в движение.

О теле, которое способно совершить механическую работу, говорят, что оно обладает механической энергией. Таким образом, величину, стоящую в правой части выражения (4), называют **механической энергией**.

Существует два вида механической энергии — *кинетическая* и *потенциальная*. *Кинетической энергией* обладает любое движущееся тело. Кинетическая энергия тела:

$$E_{\text{к}} = \frac{mv^2}{2},$$

где  $m$  — масса тела, а  $v$  — модуль скорости.

*Потенциальной энергией* обладают любые взаимодействующие тела. Так, энергия взаимодействия тела массой  $m$  и Земли составляет:

$$E_{\text{п}} = mgh,$$

где  $h$  — высота тела над землёй.

Чаще говорят, что вследствие притяжения к Земле тело массой  $m$  на высоте  $h$  обладает потенциальной энергией  $E_{\text{п}} = mgh$ .

Под ударами падающего с высоты потока воды вращаются лопасти турбин на гидроэлектростанциях. Большая сосулька, упавшая в оттепель с крыши дома, может оставить вмятину на неудачно припаркованном автомобиле.

При расчёте потенциальной энергии тела, поднятого над землёй, необходимо выбрать уровень, от которого отсчитывается вы-

сота. Так, например, лежащая на столе книга может упасть на пол, поэтому она обладает некоторой потенциальной энергией относительно пола. Но в то же время книга не обладает потенциальной энергией относительно поверхности стола.

Упруго сжатая или растянутая пружина жёсткостью  $k$  при удлинении  $\Delta x$  обладает потенциальной энергией

$$E_{\text{п}} = \frac{k\Delta x^2}{2}.$$

Так, при выстреле из детского игрушечного пистолета сжатая пружина, разжимаясь, совершает работу над пулькой, сообщая ей кинетическую энергию. Энергия деформированной пружины используется, например, и в механических часах, где закрученная спиральная пружина, постепенно раскручиваясь, приводит в движение часовой механизм.

Из выражения (4) следует, что единицы энергии те же, что и единицы работы. В СИ энергия измеряется в *джоулях* (Дж).

**4. Теорема об изменении кинетической энергии.** Пусть на тело, движущееся со скоростью  $v_0$ , подействовала сила  $F$ . Тело вследствие этого приобрело скорость  $v$ . Вычислив работу силы  $F$ , получим:

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

Таким образом, работа силы, приложенной к телу, идёт на изменение его кинетической энергии. В этом состоит смысл одной из общих теорем динамики — **теоремы об изменении кинетической энергии**. Эта теорема верна для замкнутой системы тел. Поскольку на реальные тела и на системы тел одновременно действуют несколько сил, то теорему обычно формулируют в более общем виде, применяя принцип независимости действия сил:

**изменение кинетической энергии тела или системы тел при любом перемещении равно работе равнодействующей всех сил, действующих на тело или систему на этом перемещении:**

$$E_{\text{к}} - E_{\text{к0}} = A_{\text{р}},$$

где  $A_{\text{р}} = R \cos \alpha$ .

Рассмотрим, например, падение тела под действием силы тяжести (рис. 48). Если тело массой  $m$  снизилось на  $\Delta h = h_2 - h_1$ , то работа, совершённая при этом силой тяжести, равна:

$$A = F_{\text{тяж}} \cos \alpha = -mg\Delta h.$$

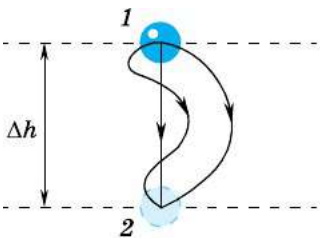


Рис. 48

На рисунке 48 показаны три возможные траектории тела, при движении по которым работа силы тяжести одна и та же: в формуле для расчёта работы силы тяжести фигурирует только изменение высоты  $\Delta h$ . Силы, работа которых не зависит от формы траектории, по которой движется тело, а определяется только начальным и конечным положениями тела, называют **потенциальными силами**. Таким образом, сила тяжести —

пример потенциальной силы. Системы тел, в которых действуют только потенциальные силы, — **консервативные системы**.

**5. Закон сохранения полной механической энергии.** Согласно теореме об изменении кинетической энергии, работа силы тяжести над падающим телом равна изменению его кинетической энергии:

$$E_{к2} - E_{к1} = -mg\Delta h. \quad (5)$$

При падении на расстоянии  $\Delta h$  потенциальная энергия тела уменьшилась и изменение потенциальной энергии составит:

$$E_{п2} - E_{п1} = mgh_2 - mgh_1 = mg\Delta h. \quad (6)$$

Правые части выражений (5) и (6) отличаются только знаком, а значит, для их левых частей можно записать:

$$E_{к2} - E_{к1} = -(E_{п2} - E_{п1}).$$

Изменение кинетической энергии тела равно изменению его потенциальной энергии. Причём потенциальная энергия уменьшилась (высота тела над землёй уменьшалась), а кинетическая энергия увеличилась (так как при падении скорость тела увеличивалась). Поэтому полная механическая энергия тела осталась постоянной.

Можно обобщить полученный вывод: он верен для любых тел, составляющих замкнутую консервативную систему.

**Полная механическая энергия замкнутой консервативной системы тел остаётся неизменной.**

$$E = E_{к} + E_{п} = \text{const.}$$

Это утверждение называют **законом сохранения полной механической энергии**. Его можно проиллюстрировать с помощью до-





вольню простого опыта. На штативе, установленном на тележке, укрепим неподвижный блок. Один конец нити, перекинутой через блок, намотаем на ось колеса тележки, а к другому концу нити подвесим груз (рис. 49). Под действием силы тяжести груз будет опускаться, его потенциальная энергия уменьшится. При этом нить заставит колесо вращаться и тележка придёт в движение, приобретая кинетическую энергию.

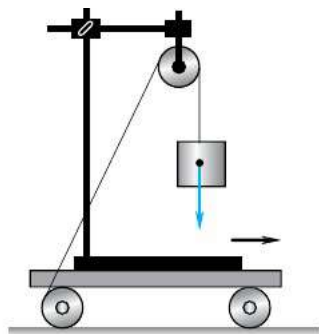


Рис. 49

Закон сохранения полной механической энергии, как и закон сохранения импульса, относится к фундаментальным законам природы.

### Вопросы для самопроверки

1. В каком случае совершается механическая работа? Приведите примеры.
2. Какие тела обладают кинетической энергией; потенциальной?
3. Сформулируйте теорему об изменении кинетической энергии.
4. Какие силы называют потенциальными?
5. Сформулируйте закон сохранения полной механической энергии.

### Упражнение 10<sup>1</sup>

1. Какую работу совершит человек, равномерно передвигая тумбу по полу на 2 м, если масса тумбы 50 кг, а коэффициент трения 0,02?
2. Какую работу приходится совершать хозяину, удерживая собаку на дорожке длиной 10 м (см. рис. 43, б)? Считать, что собака натягивает поводок с силой 30 Н, а угол, который составляет натянутый поводок с горизонталью, равен 60°.
3. Какую начальную скорость нужно сообщить мячу, бросая его вниз с некоторой высоты  $h$ , чтобы мяч после удара о пол поднялся на высоту, в 2 раза большую?
4. Какую скорость приобретёт шарик массой 2,5 г, вылетая из ствола детского пружинного пистолета, если перед выстрелом пружину жёсткостью 800 Н/м сжали на 5 см?
5. Какую работу совершает мальчик массой 50 кг, поднимаясь по канату на высоту 3 м?

<sup>1</sup> Если нет специальных оговорок, при решении задач сопротивление воздуха не учитывать.

## § 16. Закон сохранения энергии в динамике жидкости и газа

**1. Давление.** Как вам известно, результат действия силы будет зависеть не только от модуля силы  $F$ , но и от площади поверхности тела  $S$ , на которую действует сила. Так, например, тупым ножом довольно трудно резать продукты, но, заточив его и тем самым уменьшив площадь режущей поверхности, можно легко нарезать продукты, прилагая такую же (или даже несколько меньшую) силу. Во втором случае увеличилось **давление**  $p$  — отношение модуля силы к площади поверхности:

$$p = \frac{F}{S}.$$

Давление — скалярная физическая величина. Единица давления в СИ — **паскаль (Па)**.

$$1 \text{ Па} = 1 \text{ Н/м}^2.$$

**2. Закон Паскаля.** Любое тело, лежащее на столе (планшет, телефон, книга), оказывает на стол давление вследствие действия силы тяжести. Под действием силы тяжести жидкости оказывают давление на дно сосуда. Однако, в отличие от твёрдых тел, жидкости в сосуде оказывают давление не только на его дно, но и на стенки. Так проявляется действие **закона Паскаля**:

**давление, производимое на жидкость или газ, передаётся по всем направлениям без изменения.**

С проявлением закона Паскаля мы сталкиваемся, например, когда надавливаем на боковые поверхности тюбика с зубной пастой, а паста выдавливается в перпендикулярном нашему воздействию направлении (рис. 50). Или струя воздуха при накачивании шины направляется насосом в одном направлении, а давление равномерно увеличивается по всему объёму велосипедной или автомобильной шины.



Рис. 50

**3. Гидростатическое давление.** Действие закона Паскаля приводит к тому, что давление верхних слоёв жидкости передаётся нижним. Поэтому логично предположить, что с увеличением глубины будет расти давление. Подтвердим это предположение.

Рассчитаем давление, которое оказывает жидкость на дно сосуда. Если в сосуд с вертикальными стенками налита до уровня  $h$  жидкость плотностью  $\rho$  (рис. 51), то давление на дно  $p$  будет определяться весом жидкости  $P$  и площадью дна сосуда  $S$ :

$$p = \frac{P}{S}.$$

Вес жидкости рассчитывается как произведение её массы и ускорения свободного падения. В свою очередь, масса жидкости равна произведению её плотности и объёма, а объём — произведению площади дна и высоты столба жидкости:

$$P = mg = \rho Vg = \rho Shg.$$

Подставляя полученное выражение в формулу давления, получаем:

$$p = \frac{P}{S} = \frac{\rho Shg}{S} = \rho gh.$$

Таким образом, *давление жидкости на дно и стенки сосуда равно произведению её плотности, ускорения свободного падения и высоты столба жидкости.*

Поскольку это давление оказывается вследствие действия силы тяжести неподвижной — *статической* — жидкостью, находящейся в равновесии, его называют **гидростатическим**.

Как видно из формулы, гидростатическое давление не зависит от массы (объёма) жидкости. Проиллюстрируем это на примере. В три сосуда налита одна и та же жидкость плотностью  $\rho$  до одного и того же уровня  $h$ . Площади дна  $S$  у всех сосудов одинаковы, но первый сосуд расширяется кверху, второй сужается, а третий имеет цилиндрическую форму (рис. 52).

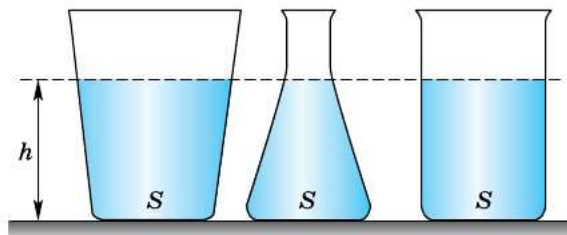


Рис. 52

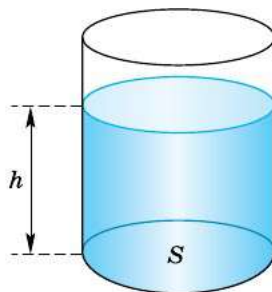


Рис. 51

Давление жидкости на дно в них одинаково и равно:

$$p = \rho gh.$$

Поскольку площадь дна  $S$  у всех сосудов также одинакова, то одинаковы и силы давления жидкости на дно в каждом из сосудов:

$$F = pS = \rho ghS.$$

В то же время, очевидно, что массы жидкостей не равны, а значит, и вес жидкостей разный. Наибольший вес у жидкости в первом сосуде, наименьший — во втором. Поскольку вес жидкости в сосуде с вертикальными стенками равен силе её давления на дно сосуда, то для третьего сосуда верно равенство:

$$P = F.$$

В первом сосуде вес жидкости больше, чем сила давления на дно:

$$P > F,$$

а во втором сосуде, наоборот, вес жидкости меньше силы её давления на дно сосуда:

$$P < F.$$

Таким образом, вопреки очевидному, на первый взгляд, предположению, что сила давления на дно сосуда всегда равна весу жидкости в нём, сила давления жидкости на дно может быть как больше, так и меньше её веса. В этом состоит так называемый **гидростатический парадокс**.

**4. Закон Бернулли.** До сих пор вы рассматривали явления, происходящие с неподвижной жидкостью (газом). Но изучение динамики жидкостей и газов позволяет понять, что при их движении проявляются общие законы, в частности закон сохранения энергии.

При движении струй жидкости и газа можно наблюдать явления, объяснить которые с помощью уже известных нам законов гидро- и аэростатики нельзя. Так, например, если взять в руки два листа бумаги и расположить их вертикально параллельно друг другу, то в неподвижном воздухе ничего наблюдать не будет. Но стоит только подуть в пространство между ними, как листы начнут сближаться (рис. 53).

Аналогичным образом наблюдается заметное притяжение друг к другу двух идущих параллельным курсом судов, находящихся

достаточно близко один от другого. Подобное явление не раз становилось причиной кораблекрушений, и капитаны сегодня хорошо знают о такой опасности и стараются избежать её. Объясняет эти и другие подобные явления закон Бернулли.

Не будем приводить строгое доказательство закона Бернулли, объясним только его сущность.

Рассмотрим движение идеальной жидкости по горизонтальному участку трубы переменного сечения. Идеальная жидкость несжимаема и течёт по трубе без трения. Мысленно выделим небольшой элемент жидкости, заключённый между сечениями  $S_1$  и  $S_2$  трубы (рис. 54). Если давление  $p_1$  слева на сечение  $S_1$  больше, чем давление  $p_2$  справа на сечение  $S_2$ , то жидкость будет смещаться вправо.

За очень короткий промежуток времени  $\Delta t$  элемент жидкости сместится вправо и займёт положение между сечениями  $S'_1$  и  $S'_2$ , при этом над ним будет совершена работа силами давления. Запишем теорему об изменении кинетической энергии для этого случая:

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

Как в первоначальном, так и в новом положении элемента жидкости основная его часть занимает один и тот же объём, обозначенный на рисунке  $V_{\text{общ}}$ . По этой причине можно считать, что изменение кинетической энергии обусловлено изменением кинетической энергии крайне малого объёма жидкости  $V$ , который в начальном положении элемента жидкости находится левее  $V_{\text{общ}}$ , а в конечном

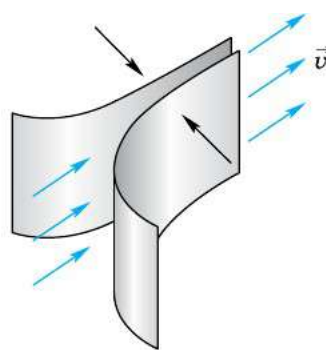


Рис. 53

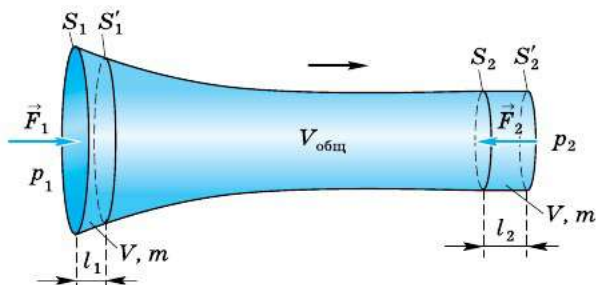


Рис. 54

положении — правее. Жидкость крайне малого объёма имеет массу  $m$ , и поэтому разность значений кинетической энергии  $E_2$  и  $E_1$  можно записать так:

$$E_2 - E_1 = \frac{mv_2^2}{2} - \frac{mv_1^2}{2}, \quad (2)$$

где  $v_1$  и  $v_2$  — скорости жидкости малого объёма  $V$  соответственно в начальном и конечном положениях.

Вычислим теперь работу, совершаемую силами давления над рассматриваемым элементом жидкости. Работа совершается силой давления  $F_1$  вдоль движения, и она положительна, а работа силы давления  $F_2$  препятствует движению, и она отрицательна. Тогда

$$A = F_1 l_1 - F_2 l_2, \quad (3)$$

где  $l_1$  и  $l_2$  — расстояния, на которые перемещаются соответственно левая и правая границы рассматриваемого элемента жидкости за время  $\Delta t$ .

Сила давления определяется через произведение давления и площади, на которую она действует:

$$F_1 = p_1 S_1 \text{ и } F_2 = p_2 S_2.$$

С учётом этого выражение (3) приобретает вид:

$$A = p_1 S_1 l_1 - p_2 S_2 l_2. \quad (4)$$

Принимая во внимание несжимаемость жидкости ( $S_1 l_1 = S_2 l_2 = V$ ), выражение (4) запишем так:

$$A = (p_1 - p_2)V. \quad (5)$$

Полученные выражения для изменения кинетической энергии (2) и для совершённой работы (5) подставим в выражение (1):

$$\frac{mv_2^2}{2} - \frac{mv_1^2}{2} = (p_1 - p_2)V. \quad (6)$$

Разделив обе части выражения (6) на объём  $V$  и сгруппировав соответствующие члены, получим:

$$\frac{mv_1^2}{2V} + p_1 = \frac{mv_2^2}{2V} + p_2. \quad (7)$$

С учётом того, что отношение массы и объёма равно плотности, можно записать:

$$\frac{\rho v_1^2}{2} + p_1 = \frac{\rho v_2^2}{2} + p_2. \quad (8)$$

Уравнение (8) называют **законом Бернулли**. Чаще его записывают в виде:

$$\frac{\rho v^2}{2} + p = \text{const.} \quad (9)$$

Выражение  $\frac{\rho v^2}{2}$  называют **гидродинамическим давлением**. Как видно, оно определяется плотностью жидкости и её скоростью. С ростом скорости растёт и гидродинамическое давление, значит, должен уменьшаться второй член уравнения — **статическое давление**  $p$ , чтобы их сумма оставалась постоянной.

Закон Бернулли был получен для жидкости, текущей по горизонтальному участку трубы. Но теперь можно уточнить его для общего случая, когда труба расположена под углом к горизонту (рис. 55). Запишем закон сохранения полной механической энергии:

$$\frac{mv_1^2}{2} + mgh_1 = \frac{mv_2^2}{2} + mgh_2. \quad (10)$$

Далее, проведя рассуждения, аналогичные тем, что были проведены при преобразовании выражений (3)—(9), получаем равенство:

$$\frac{\rho v^2}{2} + \rho gh + p = \text{const.} \quad (11)$$

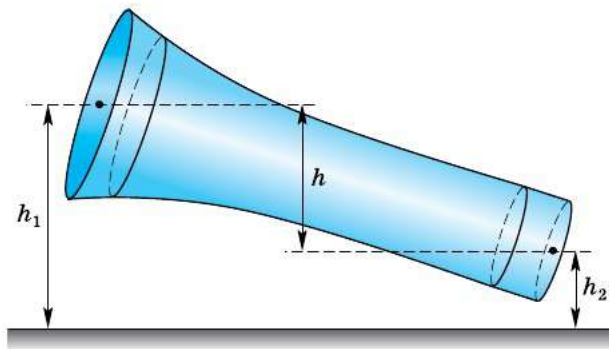


Рис. 55

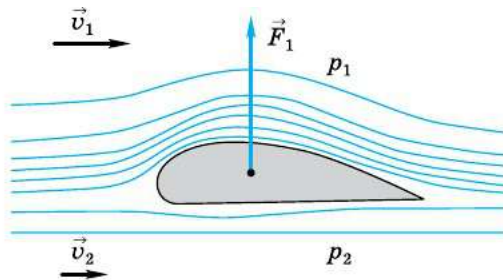


Рис. 56

Это выражение не что иное, как более полная форма записи закона Бернулли, в которой присутствует гидростатическое давление  $\rho gh$ , выражающее зависимость давления от высоты столба жидкости.

Теперь можно объяснить опыт с двумя листами бумаги (см. рис. 53). Если дуть между листами бумаги, скорость потока воздуха между ними становится больше, чем снаружи, и значит, согласно закону Бернулли, давление между листами меньше, чем извне. Из-за разности давлений листы бумаги сближаются. По той же причине притягиваются друг к другу идущие рядом параллельными курсами суда.

Среди многочисленных явлений, объясняемых законом Бернулли, возникновение подъёмной силы крыла самолёта. Разделённые крылом частицы воздуха до момента встречи за крылом проходят разный путь (рис. 56): форма крыла такова, что путь частиц над крылом больше, чем под крылом. А это означает, что над крылом скорость воздуха больше, чем под крылом, и поэтому, согласно закону Бернулли, давление над крылом меньше. Из-за разности давлений  $p_1$  и  $p_2$  и возникает подъёмная сила.

Закон Бернулли, объясняющий широкий круг явлений, происходящих в движущихся жидкостях и газах, является проявлением закона сохранения полной механической энергии для движущихся жидкостей или газов.

## Вопросы для самопроверки

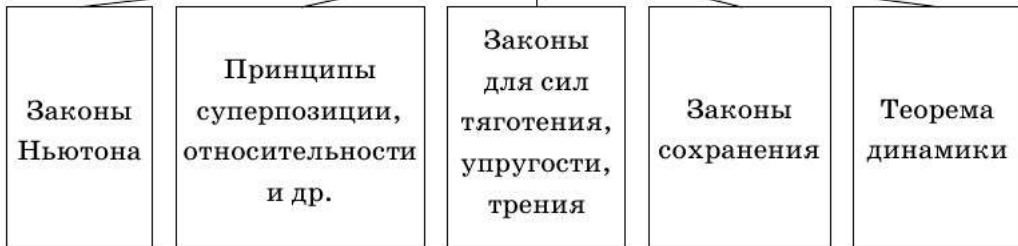
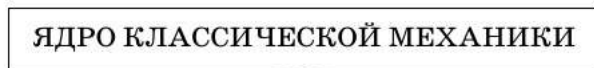
1. Какую физическую величину называют давлением? Как рассчитывается давление; в каких единицах оно измеряется?
2. Как формулируется закон Паскаля? Какие примеры из повседневной жизни он иллюстрирует?
3. В чём состоит гидростатический парадокс?
4. Сумма каких трёх физических величин остаётся постоянной для потока идеальной жидкости, согласно закону Бернулли?





**Основное в главе**

**1. Состав ядра классической механики.**



**2. Законы Ньютона (табл. 5).**

**Таблица 5**

<i>Закон</i>	<i>Формулировка</i>	<i>Математическая запись</i>
Первый закон Ньютона	Существуют системы отсчёта, относительно которых тело сохраняет состояние равномерного прямолинейного движения или покоя, если равнодействующая сил, действующих на это тело, равна нулю	
Второй закон Ньютона	Ускорение, приобретаемое телом, прямо пропорционально действующей на него силе и обратно пропорционально массе тела	$\vec{a} = \frac{\vec{F}}{m}$
Третий закон Ньютона	Два тела взаимодействуют друг с другом с силами, равными по модулю и противоположными по направлению	$\vec{F}_1 = -\vec{F}_2$

### 3. Принципы классической механики (табл. 6).

Таблица 6

<i>Принцип</i>	<i>Формулировка</i>
Независимости действия сил (суперпозиции)	Если на тело одновременно действуют несколько сил, то каждая из них сообщает телу такое же ускорение, какое она сообщала бы ему в отсутствие действия других сил
Относительности	Все механические явления протекают одинаково во всех инерциальных системах отсчёта при одинаковых начальных условиях

### 4. Силы (табл. 7).

Таблица 7

<i>Сила</i>	<i>При каких условиях возникает</i>	<i>Формула</i>
Тяготения, тяжести	Все тела во Вселенной притягиваются друг к другу с силой, прямо пропорциональной произведению их масс и обратно пропорциональной квадрату расстояния между ними	$F = G \frac{m_1 m_2}{R^2};$ $F_{\text{тяж}} = mg$
Упругости	При деформации тела под действием внешней силы внутри него возникает сила, препятствующая деформации	$F_{\text{упр}} = -k\Delta x$
Трения	При относительном перемещении двух тел с соприкасающимися поверхностями (при попытке такого перемещения) возникает сила, препятствующая этому перемещению	$F_{\text{тр}} = \mu N$

## 5. Теорема динамики (табл. 8).

Таблица 8

<i>Теорема</i>	<i>Формулировка</i>	<i>Математическая запись</i>
Об изменении кинетической энергии	Изменение кинетической энергии тела или системы тел равно работе равнодействующей всех сил, действующих на тело или систему на этом перемещении	$E_k - E_{k0} = A_p$ , где $A_p = R \cos \alpha$

## 6. Законы сохранения (табл. 9).

Таблица 9

<i>Закон</i>	<i>Формулировка</i>	<i>Математическая запись</i>
Сохранения импульса	Векторная сумма импульсов тел, составляющих замкнутую систему, остаётся постоянной при любых взаимодействиях этих тел между собой	$m_1 \vec{v}_{01} + m_2 \vec{v}_{02} =$ $= m_1 \vec{v}_1 + m_2 \vec{v}_2$
Сохранения полной механической энергии	Полная механическая энергия замкнутой консервативной системы тел остаётся неизменной	$E = E_k + E_{\text{п}} = \text{const}$
Бернулли	Сумма гидродинамического, гидростатического и статического давлений в непрерывном потоке идеальной жидкости остаётся постоянной вдоль этого потока	$\frac{\rho v^2}{2} + \rho gh + p =$ $= \text{const}$



## Следствия классической механики

*Объяснительная и предсказательная функции теории Ньютона проявились уже в XVII в., когда значение ускорения Луны, рассчитанное с помощью законов динамики Ньютона, совпало с его значением, рассчитанным по результатам измерений, проведённых в ходе астрономических наблюдений. Затем астрономы Адамс и Леверье, используя закон всемирного тяготения, вычислили положение неизвестной ещё на тот момент планеты Солнечной системы, которая оказывала гравитационное воздействие на орбиту Урана. Эту планету назвали Нептуном. А в 1798 г. английский учёный Кавендиш в лаборатории экспериментально подтвердил закон всемирного тяготения.*

### § 17. Небесная механика

**1. Движение спутников.** Классическая механика позволила рассчитать движение небесных тел. Это привело к бурному развитию в XVIII в. **небесной механики** — раздела астрономии, который изучает движение небесных тел на основе применения закона всемирного тяготения. Рассмотрим в качестве примера применение этого закона к расчёту движения спутника вокруг планеты.

Спутник под действием силы тяготения будет всё время падать на планету и в то же время двигаться вперёд по своей траектории. При этом, поскольку планета имеет форму шара, её



поверхность будет всё время несколько удаляться от спутника (рис. 57). При определённом значении скорости спутник может вращаться вокруг планеты по круговой орбите<sup>1</sup>. Эту скорость называют **круговой скоростью**.

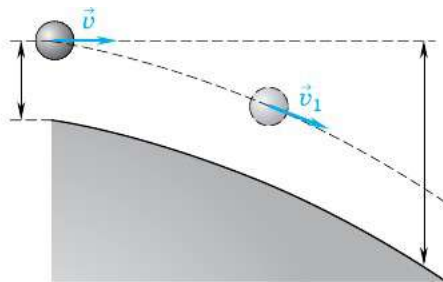


Рис. 57

Получим формулу для расчёта круговой скорости  $v_{кр}$ . В данном случае планету и её спутник можно рассматривать как изолированную систему. Поэтому на спутник действует только сила тяготения со стороны планеты, равная:

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

где  $M$  — масса планеты,  $m$  — масса спутника, а  $R$  — расстояние от центра планеты до спутника.

Из второго закона Ньютона выразим ускорение спутника и подставим в полученное выражение значение силы:

$$a = \frac{F}{m} = G \frac{M}{R^2}. \quad (1)$$

Поскольку спутник движется по окружности, то это ускорение центростремительное, а значит, оно равно отношению квадрата линейной скорости к радиусу (расстоянию от центра планеты до спутника):

$$a_{ц.с} = \frac{v_{кр}^2}{R}. \quad (2)$$

Приравняем правые части выражений (1) и (2) и выразим скорость, с которой должен двигаться спутник, чтобы орбита была круговой, т. е. круговую скорость:

$$G \frac{M}{R^2} = \frac{v_{кр}^2}{R},$$

откуда

$$v_{кр} = \sqrt{G \frac{M}{R}}. \quad (3)$$

<sup>1</sup> Для упрощения расчётов будем рассматривать движение спутника по круговой орбите.

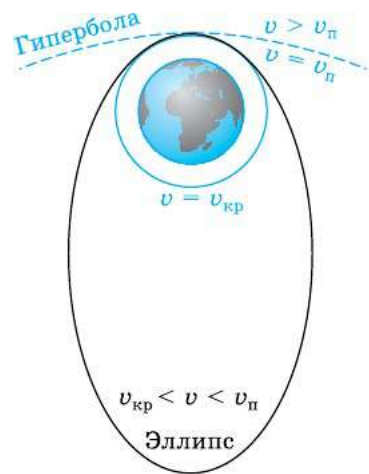


Рис. 58

Получая формулу (3), мы не учитывали, что спутник движется на некоторой высоте  $h$  над поверхностью планеты. Если же учесть этот факт, то формула для расчёта круговой скорости будет иметь вид:

$$v_{\text{кр}} = \sqrt{G \frac{M}{R + h}}.$$

**2. Параболическая и гиперболическая скорости.** В случае, когда скорость спутника больше круговой  $v > v_{\text{кр}}$ , спутник будет двигаться по эллипсу, в одном из фокусов которого находится центр планеты (рис. 58). Чем больше скорость спутника, тем большим будет расстояние от него до планеты.

Однако если скорость спутника достигнет определённого значения, называемого **параболической скоростью**  $v_{\text{п}}$ , то спутник прекратит движение по замкнутой траектории: сила тяготения планеты уже не сможет «удерживать» спутник, и он покинет планету, двигаясь по параболе.

Если же скорость спутника превысит значение параболической скорости, то он будет удаляться от планеты по гиперболической орбите. Такую скорость называют **гиперболической скоростью**  $v_{\text{г}}$ . Параболическая и гиперболическая скорости так же, как и круговая, определяются массой планеты и расстоянием от её центра до спутника.

**3. Законы Кеплера.** Рассмотренные примеры движения спутника иллюстрируют, как классическая механика даёт объяснение первого закона Кеплера.

Планеты Солнечной системы, являясь своеобразными спутниками Солнца, движутся вокруг него по эллиптическим орбитам. Поскольку форма орбиты определяется скоростью движения планеты, то очевидно, что скорость каждой планеты меньше, чем значение параболической скорости, соответствующей массе Солнца и расстоянию от него до данной планеты. В противном случае планеты не удерживались бы Солнцем на орбитах. В то же время ско-

рость каждой планеты больше, чем значение соответствующей круговой скорости.

Теория Ньютона позволяет не только дать объяснение первого закона Кеплера, но и обобщить его.

*Любое тело под действием силы тяготения движется по одной из трёх кривых — эллипсу, параболе или гиперболе. При движении тела по эллипсу в одном из его фокусов находится другое тело, со стороны которого и действует сила тяготения.*

Первый закон Кеплера, сформулированный таким образом, позволяет описывать движение не только планет, но и других тел, движущихся под действием сил тяготения.

На основе теории Ньютона можно показать, что чем дальше планета от Солнца на своей орбите, тем меньше её линейная скорость (рис. 59). А это значит, что планета, находясь ближе к Солнцу, за некоторый промежуток времени проходит больший путь, чем путь, пройденный за такой же промежуток времени, когда планета находится дальше от Солнца. Это определяет равенство площадей, описываемых радиусом-вектором, соединяющим центр Солнца с планетой за равные промежутки времени, о чём и гласит второй закон Кеплера.

Третий закон Кеплера можно вывести, считая, что планеты движутся по круговым орбитам (это приближение не очень грубое, поскольку орбиты планет Солнечной системы мало отличаются от окружностей).

Запишем линейную скорость планеты как отношение длины окружности её орбиты к периоду обращения:

$$v = \frac{l}{T} = \frac{2\pi R}{T}.$$

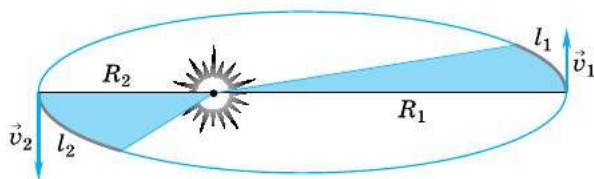


Рис. 59

Поскольку планета движется по окружности, то полученное отношение равно значению круговой скорости:

$$\frac{2\pi R}{T} = \sqrt{G \frac{M}{R}},$$

где  $M$  — масса Солнца.

Из этого равенства получаем:

$$\frac{4\pi^2 R^2}{T^2} = G \frac{M}{R},$$

или

$$\frac{T^2}{R^3} = \frac{4\pi^2}{GM}.$$

Значение дроби  $\frac{4\pi^2}{GM}$  есть величина постоянная, следовательно, отношение периода обращения в квадрате к расстоянию от Солнца в кубе одинаково для любой планеты, т. е.

$$\frac{T_1^2}{R_1^3} = \frac{T_2^2}{R_2^3},$$

или

$$\frac{T_1^2}{T_2^2} = \frac{R_1^3}{R_2^3}.$$

**4. Открытие Нептуна.** До середины XIX в. наиболее удалённой от Солнца планетой считался Уран. Однако астрономические наблюдения показывали, что Уран движется с некоторыми отклонениями от той орбиты, которую рассчитывали для него на основе законов классической механики. Английский астроном *Джон Кауч Адамс* (1819—1892) и французский астроном *Урбен Жан Жозеф Леверье* (1811—1877) независимо друг от друга предположили, что за Ураном находится ещё одна планета, тяготение которой и оказывает влияние на движение Урана. Так в 1846 г. на основе закона всемирного тяготения были рассчитаны координаты предполагаемой планеты, и когда немецкий астроном *Йоганн Галле* (1812—1910) навёл в указанную точку телескоп, там действительно была обнаружена новая планета. Её назвали Нептуном.

Про открытие Нептуна принято говорить, что эта планета была открыта «на кончике пера». Действительно, в отличие от других планет, обнаруженных в ходе астрономических наблюдений,



открытие Нептуна было сделано путём математических расчётов, выполненных на основе применения законов классической механики.

## Вопросы для самопроверки

1. Какую скорость в небесной механике называют круговой; параболической; гиперболической?
2. Как законы Кеплера объясняются законами классической механики?
3. Почему принято говорить, что планета Нептун была открыта «на кончике пера»?

## Упражнение 11

1. С какой скоростью должен двигаться искусственный спутник Земли на высоте 600 км по круговой орбите? Каким будет его период обращения? Средний радиус Земли считать равным 6370 км, а массу —  $6 \cdot 10^{24}$  кг.
2. Рассчитайте скорость движения Марса по орбите вокруг Солнца, считая эту орбиту круговой. Расстояние от Марса до Солнца 228 млн км, масса Солнца  $2 \cdot 10^{27}$  т.
3. Во сколько раз отличаются круговые скорости Сатурна и Земли, если расстояние от Сатурна до Солнца приблизительно в 9,53 раза больше, чем расстояние от Земли до Солнца, а масса Земли примерно в 95,3 раза меньше массы Сатурна?

## § 18. Баллистика

**1. Внутренняя и внешняя баллистика.** В истории есть множество примеров, когда решение проблем повышения обороноспособности государства давало новый импульс развитию науки. Одним из таких примеров может служить появление **баллистики** (от греч. ballo — бросаю) — науки о движении снарядов. Баллистика зарождалась в те времена, когда каменные ядра выбрасывались на вражеские войска с помощью простых механических катапульти (рис. 60). С появлением пушек баллистика разделилась на два раздела. **Внутренняя баллистика** изучает движение снаряда (или пули) внутри ствола, а **внешняя баллистика** рассматривает движение неуправляемых снарядов после их вылета из ствола.

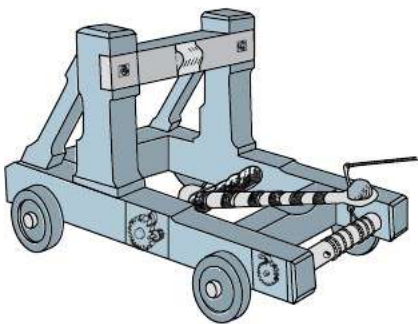


Рис. 60

С появлением ракет границы баллистики ещё более расширились. Именно баллистические расчёты траекторий позволяют выводить космические аппараты на орбиту вокруг Земли, отправлять их к Луне и к планетам Солнечной системы.

При расчётах траекторий простых артиллерийских снарядов и пуль, а также сложнейших в техническом плане космических аппаратов современная баллистика применяет законы классической механики.

**2. Движение тела под действием силы тяжести.** Рассмотрим самую простую баллистическую задачу: движение тела, которому сообщили начальную скорость, направленную под углом  $\alpha$  к горизонту. Это может быть, например, движение ядра, выпущенного из пушки.

Для упрощения задачи не будем учитывать сопротивление воздуха. В таком случае тело будет двигаться под действием только силы тяжести. Поскольку дальность полёта тела невелика по сравнению с размерами земного шара (снаряд достигает цель в пределах видимости), можно считать Землю плоской.

Из второго закона Ньютона следует, что ускорение тела будет равно ускорению свободного падения:

$$m\vec{a} = m\vec{g},$$

откуда

$$\vec{a} = \vec{g}.$$

Проекция ускорения на ось  $OX$  (рис. 61) будет равна нулю, так как тело в горизонтальном направлении движется равномерно. При этом координата  $x$  будет меняться по закону:

$$x = v_{0x}t,$$

или

$$x = v_0 \cos \alpha \cdot t. \quad (1)$$

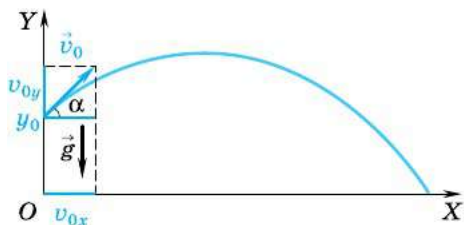


Рис. 61



В то же время движение по вертикали будет равноускоренным, и уравнение для координаты  $y$  имеет вид:

$$y = y_0 + v_{0y}t - \frac{gt^2}{2},$$

или

$$y = y_0 + v_0 \sin \alpha \cdot t - \frac{gt^2}{2}. \quad (2)$$

Используя систему кинематических уравнений (1) и (2), можно рассчитать различные параметры полёта, например время полёта, максимальную высоту и дальность. Так, время полёта можно вычислить из уравнения (2), учитывая, что в момент падения  $y = 0$ , и решив получившееся квадратное уравнение. Поскольку это уравнение имеет два корня, то, вычислив их, выбирают только тот, который не противоречит смыслу физической величины «время»: корень не может быть отрицательным. Подставив полученный результат в уравнение (1), можно вычислить конечную координату тела  $x$ , а значит, и дальность полёта.

Для того чтобы установить, по какой траектории движется тело, выразим время  $t$  из уравнения (1):

$$t = \frac{x}{v_0 \cos \alpha}$$

и подставим его в уравнение (2). Получим:

$$y = y_0 + \frac{v_0 \sin \alpha}{v_0 \cos \alpha} x - \frac{g}{2v_0^2 \cos^2 \alpha} x^2,$$

или

$$y = -\frac{g}{2v_0^2 \cos^2 \alpha} x^2 + \operatorname{tg} \alpha \cdot x + y_0.$$

Полученная зависимость  $y = f(x)$  имеет вид:

$$y = ax^2 + bx + c,$$

где  $a$ ,  $b$  и  $c$  — постоянные коэффициенты, в нашем случае равные:

$$a = -\frac{g}{2v_0^2 \cos^2 \alpha}, \quad b = \operatorname{tg} \alpha, \quad c = y_0.$$

Из курса алгебры вам известно, что графиком такой зависимости является парабола. Следовательно, траекторией тела, движущегося под действием только силы тяжести, является парабола.

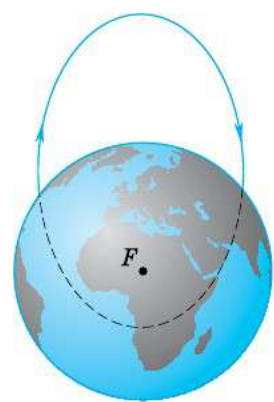


Рис. 62

При реальных баллистических расчётах учитывают сопротивление воздуха движущемуся телу, поскольку при значительных скоростях это сопротивление оказывается весьма существенным. Даже для артиллерийского снаряда, имеющего специальную обтекаемую форму, реальная дальность полёта может получиться в 2—3 раза меньшей, чем рассчитанная без учёта сопротивления воздуха.

Решая баллистические задачи для межконтинентальных ракет, уже нельзя не учитывать шарообразность Земли. Траекторией движения такой ракеты, согласно первому закону Кеплера, является эллипс, один из фокусов  $F$  которого находится в центре земного шара (рис. 62).

**3. Космические скорости.** Движение космических аппаратов происходит по тем же законам, что и движение естественных небесных тел. Вспомним условие, при котором тело может стать спутником Земли: скорость такого тела должна быть не меньшей чем круговая. Рассчитаем круговую скорость спутника Земли, считая расстояние между Землёй и спутником равным среднему радиусу Земли  $R_3$ :

$$v_I = \sqrt{G \frac{M_3}{R_3}},$$

где  $M_3$  — масса Земли.

Такую скорость называют **первой космической скоростью**. Первая космическая скорость для Земли приблизительно равна:

$$v_I = \sqrt{\frac{6,67 \cdot 10^{-11} \text{ Н} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{кг}^{-2} \cdot 5,98 \cdot 10^{24} \text{ кг}}{6,37 \cdot 10^6 \text{ м}}} \approx 7,9 \cdot 10^3 \text{ м/с} = 7,9 \text{ км/с}.$$

Параболическую скорость называют **второй космической скоростью**  $v_{II}$ . Значение второй космической скорости для Земли  $v_{II} \approx 11,2 \text{ км/с}$ .

Если скорость космического аппарата  $v$  лежит в пределах  $v_I < v < v_{II}$ , то такой аппарат будет двигаться по эллиптической орбите, в одном из фокусов которой лежит центр земного шара. Большая часть искусственных спутников движется именно по таким орбитам. Для полётов к другим планетам космические аппараты



должны двигаться со скоростями  $v \geq v_{II}$ . На такой скорости тело способно вырваться в космическое пространство, преодолев притяжение Земли.

## Вопросы для самопроверки

1. Что изучают внутренняя и внешняя баллистика?
2. Какой будет траектория тела, движущегося под действием только силы тяжести, если шарообразностью Земли пренебречь?
3. Какую скорость называют первой космической? Чему примерно равно её значение для Земли?
4. Каковы должны быть скорости искусственных спутников Земли, чтобы они двигались по орбите вокруг нашей планеты?

## Упражнение 12<sup>1</sup>

1. На какую высоту над стадионом поднимется сигнальная ракета, выпущенная болельщиком после забитого гола, если ракетница была направлена под углом  $60^\circ$  к горизонту, а скорость вылета ракеты  $40 \text{ м/с}$ ?
2. Мальчик на соревнованиях метнул теннисный мячик под углом  $45^\circ$  к горизонту. Наибольшая высота, которой достиг мячик,  $10 \text{ м}$ . На какое расстояние удалось метнуть мячик спортсмену?
3. Дальность полёта бомбы, сброшенной с горизонтально летевшего со скоростью  $150 \text{ м/с}$  самолёта, оказалась равной высоте полёта. Определите, с какой высоты сбросили бомбу.
4. Первый самолёт летит горизонтально со скоростью  $800 \text{ км/ч}$  на высоте вдвое большей, чем второй. С какой скоростью должен лететь второй самолёт, чтобы дальность полёта бомб, сброшенных с каждого самолёта, оказалась одинаковой?
5. Вычислите первую космическую скорость для Венеры, имеющей массу  $4,9 \cdot 10^{24} \text{ кг}$  и радиус  $6200 \text{ км}$ .

## § 19. Освоение космоса

**1. Реактивное движение.** Автомобиль может поворачивать, разгоняться и тормозить, поскольку его колёса взаимодействуют с дорожным полотном. Крылья и рули самолёта могут отталкиваться от воздуха. Однако в космическом безвоздушном пространстве нет возможности изменять скорость, взаимодействуя с какой-либо средой. По этой причине для космических полётов используют ракеты, которые совершают **реактивное движение**.

<sup>1</sup> Если нет специальных оговорок, при решении задач сопротивление воздуха не учитывать.

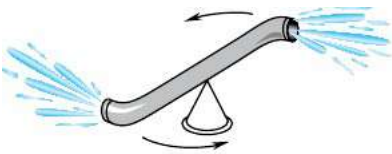


Рис. 63

С реактивным движением вы достаточно часто сталкиваетесь в жизни. Так, например, действие обыкновенной «вертушки» для полива газонов основано на реактивном движении. Струи воды, вырываясь под давлением из трубок с загнутыми концами, заставляют

эти трубки в противоположную сторону (рис. 63). Другой пример реактивного движения: наполненный воздухом и не завязанный надувной резиновый шарик, если его отпустить, будет совершать быстрые беспорядочные движения. Двигать его будет воздух, который под давлением резиновой оболочки вылетает из отверстия. Таким образом, реактивное движение возникает за счёт того, что от системы тел отделяется с некоторой скоростью часть этой системы.

**2. Ракеты.** Рассмотрим упрощённую модель ракеты (рис. 64). Она состоит из двух частей — оболочки и находящегося в ней топлива. При сгорании топлива внутри оболочки образуется газ. Этот газ имеет огромные температуру и давление, поэтому он с большой скоростью вырывается из специального отверстия в оболочке — сопла ракеты, отталкивая оболочку в противоположном направлении.

Перед полётом ракета покоится относительно Земли, и поэтому её импульс равен нулю. После вылета из оболочки газ приобретает импульс  $m_{\text{г}}v_{\text{г}}$ , а оболочка —  $m_{\text{об}}v_{\text{об}}$ . Если не учитывать действие внешних сил, то оболочку и топливо можно считать замкнутой системой и применить закон сохранения импульса:

$$0 = m_{\text{г}}v_{\text{г}} + m_{\text{об}}v_{\text{об}},$$

откуда скорость оболочки

$$v_{\text{об}} = - \frac{m_{\text{г}}}{m_{\text{об}}} v_{\text{г}}.$$

Из этого выражения видно, что скорость оболочки определяется скоростью газа и отношением массы газа к массе оболочки. Масса газа равна массе сгорающего топлива.

Для осуществления космических полётов необходимо, чтобы оболочка ракеты достигала огромных скоростей — не меньших чем первая космическая скорость. Поэтому масса топлива должна превышать массу оболочки в несколько раз, а достичь этого очень трудно. Именно в оболочку помещаются

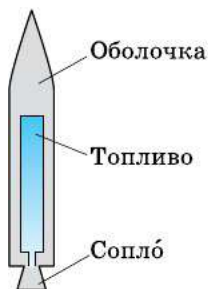


Рис. 64



орбитальные космические аппараты, в которых могут находиться космонавты и специальная аппаратура. Кроме того, топливо не сгорает мгновенно, и вследствие этого, во-первых, масса оболочки увеличивается за счёт запасов топлива, во-вторых, импульс вылетающего из сопла́ газа меньше рассчитанного. Приходится учитывать и тот факт, что топливо не может гореть в безвоздушном пространстве и необходимо помещать в оболочку запасы окислителя — кислородо- или фторосодержащего вещества. Не забудем ещё, что на стартующую ракету действует сила тяжести. Таким образом, для достижения ракетой первой космической скорости необходимо, чтобы масса топлива превосходила массу оболочки в десятки раз! Например, ракета-носитель «Восток» при полной массе 267 т могла поднять не более 1,35 т полезного груза. Ракета-носитель серии «Союз» при стартовой массе около 310 т могла нести полезный груз массой до 7 т. Современные мощные ракеты-носители позволяют поднимать на орбиту груз массой до 100 т, имея при этом стартовую массу около 2400 т.

**3. Из истории космонавтики.** Идея использования ракет для космических полётов принадлежит нашему соотечественнику К. Э. Циолковскому. Впервые Циолковский обнародовал эту идею ещё в 1883 г. Затем в ряде научных трудов, написанных с 1896 по 1903 г., Циолковский изложил свою теорию реактивного движения и обосновал реальную возможность применения «реактивных приборов» для межпланетных полётов.

Реализовать идеи Циолковского о полётах в космос впервые удалось коллективу учёных и инженеров под руководством С. П. Королёва. 4 октября 1957 г. на околоземную орбиту был



**Константин Эдуардович Циолковский** (1857—1935) — российский учёный и изобретатель в области аэродинамики, воздухоплавания и авиации, основоположник современной космонавтики и теории межпланетных сообщений. В результате своих исследований сделал вывод о возможности использования реактивного движения для перемещения в космическом пространстве; разработал схемы различных ракет, в том числе предназначенных для межпланетных путешествий; предложил проект ракеты с жидкостным двигателем и обосновал теорию её полёта; разработал теорию многоступенчатых ракет.



Рис. 65

выведен первый искусственный спутник Земли. Каждый год 12 апреля в нашей стране отмечают День космонавтики: в этот день в 1961 г. был осуществлён первый полёт человека в космос. Первым космонавтом Земли стал **Юрий Алексеевич Гагарин** (1934—1968), который на космическом корабле «Восток-1» (рис. 65) совершил один виток вокруг Земли за 1 ч 48 мин. В марте 1965 г. **Алексей Архипович Леонов** (р. 1934) впервые вышел в открытый космос и провёл 12 мин на расстоянии 5 м от космического корабля, а в июле 1969 г. американский астронавт **Нил Армстронг** (1930—2012) первым ступил на поверхность Луны.

Современные космонавты не только проводят научные эксперименты, но и решают задачи для различных отраслей экономики. Например, они проводят фотографирование поверхности Земли, что необходимо для изучения тектонических структур, определения перспективных для добычи нефти и газа районов, а также для обновления геологических и почвенных карт, определения чистоты вод в водоёмах и обнаружения источников грунтовых вод и т. д. Космонавты изучают облачный покров Земли, помогая тем самым получать информацию об образовании тайфунов и циклонов. На около-

земной орбите постоянно работают орбитальные станции, на которых члены национальных и международных экипажей проводят по несколько месяцев, сменяя друг друга.



**Сергей Павлович Королёв** (1907—1966) — выдающийся советский учёный и конструктор, основоположник практической космонавтики, академик АН СССР. Осуществлял общее руководство первыми космическими программами. Под его руководством созданы первые в мире межконтинентальные баллистические ракеты, ракеты-носители «Восток» и «Восход»; осуществлены запуск первого искусственного спутника Земли, первый полёт человека в космос, первый выход человека в космическое пространство, полёты космических аппаратов к Луне и планетам Солнечной системы.



Одним из перспективных направлений развития космических полётов является переход на использование многоразовых космических аппаратов. Корабли многоразового использования «Спейс Шаттл» (рис. 66, а) были созданы в США, а «Буран» (рис. 66, б) — в нашей стране.

Наряду с пилотируемыми кораблями, в космонавтике применяются и беспилотные аппараты. С помощью автоматических космических аппаратов удалось исследовать поверхность Луны, а также Венеру, Марс и другие планеты Солнечной системы, их спутники и другие космические объекты. Сегодня на орбитах вокруг Земли движутся сотни спутников, и каждый из них имеет определённую «специализацию». Одни спутники обеспечивают передачу радио- и телевизионных сигналов. Благодаря таким спутникам людям на разных континентах доступны десятки телевизионных каналов.

Другие спутники фиксируют атмосферные процессы и передают полученную информацию в гидрометеорологические центры. Именно метеоспутники помогают учёным составлять прогнозы погоды. С помощью третьих спутников получают фотографии, необходимые, например, для составления точных карт, а также для разведывательных целей. Это только несколько примеров применения современных спутников. Таким образом, современная космонавтика перестала быть только одной из отраслей науки и техники, а стала ещё и важной отраслью экономики.

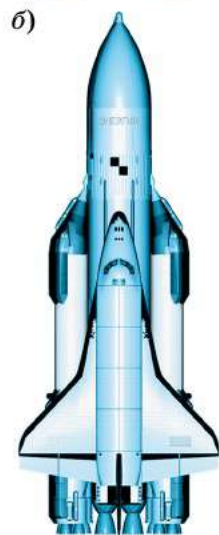


Рис. 66

## Вопросы для самопроверки

1. Почему для полётов в космос могут использоваться только ракеты? В чём заключается принцип реактивного движения?
2. Как рассчитать скорость оболочки ракеты?
3. Каково примерное соотношение между стартовой массой ракеты и массой полезного груза?
4. Каковы, на ваш взгляд, основные вехи на пути освоения космоса?

## Упражнение 13

1. Заполните таблицу 10, систематизирующую сведения о полётах первых отечественных космонавтов, используя интернет-ресурсы и другие источники информации.

**Таблица 10**

<i>Фамилия космонавта</i>	<i>Годы жизни</i>	<i>Характеристики полёта (время полёта, название космического корабля) и содержание работы экипажа</i>

2. Найдите характеристики российской межконтинентальной баллистической ракеты «Тополь-М», используя интернет-ресурсы. Как об этой ракете отзываются отечественные специалисты? Как её оценивают зарубежные военные эксперты?



## Вопросы для дискуссии

Что вы считаете естественным в идеях классической механики, а что кажется странным и маловероятным? Обоснуйте свою точку зрения.

# З

## Основное в главе

1. Следствия классической механики (табл. 11).

**Таблица 11**

<i>Следствия</i>	<i>Примеры</i>
Объяснение эмпирических фактов и законов	Объяснение законов Кеплера, наблюдаемых движений небесных тел
Предсказание ещё не открытых явлений, процессов и объектов	Открытие Нептуна
Применение законов и принципов в прикладных отраслях науки и в технике	Развитие небесной механики, баллистики, космонавтики

## 2. Космические скорости для Земли (табл. 12).

Таблица 12

Название	Значение	Характер движения тела
Первая космическая	$v_I \approx 7,9$ км/с	Минимальная скорость, необходимая для выхода на круговую орбиту Земли (круговая скорость)
Вторая космическая	$v_{II} \approx 11,2$ км/с	Минимальная скорость, необходимая для того, чтобы преодолеть притяжение Земли и уйти в космическое пространство (параболическая скорость)

## Итоги раздела

КЛАССИЧЕСКАЯ МЕХАНИКА	
Основание классической механики	<p><i>Основные понятия и величины</i> Механическое движение, макроскопическое тело, система отсчёта — инерциальная и неинерциальная, кинематические и динамические характеристики движения и др.</p> <p><i>Идеализированные объекты — модели</i> Материальная точка, абсолютно упругое тело, абсолютно твёрдое тело, изолированное тело, замкнутая система тел и др.</p> <p><i>Экспериментальные факты и данные наблюдений</i> Принцип инерции Галилея, законы Кеплера, законы ускоренного движения, законы свободного падения и др.</p>
Ядро классической механики	<p><i>Законы динамики Ньютона</i></p> <p><i>Принципы</i> суперпозиции, относительности и др.</p> <p><i>Законы для сил</i> тяготения, упругости, трения</p> <p><i>Законы сохранения</i> импульса, полной механической энергии</p> <p><i>Теорема динамики</i> об изменении кинетической энергии</p>

<p>Следствия классической механики</p>	<p><i>Объяснение экспериментальных фактов и законов</i>  <i>Предсказание ещё не открытых явлений, процессов и объектов</i>          Открытие Нептуна «на кончике пера» и др.  <i>Практическое применение</i>          Небесная механика, баллистика, космонавтика и др.</p>
--	---

## Вопросы

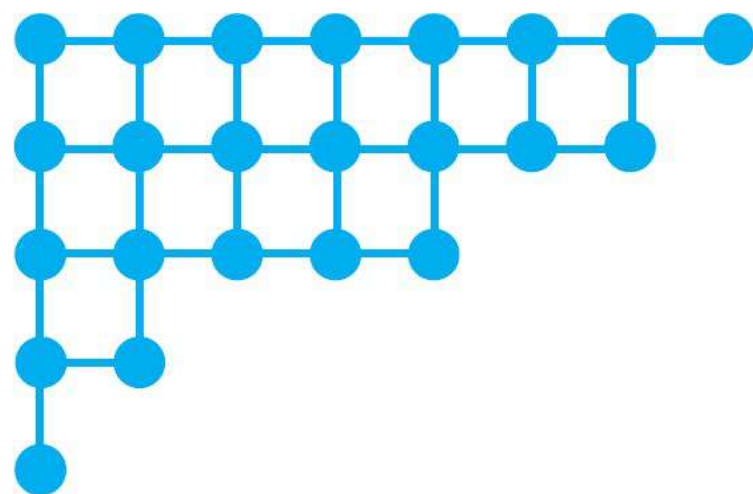
1. Как должны учитываться полученные вами знания об инертности тел в ситуации, когда вы являетесь участником дорожного движения — пешеходом или водителем; когда вы едете в качестве пассажира в автобусе; в поезде?
2. Для выполнения какой профессиональной деятельности необходимо знание законов классической механики? Подготовьте краткое сообщение о таких профессиях. Используйте для этого интернет-ресурсы и другие источники информации.

## Темы проектов

1. Спроектируйте и изготовьте прибор, фиксирующий изменение скорости подвижной системы отсчёта, в которой он находится, относительно неподвижной системы отсчёта, связанной с землёй, в случае, когда визуально зафиксировать изменение скорости нельзя (например, нет окон). Проверьте работу прибора во время поездки в автомобиле или на любом другом виде наземного транспорта.
2. Экологически чистые виды городского транспорта.
3. Космический «мусор»: проблемы и пути решения.

## Исследовательские задания

1. Предложите эксперименты, позволяющие с помощью подручных средств исследовать зависимость дальности полёта тела от направления начальной скорости. Выполните их и подготовьте соответствующие сообщения.
2. В § 16 представлены только общие соображения к выводу закона Бернулли для случая, когда труба расположена под углом к горизонту. Используя интернет-ресурсы и самостоятельно подобранную литературу, попробуйте более полно представить вывод закона Бернулли для этого случая.



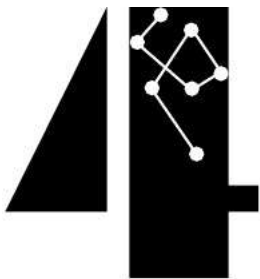
## МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА

Человека окружают разнообразные тела. Вещества, из которых эти тела состоят, могут быть как естественного, так и искусственного происхождения. Развитие техники требует создания новых веществ с определёнными свойствами: обладающих малой плотностью, но высокой прочностью; малой теплопроводностью или большой твёрдостью и т. п. Влиять на свойства вещества, изменять их, создавать вещества, обладающие определёнными свойствами, стало возможным после того, как было изучено их строение и создана молекулярно-кинетическая теория строения вещества.

При сообщении телам некоторого количества теплоты их состояние изменяется: они нагреваются, из твёрдого состояния могут перейти в жидкое, из жидкого — в газообразное. При этом изменяется внутренняя энергия тела. Однако понять, почему и как изменяется внутренняя энергия тел при сообщении им некоторого количества теплоты, можно, только зная внутреннее строение вещества.

В курсе физики основной школы вы изучали основы молекулярной физики и имеете определённые представления о строении вещества. В данном разделе эти представления будут расширены.

Сначала вы рассмотрите основные положения молекулярно-кинетической теории строения вещества, затем основные понятия и законы термодинамики (раздела физики, в котором изучаются тепловые явления и процессы без учёта внутреннего строения вещества), после чего эти знания примените к анализу свойств газов, жидкостей и твёрдых тел.



## **Основы молекулярно-кинетической теории строения вещества**

*Вы хорошо знаете, насколько обширен класс физических явлений: это и механические, и тепловые, и электромагнитные, и световые явления. Изучив механические явления, вы понимаете, что вид движения, изменение координаты тела и его скорости зависят от характера взаимодействия данного тела с другими и объясняются классической механикой.*

*При изучении механических явлений не рассматривают внутреннее строение движущихся и взаимодействующих тел, фиксируют лишь изменение их состояния с течением времени. Во всех тепловых явлениях происходит изменение состояния исследуемых тел, но их положение в пространстве остаётся прежним.*

*Возникают вопросы, почему при сообщении телу некоторого количества теплоты его температура возрастает, почему при определённых условиях твёрдое тело превращается в жидкость, а жидкость — в газ, почему тела при нагревании расширяются, а при охлаждении сжимаются. Ответить на эти и другие подобные вопросы, объяснить наблюдаемые явления нельзя, используя законы классической механики. Это можно сделать только на основе знаний о строении вещества.*

## § 20. Макроскопическая система и характеристики её состояния

**1. Макроскопическая система.** Любое тело — твёрдое, жидкое, газообразное — состоит из огромного числа частиц, которые находятся в непрерывном, хаотическом движении и взаимодействуют между собой.

Тела, состоящие из очень большого числа частиц: атомов, молекул, ионов, называют **макроскопическими телами** или **макроскопическими системами**. Примерами макроскопических систем могут служить газ в баллоне, жидкость в сосуде, твёрдое тело.

Раздел физики, в котором изучают физические свойства макроскопических тел (макроскопических систем) в различных агрегатных состояниях на основе рассмотрения их внутреннего (молекулярного) строения, называют **молекулярной физикой**.

**2. Состояние макроскопической системы.** Напомним, что в механике объектом, изменение состояния которого исследуется, является механическая система (материальная точка или весьма небольшое их число). Состояние механической системы характеризуется параметрами состояния, к которым относятся координата и импульс. При изменении состояния системы параметры изменяются. Их значение в любой момент времени можно однозначно определить, если известны параметры начального состояния системы и закон их изменения (кинематические уравнения движения, законы Ньютона).

Тепловые явления также связаны с изменением состояния макроскопических тел. Например, если поставить на включённую плиту сосуд с водой, то состояние системы «сосуд — вода» начнёт изменяться: через некоторое время сосуд и вода нагреются, их объёмы увеличатся. Если быстро сжать газ в цилиндре, то его состояние тоже изменится: объём газа уменьшится и он нагреется.

Из рассмотренных примеров следует, что состояние макроскопической системы так же, как и механической, характеризуется определёнными параметрами. Такими параметрами являются объём, давление, температура. Они характеризуют состояние макроскопической системы как целого, поэтому их называют **макроскопическими параметрами состояния системы**.

Вместе с тем вам известно, что температура макроскопической системы связана со скоростью движения её молекул: чем больше скорость движения молекул, тем выше температура. Со скоростью

движения молекул связано и давление газа на стенки сосуда; оно также зависит от массы молекул. Таким образом, значения макроскопических параметров связаны с характеристиками частиц, составляющих макроскопическую систему.

**3. Методы изучения макроскопических систем.** Движение и взаимодействие материальных точек в механике описываются законами Ньютона. В газе объёмом  $1 \text{ м}^3$  при нормальных условиях (при  $p = 10^5 \text{ Па}$  и  $t = 0 \text{ }^\circ\text{C}$ ) содержится  $10^{25}$  молекул, а в таком же объёме твёрдых и жидких тел — порядка  $10^{28}$  молекул. Движение каждой отдельной частицы вещества приблизительно можно описать с помощью законов Ньютона, однако учесть все взаимодействия, в которых участвует данная частица, практически невозможно. Поэтому состояние каждой частицы макроскопической системы в тот или иной момент времени случайно: случайны её положение, значение и направление скорости. Следовательно, использовать для анализа макроскопических систем тот метод, который использовался в механике, не представляется возможным.

В основе молекулярной физики лежат две теории: термодинамика и молекулярно-кинетическая теория строения вещества. Эти теории используют разные, но взаимно дополняющие друг друга методы описания тепловых явлений и тепловых свойств тел и веществ: **термодинамический** и **статистический**.

Описание состояния и свойств макроскопической системы с помощью макроскопических параметров, которые часто называют **термодинамическими**, является задачей **термодинамического метода**. Он опирается на данные наблюдений и опытов и описывает явления и свойства макроскопических систем, связанные с преобразованием энергии, не рассматривая их внутреннее строение.

Поскольку свойства макроскопической системы зависят от её внутреннего строения, характера движения и взаимодействия входящих в неё частиц, использование лишь термодинамического метода не позволяет эти свойства объяснить.

При использовании **статистического метода** исходят из того, что все вещества состоят из непрерывно хаотически движущихся частиц. При этом моделируют внутреннее строение вещества и предсказывают свойства системы, вытекающие из построенной модели. Математическую основу статистического метода составляет теория вероятности.

Уже говорилось, что состояние любой частицы, входящей в макроскопическую систему, в данный момент времени случайно. Однако оно может быть предсказано с определённой **вероятностью**.



При использовании статистического метода описания свойств макроскопических систем оперируют **средними значениями величин**. Так, характеризуя концентрацию молекул в сосуде, имеют в виду среднее число частиц в единице объёма. Устанавливая связь между температурой тела и скоростью движения его молекул, учитывают среднюю скорость, среднюю кинетическую энергию движения частиц.

То, что состояние частиц макроскопической системы в определённые моменты времени носит случайный характер, не означает, что их движение не подчиняется никаким законам. В отличие от законов динамики, оно описывается законами, называемыми **статистическими**.

Так, хотя скорости и энергии частиц в некоторый момент времени различны и случайны, имеет место вполне определённое распределение частиц по скоростям и энергиям: у большинства частиц значение скорости близко к некоторому значению, называемому *наиболее вероятным*. Важно, что статистические законы справедливы для систем, состоящих из большого числа хаотически движущихся частиц.

Следует заметить, что статистический метод впервые был использован для описания тепловых явлений. В настоящее время он применяется при изучении электрических и магнитных свойств газов, жидкостей и твёрдых тел, в атомной и ядерной физике, при объяснении распространения электромагнитных волн, радиоактивного распада веществ и т. п. По выражению одного из крупнейших немецких физиков-теоретиков **Макса Борна** (1882—1970), «современная физика полностью опирается на статистическую основу».

## Вопросы для самопроверки

1. Что является отличительным признаком макроскопической системы? Приведите примеры таких систем.
2. Чем отличается макроскопическая система от механической?
3. Почему нельзя описать свойства макроскопической системы, используя законы Ньютона?
4. Почему объём является макроскопическим параметром состояния макроскопической системы? Какие ещё макроскопические параметры вам известны?
5. В чём сущность термодинамического и статистического методов описания состояния и свойств макроскопических систем?
6. Какими значениями величин пользуются при статистическом описании свойств макроскопических систем?

## § 21. Атомы и молекулы, их характеристики

**1. Основные положения молекулярно-кинетической теории.** В основе молекулярно-кинетической теории строения вещества лежит несколько положений, с которыми вы уже знакомы из курса физики и химии основной школы. Напомним их.

1. Все вещества состоят из частиц (молекул, атомов, ионов), между которыми есть промежутки. Молекула — мельчайшая частица вещества, сохраняющая его химические свойства.

2. Частицы вещества находятся в непрерывном хаотическом движении.

3. Частицы вещества взаимодействуют между собой: между ними действуют силы притяжения и отталкивания.

Эти положения являются обобщением большого числа экспериментальных фактов. Рассмотрим их детальнее.

**2. Экспериментальные обоснования существования молекул и атомов.** Идея атомистического строения вещества была высказана в V в. до н. э. древнегреческими философами *Левкиппом* (V в. до н. э.) и *Демокритом* (ок. 460—370 до н. э.). Значительный вклад в развитие учения о строении вещества внёс российский учёный М. В. Ломоносов. Он считал, что все тела состоят из «элементов» (атомов) — наименьших неделимых частиц. В свою очередь, «элементы» входят в состав более крупных частиц — «корпускул» (молекул).

Косвенное доказательство того, что все вещества состоят из молекул, было получено английским физиком и химиком *Джоном Дальтоном* (1766—1844). В 1803 г. он установил *закон кратных отношений*, суть которого сводится к следующему. Если какой-либо элемент *A* вступает в реакцию с элементом *B* и образует несколь-



*Михаил Васильевич Ломоносов* (1711—1765) — выдающийся российский учёный, член Петербургской академии наук. Известен своими работами в области физики, химии, астрономии, горного дела, металлургии и др. Экспериментально доказал закон сохранения массы вещества; сформулировал закон сохранения материи и движения; внёс существенный вклад в становление молекулярно-кинетической теории строения вещества; разработал теорию атмосферного электричества и теорию цветов; сконструировал целый ряд физических приборов.

ко различных соединений  $C$ ,  $D$  и т. д., то при постоянной массе элемента  $A$  массы элемента  $B$  в соединениях  $C$ ,  $D$  и т. д. будут относиться друг к другу как целые числа.

Например, азот и кислород могут образовывать следующие соединения:  $N_2O$ ,  $NO$ ,  $N_2O_3$ ,  $NO_2$ ,  $N_2O_5$ . В них на равные массы азота приходится массы кислорода, которые относятся друг к другу как  $1 : 2 : 3 : 4 : 5$ . Объяснить это можно тем, что при образовании соединений 2 атома азота присоединяют к себе 1, 2, 3, 4 или 5 атомов кислорода.

Другим косвенным подтверждением первого положения молекулярно-кинетической теории строения вещества является диффузия, а также результат опыта по смешиванию воды и спирта (рис. 67). Длинную узкую стеклянную трубку до середины заполним водой и сверху нальём подкрашенный спирт (рис. 67, а). Если перемешать жидкости, то объём смеси окажется меньше суммы первоначальных объёмов воды и спирта (рис. 67, б). Это можно объяснить лишь тем, что молекулы спирта проникают в промежутки между молекулами воды, а молекулы воды — в промежутки между молекулами спирта.

В настоящее время крупные молекулы органических соединений можно наблюдать непосредственно с помощью электронного или ионного микроскопа. Сейчас уже ни у кого не вызывает сомнений то, что все вещества состоят из молекул и атомов.

**3. Размеры молекул.** Оценить размеры молекул можно с помощью следующего опыта. Если в широкий стеклянный сосуд налить воду и капнуть на её поверхность каплю оливкового масла, то капля растечётся по поверхности воды и образует плёнку, толщина которой будет равна диаметру одной молекулы (мономолекулярный слой) (рис. 68). В этом опыте объём капли масла был равен  $V = 0,9 \cdot 10^{-9} \text{ м}^3$ , площадь плёнки  $S = 0,55 \text{ м}^2$ . Толщина плёнки, т. е. диаметр молекулы

$$d = \frac{V}{S} = 1,6 \cdot 10^{-9} \text{ м.}$$

Атомы всех химических элементов имеют размеры одного порядка ( $10^{-10} \text{ м}$ ). Простейшие молекулы, состоящие из несколь-

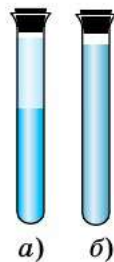


Рис. 67

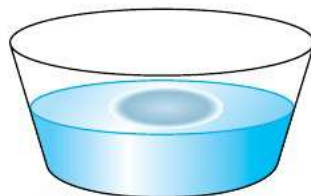


Рис. 68

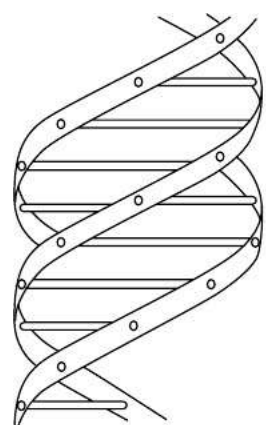


Рис. 69

ких атомов, имеют размеры, сравнимые с размерами атома, — порядка  $10^{-10}$  м. Размеры молекул органических соединений  $10^{-9}$  м, а крупные молекулы белковых соединений достигают размеров  $10^{-8}$ — $10^{-7}$  м. Наибольшие размеры имеет молекула дезоксирибонуклеиновой кислоты (ДНК) клеток млекопитающих. Так, у человека вытянутая молекула ДНК (рис. 69) имеет размеры порядка 1,5—3,2 см.

Для того чтобы представить, насколько малы молекулы, предположим, что размеры всех тел увеличили в миллион раз. Тогда молекула станет видна, т. е. она будет иметь диаметр 0,1 мм, песчинка превратится в стометровую скалу, а средний рост человека будет равен 1700 км.

**4. Масса молекул.** Как вы уже знаете, масса молекул очень мала. Например, масса молекулы кислорода составляет  $5,3 \cdot 10^{-26}$  кг, молекулы водорода —  $3,3 \cdot 10^{-27}$  кг.

Такими большими числами пользоваться не очень удобно, поэтому при расчётах часто пользуются понятием **относительной молекулярной массы**. Из курса химии вам известно, что

**относительной молекулярной массой вещества  $M_r$**  называют величину, равную отношению массы молекулы  $m_0$  данного вещества к  $1/12$  массы  $m_{0C}$  атома углерода  $^{12}_6\text{C}$ .

$$M_r = \frac{m_0}{\frac{1}{12} m_{0C}}$$

**5. Количество вещества.** При сравнении масс тел, состоящих из веществ, химический состав которых одинаков, вывод об их соотношении можно сделать на основании сравнения числа содержащихся в них молекул или атомов. Действительно, если масса одного железного тела в 10 раз больше массы другого железного тела, то это значит, что в первом теле содержится в 10 раз больше атомов железа, чем во втором. Если сравнивать массы тел, состоящих из разных веществ, то по значениям их массы сделать вывод о соотношении числа молекул уже нельзя, поскольку масса молекул и атомов различных веществ неодинакова. В частности, 1 кг свинца и 1 кг железа содержат разное число атомов.

Возникает необходимость введения величины, позволяющей характеризовать массу тел, состоящих из разных веществ, по числу содержащихся в них молекул. Такой физической величиной является **количество вещества**.

**Количеством вещества  $\nu$**  называют величину, равную отношению числа молекул или атомов  $N$  в данном теле к числу  $N_A$  атомов в 0,012 кг углерода.

$$\nu = \frac{N}{N_A}.$$

Зная количество вещества и число молекул в 0,012 кг углерода, можно определить число молекул в теле:  $N = \nu N_A$ .

Единицей количества вещества является *моль*.

Один моль — количество вещества, содержащее столько молекул (атомов), сколько атомов содержится в 0,012 кг углерода  $^{12}_6\text{C}$ .

Если взять алюминий количеством вещества 3 моль, то это означает, что число молекул в данном количестве вещества в 3 раза больше, чем в 0,012 кг углерода.

**6. Молярная масса.** Для характеристики массы молекул в количестве одного моля вводят понятие молярной массы.

**Молярной массой** называют массу количества вещества 1 моль.

Молярную массу находят, умножая относительную молекулярную массу  $M_r$  на  $10^{-3}$  кг/моль:

$$M = M_r \cdot 10^{-3}.$$

Например, молярная масса воды  $\text{H}_2\text{O}$  равна  $18 \cdot 10^{-3}$  кг/моль, поскольку её относительная молекулярная масса равна  $1 \cdot 2 + 16 = 18$ . Зная молярную массу  $M$  вещества и количество вещества  $\nu$ , можно определить массу  $m$  вещества:

$$m = M\nu.$$

**7. Концентрация молекул. Постоянная Авогадро.** Поскольку молекулы имеют малые размеры, их число в любом макроскопическом теле очень велико.

Число молекул в единице объёма называют **концентрацией**. Концентрация  $n$  вычисляется по формуле

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

где  $N$  — число молекул в теле,  $V$  — его объём.

Как правило, бывает известно не количество молекул, а плотность вещества. Поскольку  $\rho = \frac{m}{V}$ , где  $m$  — масса тела, и  $m = m_0N$ , где  $m_0$  — масса молекулы вещества, получим

$$\rho = \frac{m_0N}{V} = m_0n.$$

Отсюда выразим концентрацию молекул вещества

$$n = \frac{\rho}{m_0}.$$

Если плотность воды  $\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$ , а масса молекулы воды  $m_0 = 3 \cdot 10^{-26} \text{ кг}$ , то концентрация молекул воды равна:

$$n = \frac{1000 \text{ кг/м}^3}{3 \cdot 10^{-26} \text{ кг}} \approx 3 \cdot 10^{28} \text{ м}^{-3}.$$

Плотность газов существенно меньше, чем плотность жидкостей, поэтому и концентрация молекул газов меньше, чем концентрация молекул жидкости. Так, если плотность водорода  $9 \cdot 10^{-2} \text{ кг/м}^3$ , масса молекулы водорода  $3,3 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$ , то концентрация молекул водорода равна  $2,68 \cdot 10^{25} \text{ м}^{-3}$ . Концентрация молекул любого газа при нормальных условиях одинакова и равна приведённому для водорода значению. Это число называют **постоянной Лошмидта**:

$$L = 2,68 \cdot 10^{25} \text{ м}^{-3}.$$

Чтобы представить себе, насколько велико это число, предположим, что в воздушном шаре сделали настолько тонкий прокол, что за каждую секунду через него проходит 10 молекул. В этом случае, для того чтобы вышли все молекулы, потребуется 30 миллиардов лет.

Из определения моля следует, что 1 моль любого вещества содержит одинаковое число молекул (атомов). Это число называют **постоянной Авогадро**.

**Постоянная Авогадро  $N_A$**  — число молекул или атомов в количестве вещества 1 моль.

$$N_A = 6,02 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}.$$

Постоянную Авогадро можно рассчитать, зная, что углероду количеством вещества 1 моль соответствует масса 0,012 кг, а масса

одной молекулы углерода  $m_{\text{OC}} = 1,995 \cdot 10^{-26}$  кг. Тогда в одном моле углерода содержится число молекул:

$$N_{\text{A}} = \frac{M}{m_{\text{OC}}};$$

$$N_{\text{A}} = \frac{0,012 \text{ кг/моль}}{1,995 \cdot 10^{-26} \text{ кг}} = 6,02 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}.$$

Поскольку в одном моле любого вещества содержится одинаковое число молекул, то при одинаковых условиях 1 моль любого газа занимает одинаковый объём.

Объём, занимаемый при нормальных условиях любым газом количеством вещества 1 моль, равен  $0,0224 \text{ м}^3$ .

## Вопросы для самопроверки

1. Сформулируйте первое положение молекулярно-кинетической теории строения вещества.
2. Поясните выражение: «Молекула — мельчайшая частица вещества, сохраняющая его химические свойства».
3. Опишите опыт, позволяющий оценить размеры молекулы. Предложите способ измерения объёма капли масла.
4. Что называют относительной молекулярной массой; количеством вещества; молярной массой; концентрацией молекул; постоянной Авогадро?
5. Что такое один моль?
6. Каков порядок значений размеров и массы молекул, их концентрации, числа молекул в одном моле вещества?

## Упражнение 14

- 1<sub>д</sub><sup>1</sup>. Подготовьте краткое сообщение об исследованиях М. В. Ломоносова, результаты которых внесли вклад в развитие учения о строении вещества. Воспользуйтесь для этого интернет-ресурсами и другими источниками информации. Докажите, что результаты исследований М. В. Ломоносова имели принципиальное значение для развития взглядов на строение вещества.
2. Сравните количество вещества, содержащееся в телах равной массы из алюминия и железа.
3. Найдите число атомов в алюминиевой ложке массой 30 г.
4. Деталь площадью  $30 \text{ см}^2$  покрыли слоем серебра толщиной 2 мкм. Сколько атомов серебра содержится в покрытии?

<sup>1</sup> Индексом «д» обозначены задания, в которых предлагается подготовить доклад.

5. Сравните массы и объёмы двух тел, сделанных из свинца и меди, если в них содержатся равные количества вещества.

6. Вычислите постоянную Авогадро, если известно, что масса молекулы кислорода  $5,312 \cdot 10^{-26}$  кг.

## Вопросы для дискуссии

Почему мы уверены в существовании молекул и атомов, ведь мы их не видим?

## § 22. Движение молекул

**1. Диффузия.** Почему распространяются запахи? Почему если на дно стакана положить несколько кусочков сахара и аккуратно налить сверху воду, то через некоторое время вода станет сладкой? Почему трудно вывернуть болт, если его несколько лет не вынимали?

Ответ на эти вопросы даёт второе положение молекулярно-кинетической теории строения вещества:

**частицы вещества (молекулы, атомы, ионы) находятся в непрерывном хаотическом движении.**

Напомним, что такое движение называют **тепловым**.

Слово «непрерывное» означает, что движение молекул вещества никогда не прекращается. Слово «хаотическое» означает, что нельзя выделить какое-то преимущественное направление, в котором двигалось бы большинство молекул, направление движения каждой молекулы постоянно меняется.

Одним из доказательств движения молекул служит явление диффузии.

**Диффузия — явление проникновения молекул одного вещества в промежутки между молекулами другого вещества.**

Теперь можно ответить на вопросы, поставленные в начале параграфа. Одной из причин распространения запаха является диффузия: молекулы пахучего вещества, двигаясь, проникают в промежутки между молекулами воздуха. Вода становится сладкой потому, что молекулы сахара проникают в промежутки между молекулами воды. Болт трудно вывернуть потому, что молекулы вещества, из которого сделан болт, проникают в промежутки между молекулами того вещества, в которое он вкручен. Помимо этого, следует иметь в виду, что вещество, из которого сделан болт, окис-





ляется и на нём образуется слой ржавчины, который тоже препятствует выкручиванию болта.

**2. Скорость диффузии.** Диффузия происходит в веществах, находящихся в твёрдом, жидком и газообразном состояниях. Однако скорость диффузии в них различна: поскольку промежутки между молекулами газов сравнительно большие, то и скорость диффузии в них самая большая. В жидкостях диффузия происходит медленнее, чем в газах, поскольку молекулы жидкостей располагаются ближе друг к другу. Резкая граница между водой и медным купоросом, налитыми в один сосуд, как вам известно, становится размытой через несколько суток.

Ещё медленнее протекает диффузия в твёрдых телах. Если плотно прижать друг к другу пластины из золота и свинца и поместить их в печь, имеющую достаточно высокую температуру, то через год с помощью микроскопа можно будет обнаружить взаимное проникновение молекул этих веществ в межмолекулярные промежутки.

Скорость диффузии возрастает с повышением температуры. Так, если опустить на дно двух стаканов кристаллики марганцовки и один стакан поставить в холодильник, а другой оставить в комнате в тёплом месте (около батареи или плиты), то можно заметить, что вода быстрее окрасится в стакане, который находится в комнате.

**3. Броуновское движение.** Одним из самых очевидных доказательств того, что молекулы движутся, является броуновское движение. Английский ботаник **Роберт Броун** (1773—1858) в 1827 г., наблюдая в микроскоп взвешенные в воде частички цветочной пыльцы, заметил, что они совершают беспорядочное движение, описывая при этом сложные зигзагообразные траектории. На рисунке 70 точками, соединёнными прямыми линиями, отмечены положения частиц через равные промежутки времени. Движение частиц не прекращалось, сколько бы времени ни велось наблюдение.

Подобное движение, называемое **броуновским**, можете наблюдать и вы. Если растереть краску до мелких крупинок и размешать её в воде, то, рассматривая полученную смесь в микроскоп, можно увидеть, что крупинки краски непрерывно движутся.

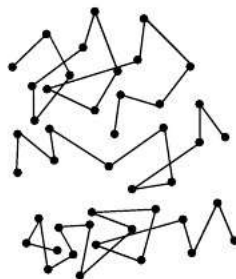


Рис. 70

**Броуновское движение — хаотическое движение мелких частиц твёрдого вещества, взвешенных в жидкости или газе.**

Броуновское движение не могли объяснить в течение 80 лет. Сам Броун даже предположил вначале, что частицы пылицы движутся потому, что они живые. Однако движение не прекратилось и после кипячения взвеси в воде. Пытались объяснить движение частиц тем, что в сосуде происходит химическая реакция, что жидкость неравномерно нагревается под действием света и т. д. Но все эти гипотезы оказывались несостоятельными и отвергались после тщательных экспериментов.

**4. Теория броуновского движения.** Теория броуновского движения была построена в 1905—1906 гг. Эйнштейном и польским учёным *Марианом Смолуховским* (1872—1917), подтверждена экспериментально в 1908 г. французским учёным *Жаном Перреном* (1870—1942).

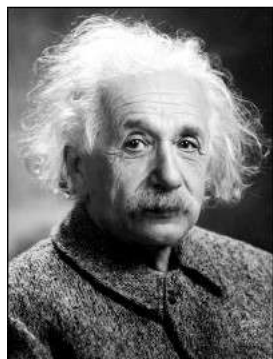
Изучение броуновского движения позволило сделать следующие выводы.

1. Причиной броуновского движения частиц является движение молекул среды, в которой эти частицы находятся.

В каждый момент времени с броуновской частицей сталкиваются молекулы. Число молекул, ударяющихся о частицу с разных сторон, неодинаково, различны значения и направления их скоростей, следовательно, импульсы, передаваемые частице с разных сторон, не компенсируют друг друга и на частицу действует сила, неравная нулю. Частица движется в направлении равнодействующей силы. В следующий момент времени направление равнодей-

---

*Альберт Эйнштейн* (1879—1955) — выдающийся немецкий физик-теоретик, один из создателей современной физики. Известен своими работами в области специальной и общей теории относительности, квантовой теории, статистической физики. Создал специальную и общую теорию относительности, изменив коренным образом представления о пространстве и времени; открыл закон взаимосвязи массы и энергии; теоретически открыл световые кванты (фотоны) и, исходя из квантовой природы излучения, объяснил такое явление, как фотоэффект; развил статистическую теорию броуновского движения.



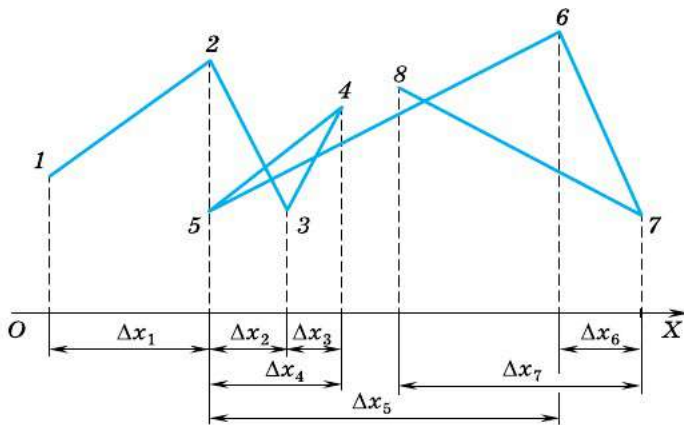


Рис. 71

ствующей силы меняется, что заставляет частицу двигаться в другую сторону.

2. Броуновское движение, являясь следствием теплового движения молекул, никогда не может прекратиться.

3. Движение броуновской частицы беспорядочно, поскольку её столкновения с молекулами случайны. Однако при большом числе наблюдений это движение подчиняется некоторому статистическому закону: перемещение броуновской частицы определённым образом зависит от времени.

Перемещения броуновской частицы за равные промежутки времени неодинаковы, также различны и их проекции на ось  $OX$  (рис. 71):  $\Delta x_1, \Delta x_2, \dots, \Delta x_N$ . Если возвести проекции перемещений в квадрат и найти среднее значение квадрата перемещения  $\overline{x^2} = \frac{\Delta x_1^2 + \Delta x_2^2 + \dots + \Delta x_N^2}{N}$ , то в соответствии с законом Эйнштейна

и Смолуховского средний квадрат проекции перемещения  $\overline{x^2}$  прямо пропорционален времени, за которое происходит это перемещение:  $\overline{x^2} \sim t$ .

4. Интенсивность броуновского движения растёт с повышением температуры. Доказано, что средний квадрат проекции перемещения частицы на ось  $OX$  прямо пропорционален температуре.

На примере броуновского движения очень хорошо прослеживается цикл познания в физической науке: наблюдение (наблюдение Броуна) → выдвижение гипотез (предположения Броуна о влиянии различных факторов на движение частиц) → проверка гипотез (экс-

перименты Броуна) → принятие верной гипотезы и её объяснение → построение теории (построение теории броуновского движения) и теоретическое пояснение экспериментальных фактов.

## Вопросы для самопроверки

1. Какие опыты и наблюдения подтверждают, что молекулы находятся в движении?
2. Как вы понимаете, что движение молекул непрерывное и хаотическое?
3. Что является причиной диффузии? От чего зависит скорость диффузии?
4. Как объясняется движение броуновской частицы?
5. Какому закону подчиняется движение броуновской частицы? Почему этот закон является статистическим?
- 6\*. Как зависит интенсивность броуновского движения от плотности среды?

## Упражнение 15

1. Объясните явление, выражаемое словами: «Дым тает в воздухе».
2. Почему сахар и другие пористые продукты нельзя хранить рядом с пахучими веществами?
3. В какой исторический период Броун проводил свои опыты? Как первоначально истолковывались их результаты? Почему в течение долгого времени не могли сделать верные с точки зрения современных научных представлений выводы из наблюдений Броуна? Для ответа используйте интернет-ресурсы и другие источники информации.
4. Почему для наблюдения броуновского движения краску необходимо размельчить? Зависит ли интенсивность броуновского движения от размеров взвешенной частицы?
5. Чем объяснить, что резиновый шарик, наполненный водородом, через несколько часов не будет подниматься вверх?
6. Расположите приведённые ниже пары граничащих веществ в порядке возрастания скорости диффузии: воздух — пары эфира; золото — алюминий (600 °C); вода — медный купорос (20 °C); вода — медный купорос (60 °C).

## Вопросы для дискуссии

Можно ли тепловое расширение тел, диффузию, измельчение и растворение веществ объяснить, считая, что тела имеют непрерывное строение? Если можно, то объясните.

## § 23. Опытное определение скоростей движения молекул

**1. Опыт Штерна.** Участвуя в непрерывном хаотическом движении, молекулы газа постоянно сталкиваются между собой, при этом число сталкивающихся частиц в каждый момент времени различно. Поэтому импульсы и скорости частиц постоянно изменяются, и в тот или иной момент времени их значения у разных молекул различны.

Впервые скорости движения молекул газа были измерены в 1920 г. немецким физиком **Отто Штерном** (1888—1969). Экспериментальная установка, которой пользовался Штерн, состояла из двух цилиндров *A* и *B* (рис. 72) с общей осью вращения. В стенке внутреннего цилиндра *A* была сделана узкая щель *C*, а вдоль оси цилиндра натянута тонкая платиновая проволока *OO'*, покрытая слоем серебра. Воздух из цилиндров откачивался. При прохождении по проволоке электрического тока она нагревалась, слой серебра испарялся и внутренний цилиндр заполнялся газом из атомов серебра.

Некоторые атомы проходили через щель и оседали на внутренней поверхности цилиндра *B* напротив щели (рис. 73, *a*). Осадок имел форму полоски (рис. 73, *в*).

Когда цилиндры приводили во вращение с одинаковой угловой скоростью, атомы серебра осаждались на внутренней поверхности цилиндра *B* уже не напротив щели, а на некотором расстоянии *s* от полоски, напылённой при неподвижных цилиндрах (рис. 73, *б*). За время, которое необходимо атомам серебра, чтобы пролететь расстояние от цилиндра *A* до цилиндра *B*, цилиндры успевали повернуться на

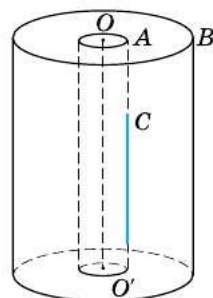


Рис. 72

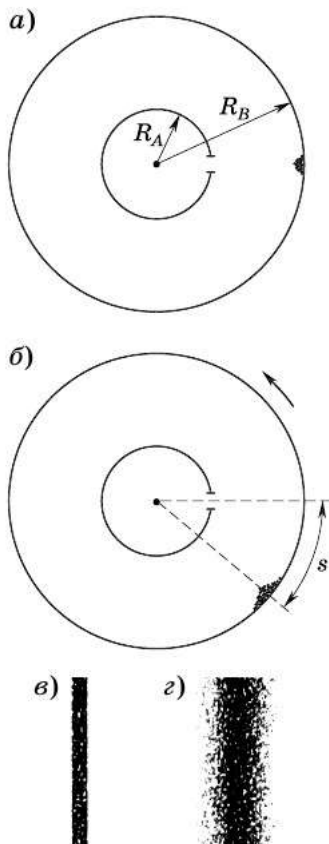


Рис. 73

некоторый угол. При этом толщина полоски была не везде одинакова (рис. 73,  $z$ ). Это объясняется тем, что атомы серебра имеют разные скорости и им требуется разное время, чтобы долететь до внутренней поверхности цилиндра  $B$ . Чем меньше скорость атомов, тем больше расстояние  $s$ , на котором они осадут; чем больше скорость атомов, тем меньше это расстояние.

Оказалось, что как «медленных», так и «быстрых» атомов немного. Большая часть из них имеет скорости, близкие к некоторому значению, называемому **наиболее вероятной скоростью**. Об этом свидетельствует тот факт, что толщина слоя серебра в центре — наибольшая (см. рис. 73,  $z$ ).

Скорость атомов в опыте Штерна может быть рассчитана следующим образом. Если частота вращения цилиндров  $n$ , радиус внутреннего цилиндра  $R_A$ , радиус внешнего цилиндра  $R_B$ , смещение атомов  $s$ , то скорость их движения равна:

$$v = \frac{R_B - R_A}{t}; t = \frac{s}{u},$$

где  $u$  — линейная скорость точек поверхности цилиндра  $B$ .

Так как линейная скорость связана с частотой вращения формулой  $u = 2\pi n R_B$ , то

$$v = \frac{2\pi(R_B - R_A)R_B n}{s}.$$

В зависимости от значения  $s$  получают разные значения скорости движения атомов.

Из опыта Штерна найдено, что при температуре 120 °С скорости большинства атомов серебра лежат в пределах от 500 до 625 м/с. При изменении условий опыта, например температуры вещества, из которого сделана проволока, получают иные значения скоростей, но характер распределения атомов в напылённом слое не меняется. Отсюда следует, что распределение атомов и молекул по скоростям представляет собой определённую закономерность, характеризующую их тепловое движение.

**2. Распределение молекул по скоростям.** В таблице 13 приведено распределение молекул азота по скоростям при комнатной температуре. Из таблицы видно, что наибольшее число молекул имеют скорости, значения которых лежат в интервале от 300 до 500 м/с, 91% молекул имеют скорости, значения которых заключены в интервале от 100 до 700 м/с, и лишь 9% молекул имеют значения скоростей меньше 100 м/с и больше 700 м/с.

Таблица 13

Интервал скоростей, м/с	Процент молекул от общего числа, имеющих скорости, значения которых лежат в указанных пределах
Меньше 100	1
От 100 до 300	25
От 300 до 500	42
От 500 до 700	24
От 700 до 900	7
Свыше 900	1

Теоретически закон распределения молекул по скоростям установил британский физик Максвелл в 1859 г., т. е. задолго до опытов Штерна.

График распределения молекул по скоростям приведён на рисунке 74. По оси абсцисс отложены значения скоростей молекул; по оси ординат — доля молекул, обладающих скоростями, значения которых лежат в интервале  $\Delta v$  (0—100, 100—200 м/с и т. д.), отнесённая к ширине интервала скорос-

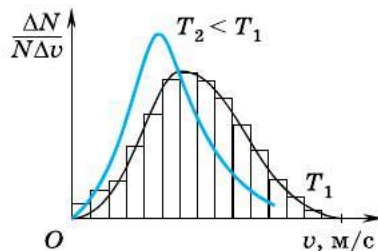
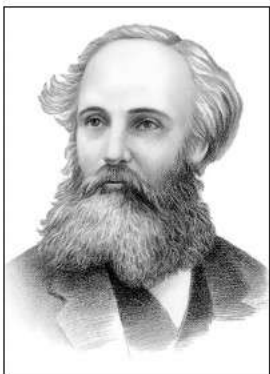


Рис. 74



**Джеймс Клерк Максвелл** (1831—1879) — британский физик, создатель теории электромагнитного поля, член Эдинбургского и Лондонского королевских обществ. Известен своими работами в области молекулярной физики, электродинамики, оптики. Является одним из основателей кинетической теории газов; установил статистический закон распределения молекул по скоростям; обосновал статистический смысл второго начала термодинамики; создал теорию электромагнитного поля, доказал, что свет имеет электромагнитную природу, вычислил давление света.

тей  $\Delta v$ , т. е.  $\frac{\Delta N}{N\Delta v}$ , где  $N$  — число молекул в некотором объёме газа,

$\Delta N$  — число молекул, скорости которых лежат в интервале  $\Delta v$ .

Доля молекул, значения скоростей которых лежат в интервале от  $v$  до  $\Delta v$ , численно равна площади прямоугольника, построенного на интервале  $\Delta v$  как на его стороне:

$$\frac{\Delta N}{N} = \frac{\Delta N}{N\Delta v} \Delta v.$$

Построив на каждом интервале скоростей соответствующие прямоугольники, получим распределение молекул по скоростям. Если уменьшить интервалы скоростей, то ломаная линия приблизится к плавной кривой. Значение скорости, которому соответствует максимум кривой, есть наиболее вероятная скорость.

При повышении температуры максимум графика смещается в область бóльших значений скорости, при понижении температуры — в область меньших (см. рис. 74).

Таким образом, из опытов по определению скоростей молекул и из теории Максвелла можно сделать следующие выводы.

1. Распределение молекул по скоростям подчиняется определённым закономерностям; оно постоянно во времени при неизменных внешних условиях.

2. Значения скоростей большинства молекул близки к некоторому значению, называемому наиболее вероятным.

3. При повышении температуры скорость молекул возрастает, максимум кривой распределения смещается в область бóльших значений скоростей.

**3. Средний квадрат скорости.** Кроме наиболее вероятной скорости, движение молекул характеризуется средним квадратом скорости. Пусть модули скоростей отдельных молекул  $v_1, v_2, \dots, v_N$ . Тогда среднее значение квадрата скорости равно сумме квадратов скоростей отдельных молекул, делённой на число молекул  $N$ :

$$\overline{v^2} = \frac{v_1^2 + v_2^2 + \dots + v_N^2}{N}.$$

Квадратный корень из этой величины называют **средней квадратичной скоростью**.

Если модуль скорости некоторой молекулы равен  $v$ , то проекции скорости на координатные оси равны соответственно  $v_x, v_y, v_z$



(рис. 75). Квадрат модуля скорости равен сумме квадратов его проекций:

$$v^2 = v_x^2 + v_y^2 + v_z^2.$$

Соответственно, такое же соотношение существует между средним значением квадрата скорости и средним значением квадратов проекций скорости:

$$\overline{v^2} = \overline{v_x^2} + \overline{v_y^2} + \overline{v_z^2}.$$

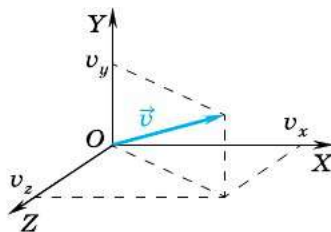


Рис. 75

Молекулы движутся хаотически, поэтому направления осей  $OX$ ,  $OY$  и  $OZ$  равноправны, т. е. можно считать, что средние значения квадратов проекций скорости равны друг другу:

$$\overline{v_x^2} = \overline{v_y^2} = \overline{v_z^2}.$$

Откуда  $\overline{v^2} = 3\overline{v_x^2}$ , или  $\overline{v_x^2} = \frac{\overline{v^2}}{3}$ , т. е. средний квадрат проекции скорости на координатную ось равен одной третьей среднего квадрата самой скорости.

Ранее говорилось о том, что чем больше скорость движения молекул, тем выше температура тела. Правильнее говорить о среднем квадрате скорости движения, т. е. чем больше средний квадрат скорости хаотического движения молекул тела, тем выше его температура.

При изучении вопроса о скоростях движения молекул научный цикл познания происходил следующим образом. Сначала была высказана гипотеза о том, что молекулы движутся с разными скоростями. Эти скорости связаны с температурой, и существует определённый закон распределения молекул по скоростям, что следовало из наблюдений, в частности, броуновского движения. Затем Максвелл теоретически получил закон распределения молекул по скоростям, который носит название распределения Максвелла. Этот закон впоследствии получил экспериментальное подтверждение в опытах Штерна.

Опыт Штерна относится к числу фундаментальных физических экспериментов как опыт, который подтвердил справедливость основных положений молекулярно-кинетической теории строения вещества.

## Вопросы для самопроверки

1. Каковы цель опыта Штерна и его результаты? Как опыт был осуществлён?
2. Какую скорость называют наиболее вероятной?
3. Почему распределение молекул по скоростям является статистическим законом?
4. Каково значение опыта Штерна в развитии представлений о строении вещества?

## Упражнение 16

1. Как показывают результаты эксперимента, молекулы газов движутся с очень большими скоростями. Почему скорость диффузии существенно меньше скорости движения молекул?
2. В какую сторону сместится максимум распределения молекул по скоростям при повышении температуры?
3. Чему соответствует площадь под графиком кривой распределения молекул по скоростям?
4. Изменится ли, и если да, то как, значение наиболее вероятной скорости при понижении температуры газа и при её повышении?
5. Изменится ли, и если да, то как, число молекул, имеющих скорость, близкую к наиболее вероятной, при повышении и понижении температуры газа?
- 6\*. Сравните понятия «средняя скорость движения молекул» и «средняя путевая скорость движения тела».

---

## За страницами учебника

### Распределение Больцмана

**1. Поведение молекул в силовом поле.** Познакомимся с ещё одним законом распределения частиц. Этому закону подчиняется распределение частиц по высоте в поле силы тяжести.

Предположим, что на газ, заключённый в некоторый сосуд, не действует сила тяжести. В этом случае вследствие хаотического движения молекулы равномерно распределятся в сосуде и плотность газа и его давление будут одинаковы во всех точках сосуда.

Если сосуд с газом находится в гравитационном поле, то на молекулы газа действует сила тяжести, направленная вертикально вниз. Таким образом, на поведение молекул в гравитационном поле Земли влияют два фактора: действие силы тяжести и участие в тепловом движении. В результате концентрация молекул (плотность газа) будет различной на разной высоте: у дна сосуда она будет максимальной, а с высотой будет уменьшаться.

**2. Атмосфера Земли.** Примером распределения молекул в силовом поле является изменение концентрации молекул в гравитационном поле Земли. Хорошо известно, что при увеличении высоты подъёма над поверхностью Земли уменьшаются атмосферное давление и плотность воздуха. В таблице 14 приведены значения плотности и давления воздуха на разных высотах. Следует иметь в виду, что на концентрацию молекул влияет и изменение температуры с высотой.

**Таблица 14**

<i>Высота над уровнем моря, м</i>	<i>Давление, Па</i>	<i>Плотность, кг/м<sup>3</sup></i>	<i>Температура, °С</i>
0	101 325	1,2250	15,0
2000	79 495	1,0065	2,0
4000	61 640	0,81914	-11,0
6000	47 181	0,65970	-24,0
8000	35 600	0,52717	-37,0
10 000	26 436	0,41271	-50,0
12 000	19 330	0,31083	-56,5
14 000	14 102	0,22675	-56,5
16 000	10 287	0,16542	-56,5
20 000	5475	0,08804	-56,5

Атмосферный воздух представляет собой смесь газов с разными молекулярными массами. Поэтому концентрация молекул разных газов, входящих в состав воздуха, неодинакова на одной и той же высоте. При увеличении высоты в атмосфере должно изменяться содержание входящих в её состав газов. Однако в действительности состав атмосферы не сильно зависит от высоты из-за возникающих воздушных потоков.

**3. Распределение Больцмана.** Формула, описывающая распределение частиц в поле силы тяжести при постоянной температуре, имеет вид

$$n = n_0 e^{\frac{-mgh}{kT}},$$

где  $n$  — концентрация частиц на высоте  $h$ ,  $n_0$  — концентрация частиц на высоте  $h = 0$ ,  $mgh$  — потенциальная энергия частицы на

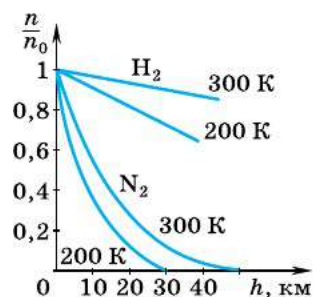


Рис. 76

высоте  $h$ ,  $kT$  — величина, определяющая среднюю кинетическую энергию теплового движения частицы.

Больцман показал, что записанное соотношение имеет общий характер и справедливо для потенциального поля. Оно называется **распределением Больцмана**.

Такого рода зависимости называют **экспоненциальными**. На рисунке 76 приведены графики зависимости относительной концентрации молекул азота и водорода от высоты,

полученные теоретически.

**4. Определение массы молекул.** Экспериментальная проверка распределения Больцмана была осуществлена Перреном в первом десятилетии XX в.

Он предположил, что мелкие частицы, взвешенные в жидкости, распределяются по высоте в соответствии с распределением Больцмана. Перрен изготовил однородную эмульсию, дал ей отстояться и подсчитал концентрацию взвешенных частиц на разных высотах, выделяя с помощью микроскопа слои толщиной 0,0001 см. Он определил, что на высоте  $h = 3 \cdot 10^{-5}$  м концентрация частиц была в 2 раза меньше, чем у дна. Так, если бы атмосфера состояла только из молекул кислорода, то на высоте  $H = 5$  км его плотность (концентрация) была бы в 2 раза меньше, чем у поверхности Земли.

Записав пропорцию

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

где  $m$  — масса молекулы кислорода,  $M$  — масса взвешенной частицы,  $M = 8,58 \cdot 10^{-18}$  кг и подставив числовые значения величин, можно получить значение массы молекулы кислорода

$$m = 5,1 \cdot 10^{-26} \text{ кг.}$$

Вопросы для самопроверки

1. Какие факторы влияют на поведение частиц в силовом поле?
2. Каков состав атмосферы Земли? Как изменяется концентрация молекул газов, входящих в состав атмосферы Земли, с высотой?
3. Каков смысл распределения Больцмана?
4. Какова идея опыта Перрена по определению массы молекул?

## § 24. Взаимодействие молекул и атомов

### 1. Силы взаимодействия между молекулами и атомами.

Почему жидкости и твёрдые тела не распадаются на отдельные молекулы, хотя молекулы разделены промежутками и беспорядочно движутся? Почему трудно сломать палку, растянуть или сжать твёрдое тело? Почему, сломав палку, нельзя восстановить её первоначальный вид?

Ответ на эти вопросы даёт третье положение молекулярно-кинетической теории строения вещества:

**частицы вещества взаимодействуют между собой.**

Проделаем опыт. Опустим на поверхность воды, налитой в сосуд, стеклянную пластину, предварительно прикрепив к ней динамометр (рис. 77, а). Понадобится некоторое усилие, чтобы оторвать пластину от поверхности воды. Об этом будет свидетельствовать растяжение пружины динамометра (рис. 77, б). Причина наблюдаемого явления заключается в том, что между молекулами *действуют силы притяжения*.

Возникает вопрос: почему, несмотря на то что между молекулами есть промежутки, тела так же трудно сжать, как и растянуть? Дело в том, что наряду с силами притяжения между молекулами *действуют силы отталкивания*. Если бы действовали только силы притяжения, то молекулы слиплись бы друг с другом и между ними не было бы промежутков, а этого не происходит.

### 2. Природа межмолекулярного взаимодействия.

Рассмотрим, почему между молекулами и атомами действуют силы притяжения и отталкивания, т. е. силы межмолекулярного взаимодействия.

Как известно, атом состоит из положительно заряженного ядра и отрицательно заряженных электронов. В обычном состоянии атом электрически нейтрален. Ядра и электроны соседних атомов взаимодействуют между

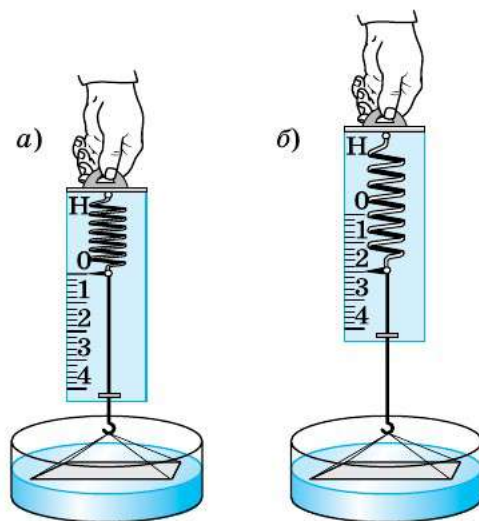


Рис. 77

собой. При этом электроны одного из атомов будут притягивать ядра другого, а электроны этих атомов, так же как и их ядра, будут отталкиваться друг от друга. Таким образом, *межмолекулярное взаимодействие имеет электромагнитную природу и проявляется в притяжении и отталкивании.*

Рассмотрим характер взаимодействия двух атомов. На расстоянии, большем трёх диаметров атома, сила взаимодействия между ними практически равна нулю (рис. 78, а). На расстоянии порядка двух-трёх диаметров атома заметна лишь сила притяжения, сила отталкивания практически равна нулю. Это связано с тем, что в атоме может произойти переориентация зарядов под действием

поля другого атома. Заряженные частицы, входящие в состав атома, создают электрическое поле, которое действует на заряды другого атома и вызывает их перераспределение. Поскольку разноимённые заряды расположатся ближе друг к другу, то сила притяжения на расстояниях, равных двум-трём диаметрам атома, будет значительно превосходить силу отталкивания (рис. 78, б)<sup>1</sup>.

При дальнейшем сближении атомов начнёт возрастать как сила притяжения, так и сила отталкивания. При этом сила отталкивания будет возрастать быстрее, чем сила притяжения, и на некотором расстоянии  $r_0$  сила притяжения станет равной силе отталкивания. Это происходит на расстоянии, примерно равном сумме радиусов атомов (рис. 78, в). При дальнейшем уменьшении расстояния между атомами сила отталкивания будет преобладать над силой притяжения (рис. 78, г). В этом случае определяющую роль играет отталкивание электронных оболочек и ядер атомов.

На рисунке 78, д приведены графики зависимости сил отталкивания  $F_{от}$  и притяжения  $F_{пр}$ , а также равнодействующей

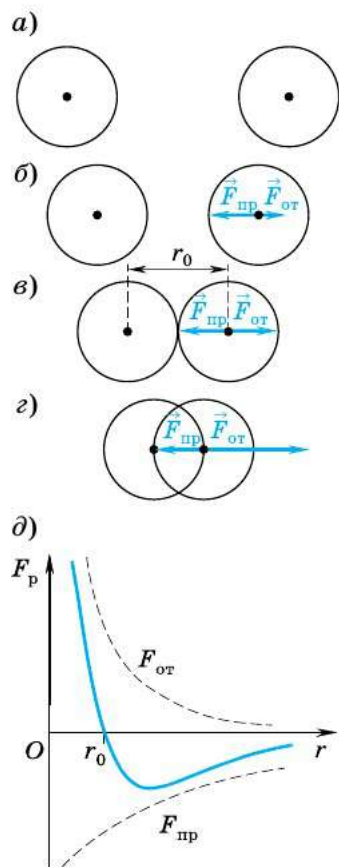


Рис. 78

<sup>1</sup> Чтобы не загромождать рисунок, силы показаны только у одного атома.

силы межмолекулярного взаимодействия  $F_p$  от расстояния  $r$  между центрами атомов. Принято считать силы отталкивания положительными, а силы притяжения — отрицательными. По графику видно, что при  $r \rightarrow \infty$  сила взаимодействия стремится к нулю ( $F_p \rightarrow 0$ ). При  $r > r_0$  равнодействующей силой является сила притяжения, причём сначала её модуль возрастает, а затем уменьшается. На расстоянии  $r = r_0$  равнодействующая сила равна нулю. При  $r < r_0$  равнодействующей становится сила отталкивания, её модуль при уменьшении расстояния возрастает.

Таким образом, взаимодействие между атомами носит следующий характер.

1. Начинает заметно проявляться на расстояниях порядка двух-трёх диаметров атомов.
2. Одновременно действуют и силы притяжения, и силы отталкивания.
3. Существует некоторое расстояние  $r_0$ , примерно равное сумме радиусов атомов, на котором силы притяжения равны силам отталкивания.
4. На расстояниях  $r > r_0$  силы притяжения больше сил отталкивания, поэтому равнодействующей сил межмолекулярного взаимодействия является сила притяжения, а на расстояниях  $r < r_0$  равнодействующей является сила отталкивания.

## Вопросы для самопроверки

1. Какие наблюдения и опыты подтверждают, что молекулы взаимодействуют друг с другом?
2. На каких расстояниях между молекулами проявляются силы притяжения, а на каких — силы отталкивания?
3. Объясните, почему газы принимают форму и объём сосуда, в котором они находятся. Почему жидкости принимают форму сосуда, но имеют собственный объём? Почему твёрдые тела имеют собственную форму?

## Упражнение 17

1. В чём сходство явлений спаивания и склеивания деталей?
2. Почему не соединяются осколки разбитой тарелки, если их сложить и прижать друг к другу? Почему при склеивании их соединение будет достаточно прочным?
3. Как объяснить хорошую сжимаемость газов и плохую — жидкостей и твёрдых тел?
4. Объясните явления смачивания и несмачивания жидкостью поверхности твёрдого тела.



1. Какие повседневные наблюдения свидетельствуют о том, что кажущееся непрерывным состоит из отдельного, дискретного, а какие — не подтверждают это?
2. Что вы считаете естественным в идеях молекулярно-кинетической теории строения вещества, а что кажется странным и маловероятным? Обоснуйте свою точку зрения.



## Самоконтроль

Выполните в рабочей тетради тренировочный тест 3.

## За страницами учебника

### Потенциальная энергия взаимодействия молекул

Атомы и молекулы, так же как и любые взаимодействующие тела, обладают потенциальной энергией. По графику зависимости силы взаимодействия между атомами от расстояния между их центрами (см. рис. 78, *д*) можно построить график зависимости потенциальной энергии  $E_{\text{п}}$  взаимодействия атомов от расстояния между ними (рис. 79).

При бесконечно большом расстоянии между частицами ( $r \rightarrow \infty$ ) потенциальная энергия их взаимодействия стремится к нулю. При уменьшении расстояния между молекулами от бесконечности до  $r_0$  преобладает сила притяжения, которая совершает положительную работу (молекулы сближаются). Соответственно кинетическая энергия молекул увеличивается, а потенциальная уменьшается (в замкнутой системе в отсутствие трения изменение кинетической энергии равно изменению потенциальной энергии с обратным знаком).

Наименьшее значение потенциальная энергия имеет на расстоянии  $r_0$ , на котором равнодействующая сил взаимодействия между молекулами равна нулю. В этом случае взаимодействующие молекулы находятся в состоянии устойчивого равновесия,

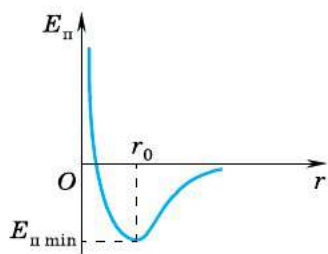


Рис. 79



которому и соответствует минимальное значение потенциальной энергии  $E_{п\ min}$ . Потенциальная энергия в состоянии равновесия характеризует прочность связи частиц. Её значение показывает, какую работу нужно совершить, чтобы «разорвать» связи между частицами.

**Принцип минимума потенциальной энергии** является общенаучным принципом, справедливым для всех физических явлений. Он формулируется так:

**любая замкнутая система стремится к состоянию с минимумом потенциальной энергии.**

Примерами этого могут служить колебания маятника, движение шарика по вогнутой поверхности, свободное падение тела и др. (Проанализируйте эти примеры самостоятельно.)

При дальнейшем уменьшении расстояния между молекулами ( $r < r_0$ ) потенциальная энергия возрастает, поскольку равнодействующей сил взаимодействия между молекулами является сила отталкивания. Эта сила совершает отрицательную работу, что ведёт к уменьшению кинетической энергии и увеличению потенциальной.

От соотношения между средней кинетической энергией движения молекул вещества и потенциальной энергией их взаимодействия зависит агрегатное состояние вещества. Так, если потенциальная энергия взаимодействия молекул много больше их средней кинетической энергии, вещество находится в твёрдом состоянии. Если средняя кинетическая энергия движения частиц и потенциальная энергия их взаимодействия сравнимы, то вещество существует в жидком состоянии. Если потенциальная энергия взаимодействия молекул много меньше средней кинетической энергии их движения, то вещество находится в газообразном состоянии.

## Вопросы для самопроверки

1. Как связано агрегатное состояние вещества с соотношением между средней кинетической энергией движения молекул и потенциальной энергией их взаимодействия?
2. Покажите на примерах, что принцип минимума потенциальной энергии является общенаучным принципом.



## Основное в главе

1. В основе молекулярно-кинетической теории строения вещества лежат следующие положения.

1. Все тела (макроскопические системы) состоят из частиц (молекул, атомов, ионов), между которыми есть промежутки. Существование молекул подтверждается их непосредственным наблюдением с помощью электронного и ионного микроскопов. Основные характеристики молекул: масса, размеры, скорости — определены в настоящее время достаточно точно. Они имеют следующие значения по порядку величины: диаметр  $10^{-10}$  м; масса  $10^{-26}$  кг; скорости (для газов)  $10^2$  м/с.

2. Частицы вещества находятся в непрерывном хаотическом движении, называемом тепловым. Положение и скорость каждой молекулы в данный момент времени случайны, однако перемещения и скорости всех частиц системы подчиняются статистическим законам.

3. Частицы вещества (молекулы и атомы) взаимодействуют между собой. Взаимодействие имеет электромагнитную природу и проявляется в притяжении и отталкивании частиц. Равенству сил притяжения и отталкивания соответствует минимальное значение потенциальной энергии взаимодействия частиц системы.

2. Положения молекулярно-кинетической теории строения вещества обоснованы экспериментально (табл. 15).

Таблица 15

<i>Цель эксперимента</i>	<i>Результат</i>
Определение размеров молекул	$d \approx 10^{-10}$ м
Изучение движения молекул (опыты Броуна)	Средний квадрат проекции перемещения броуновской частицы на ось $Ox$ прямо пропорционален времени, за которое происходит это перемещение
Измерение скоростей движения молекул (опыт Штерна)	Существует определённое распределение молекул по скоростям. Большинство молекул имеют скорости, близкие к наиболее вероятной

### 3. Основные величины (табл. 16).

Таблица 16

Величина	Обозначение	Единица	Определение	Формула
Относительная молекулярная масса	$M_r$		Величина, равная отношению массы молекулы данного вещества к $^{12}_6\text{C}$ массы атома углерода $^{12}_6\text{C}$	$M_r = \frac{m_0}{\frac{1}{12}m_{0\text{C}}}$
Количество вещества	$\nu$	моль	Величина, равная отношению числа молекул или атомов в данном теле к числу атомов в 0,012 кг углерода $^{12}_6\text{C}$ (к постоянной Авогадро)	$\nu = \frac{N}{N_A}; \nu = \frac{m}{M}$
Молярная масса	$M$	кг/моль	Масса количества вещества 1 моль	$M = M_r \cdot 10^{-3};$ $M = \frac{m}{\nu};$ $M = N_A m_0$
Концентрация	$n$	$\text{м}^{-3}$	Число молекул в единице объёма	$n = \frac{N}{V}$

### 4. Основные физические постоянные (табл. 17).

Таблица 17

Название	Обозначение	Определение	Значение	Формула
Постоянная Лошмидта	$L$	Число молекул газа в единице объёма	$2,68 \cdot 10^{25} \text{ м}^{-3}$	$L = \frac{N}{V}$
Постоянная Авогадро	$N_A$	Число молекул или атомов в количестве вещества 1 моль	$6,02 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$	$N_A = \frac{N}{\nu}$



## Основные понятия и законы термодинамики

*Ядро термодинамики составляют три закона (или, как их иначе называют, начала). Некоторое представление об этих законах вы уже имеете. В этой главе знания о законах термодинамики будут расширены.*

### § 25. История развития и становления термодинамики

**1. Сохранение энергии в тепловых процессах.** Ядром термодинамики является закон сохранения энергии в тепловых процессах, или первый закон термодинамики, который был установлен в середине XIX в.

Идея сохранения энергии высказывалась ещё в древности. В частности, Демокриту принадлежат слова: «Ничто не возникает из небытия и не разрешается в небытие». Догадки античных учёных получили научное обоснование в XVII в. в период триумфа классической механики. Так, Галилей, открыв закон инерции, установил неуничтожимость механического движения. Французский учёный **Рене Декарт** (1596—1650) ввёл понятие количества движения — импульса тела ( $mv$ ) в качестве меры движения и сформулировал закон сохранения импульса. Он, однако, считал, что сохраняется арифметическая сумма импульсов всех тел системы. Следующий шаг был сделан Гюйгенсом, который, считая импульс векторной величиной, показал, что сохраняется геометрическая сумма импульсов тел, входящих в систему, и ввёл в качестве меры движения ещё одну величину  $mv^2$ . Гюйгенс показал, что при абсолютно упругом ударе шаров сохраняется величина  $mv^2$ .

Идеи Гюйгенса получили своё развитие в работах немецкого учёного **Готфрида Лейбница** (1646—1716), который считал величину  $mv^2$  универсальной мерой движения и назвал её «живой силой». Под «живой силой» он понимал то, что сейчас называют кинетической энергией. Лейбниц первым объяснил остановку движущегося тела передачей механической энергии («живой силы») мельчайшим частицам вещества.

Понятие энергии впервые было введено в науку английским учёным **Томасом Юнгом** (1773—1829) в 1807 г.

С историей становления закона сохранения энергии в механике связано создание вечного двигателя, т. е. машины, которая совершала бы полезную работу без затрат энергии извне. Однако ни один из проектов вечного двигателя не был реализован.

Дальнейшее развитие закона сохранения энергии применительно ко всем видам движения материи связано с выявлением природы тепловых явлений и установлением равенства количества теплоты и совершённой работы. Так, немецкий врач **Роберт Майер** (1814—1878) обобщил большое число фактов и экспериментальных данных и пришёл к выводу о существовании разных видов энергии: кинетической, потенциальной, внутренней и химической.

Майер высказал мысль о том, что «все формы движения материи могут быть измерены одной мерой, а различные формы движения материи едины, так как они являются формами движения одной и той же материи». Он говорил и о том, что различные формы движения материи могут превращаться друг в друга по определённым законам. При изменении формы движения количество энергии сохраняется.

Майер показал, что при затрате определённого количества теплоты совершается вполне определённая механическая работа и наоборот. Величину, показывающую, какая работа совершается при затрате количества теплоты, равного одной калории (1 кал = = 4,19 Дж), называют *механическим эквивалентом теплоты*. Эта величина равна 4,19 Дж/кал.

**2. Опыт Джоуля.** Английский физик **Джеймс Джоуль** (1818—1889) экспериментально исследовал процессы превращения энергии. В 1848 г. он опубликовал описание проведённых им экспериментов. Схема его установки приведена на рисунке 80. Барабан приводился во вращение падающими грузами. На ось барабана насажена крыльчатка, которая вращается в калориметре с водой. Вода вследствие трения нагревается. Зная массу и температуру воды, массу грузов и высоту их падения, можно найти значения

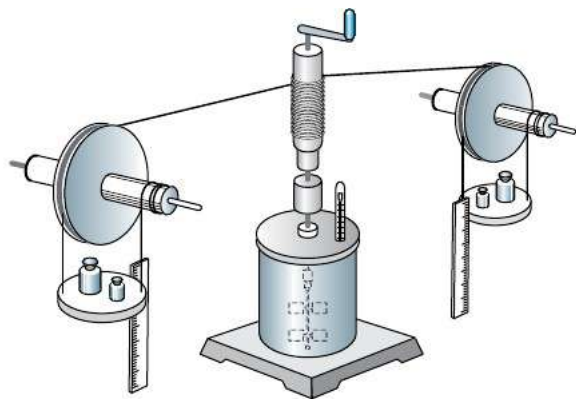


Рис. 80

работы и количества теплоты и их отношение  $\left(\frac{A}{Q}\right)$ . Это отношение получилось равным 4,2 Дж/кал. Таким образом, Джоуль экспериментально установил закон сохранения энергии. Математически закон сохранения энергии обосновал немецкий учёный **Герман Гельмгольц** (1821—1894).

Окончательное установление закона сохранения энергии связано с именами Майера, Джоуля, Гельмгольца, которые подтвердили, что движение превращается из одной формы в другую. Количественной мерой различных форм движения, сохраняющейся при их превращениях, является энергия.

**3. Зарождение термодинамики как теории.** В середине XVIII в. были изобретены паровые машины и началось их внедрение. При этом встала задача повышения их КПД, т. е. получения максимальной работы при наименьших затратах топлива. Эта проблема была проанализирована французским физиком **Сади Карно** (1796—1832). Именно им были сформулированы законы термодинамики, и термодинамика получила своё начало как научная физическая теория.

Первый закон термодинамики утверждает, что невозможно совершить работу только за счёт внутренней энергии, т. е. создать вечный двигатель первого рода.

Карно показал, что если исходить из этой идеи, то для получения работы необходимо иметь в машине два тела с разной температурой: нагреватель и холодильник. Работа, которую совершает машина, ограничена температурой нагревателя и холодильника и не зависит от рода рабочего тела. Следствием этого положения яв-

ляется утверждение о невозможности создания двигателя без холодильника, т. е. вечного двигателя второго рода (одна из формулировок второго закона термодинамики).

## Вопросы для самопроверки

1. Какие выводы были сделаны Майером относительно энергии и её превращений?
2. В чём заключался опыт Джоуля? Каковы цель опыта и его результаты?
3. Какие идеи были изложены Карно в его работах?
4. Что представляет собой вечный двигатель второго рода?

## § 26. Тепловое равновесие. Температура

**1. Тепловое равновесие.** Ежедневно вы имеете дело с телами, находящимися в различных состояниях, которые характеризуются определёнными параметрами. Например, макроскопические системы: кусок льда, принесённый в комнату, и воздух в комнате имеют разную температуру. Через некоторое время система придёт в другое состояние. В результате теплообмена между льдом и воздухом температура льда повысится, а воздуха несколько понизится, лёд растает, образовавшаяся из него вода нагреется и температура воды станет равной температуре воздуха в комнате.

Говорят, что между водой и воздухом установилось **тепловое**, или **термодинамическое, равновесие**, а эти макроскопические системы (лёд и воздух) составляют **термодинамическую систему**.

**Термодинамическая система** — совокупность макроскопических систем, которые могут обмениваться энергией между собой и с внешними телами.

Если в дальнейшем никаких внешних воздействий на рассматриваемую термодинамическую систему оказано не будет, т. е. не будут включены нагревательные приборы, не откроют окно и дверь и т. п., то состояние теплового равновесия этой системы «вода — воздух» не нарушится. Система в данном случае является теплоизолированной. Термодинамическую систему, не участвующую в теплообмене с окружающими телами, называют **теплоизолированной**.

**Теплоизолированная термодинамическая система с течением времени всегда приходит в состояние теплового равновесия, из которого самопроизвольно выйти не может.**

Это утверждение составляет сущность **закона термодинамического равновесия**.

**Равновесное состояние** характеризуется неизменностью во времени всех термодинамических параметров состояния теплоизолированной системы. Например, если налить в стакан горячую воду и оставить его в комнате, то через некоторое время стакан и вода в нём придут в состояние термодинамического равновесия с воздухом и предметами, находящимися в комнате. При этом температура, давление и объём останутся неизменными сколь угодно долго при отсутствии внешних воздействий.

Если система находится в **неравновесном состоянии**, то, предоставленная самой себе, с течением времени она придёт в равновесное состояние. В дальнейшем вы будете изучать только равновесные системы.

**2. Температура.** Как вам уже известно, термодинамика изучает процессы, происходящие с макроскопическими системами, и их свойства, связанные с превращением энергии.

Среди параметров, характеризующих состояние термодинамической системы, температура является особым параметром.

**Температура** — параметр, характеризующий состояние термодинамического равновесия, её значение во всех частях равновесной системы одинаково.

Это свойство отличает температуру от других параметров состояния, например объёма или давления. Их значения в состоянии теплового равновесия со временем также не изменяются, но не являются одинаковыми во всех частях равновесной системы. Так, если из холодного помещения внести в тёплую комнату пустую стеклянную бутылку, плотно закрытую пробкой, и оставить на некоторое время, то с течением времени температура бутылки, воздуха в ней и температура воздуха в комнате выравняются и температура будет одинаковой и неизменной во времени при отсутствии внешних воздействий. Однако давление воздуха в бутылке будет больше, чем давление воздуха в комнате. Оно будет оставаться таким сколь угодно долго при отсутствии внешних воздействий. Таким образом, если температура одинакова для всех тел термодинамической системы, находящейся в равновесном состоянии, то значения других параметров — давления и объёма — могут быть разными для тел, входящих в систему.

Закон термодинамического равновесия и приведённое определение понятия температуры составляют содержание **нулевого закона термодинамики**.



**3. Измерение температуры.** Сложность измерения температуры заключается в том, что её нельзя сравнить с эталоном, как, например, массу или длину. Поэтому для измерения температуры используют зависимость от неё физических свойств тел: объёма, давления, электрического сопротивления и т. п. Исторически впервые для измерения температуры была использована зависимость объёма жидкости от температуры.

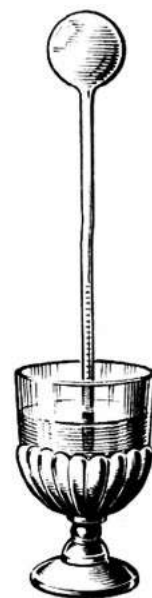
Первый прибор для измерения температуры — термоскоп был сконструирован в 1597 г. Галилеем. Термоскоп Галилея (рис. 81) состоял из стеклянного шарика, наполненного воздухом, и стеклянной трубки, частично заполненной водой. Конец трубки был опущен в сосуд с водой. Когда воздух в шарике расширялся при его нагревании или сжимался при охлаждении, уровень воды в трубке изменялся. Поскольку этот прибор не имел шкалы, то он позволял только сравнивать температуру разных тел и судить о её изменении. Кроме того, при использовании термоскопа Галилея не учитывали, что высота столба жидкости в трубке зависит не только от температуры, но и от атмосферного давления.

Термоскоп Галилея пытались усовершенствовать, однако эти приборы не имели общепринятой шкалы и каждый показывал свою температуру.

Для того чтобы изготовить термометр, необходимо помимо **термометрического тела** — тела, объём которого изменяется при изменении температуры, построить шкалу и отметить на ней **реперные** (опорные, основные) точки. Расстояние между этими точками делят на равные отрезки и ставят соответствующие значения.

Современная температурная шкала Цельсия была предложена в 1742 г. При градуировке этой шкалы используют две реперные точки: температуру таяния льда, которой приписывают  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ , и температуру кипения воды, принятую за  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Интервал между ними делится на 100 равных частей, и одна сотая этого интервала принимается за  $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ . В качестве термометрического тела в зависимости от назначения термометра используются спирт, ртуть и т. п.

Построенная таким образом шкала является достаточно удобной для практических целей, хотя она имеет ряд недостатков. Во-первых, реперные точки выбраны произвольно, так же как произвольным является и деление интервала между ними на 100 ча-



*Рис. 81*

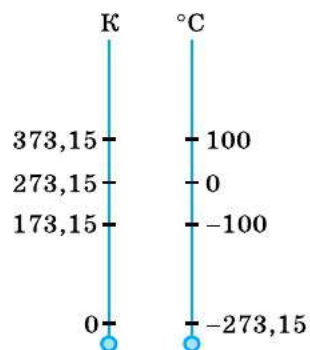


Рис. 82

стей. Во-вторых, при построении шкалы полагают, что объём термометрического тела при изменении температуры изменяется равномерно на всём температурном интервале, однако это не так. В разных температурных интервалах тепловое расширение термометрического тела различно. Подобные недостатки характерны и для шкал Фаренгейта и Реомюра, которые так же, как и шкала Цельсия, являются эмпирическими.

Поэтому возникает необходимость построения температурной шкалы, лишённой этих недостатков.

**4. Термодинамическая температурная шкала.** Термодинамическая (абсолютная) шкала температур строится следующим образом. Выбирается одна реперная точка — *тройная точка воды*, т. е. температура, при которой вода, лёд и пар существуют одновременно. Осуществить такое состояние возможно при строго определённом давлении. Температура тройной точки воды составляет  $0,01\text{ }^\circ\text{C}$ , а давление, при котором она существует, равно  $609\text{ Па}$ .

За нуль термодинамической шкалы температур принята температура  $-273,15\text{ }^\circ\text{C}$  (рис. 82). Эту температуру называют **абсолютным нулём температур**. Интервал между абсолютным нулём и тройной точкой воды делится на  $273,16$  частей, и  $1/273,16$  часть этого интервала представляет собой один кельвин ( $1\text{ К}$ ), т. е. единицу температуры по термодинамической шкале. Обозначается температура по термодинамической шкале буквой  $T$ .

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

Для сравнения на рисунке 82 изображены шкала Цельсия и термодинамическая шкала. Из рисунка видно, что абсолютному нулю соответствует температура  $-273,15\text{ }^\circ\text{C}$ , температуре таяния льда —  $273,15\text{ К}$ , а температуре кипения воды —  $373,15\text{ К}$ .

Соотношение между значениями температуры по шкале Цельсия и по термодинамической шкале выражается формулами:

$$T = t + 273,15;$$

$$t = T - 273,15.$$

Часто величиной  $0,15$  пренебрегают, так как она мала по сравнению с  $273$ , и при решении задач за абсолютный нуль принимают температуру  $-273\text{ }^\circ\text{C}$ .

**5. Абсолютный нуль.** Из курса физики основной школы вы знаете, что средняя кинетическая энергия теплового движения молекул связана с температурой тела: чем больше средняя кинетическая энергия движения молекул, тем выше температура тела. Действительно, при переходе термодинамической системы к состоянию термодинамического равновесия происходит выравнивание температуры тел системы и средней кинетической энергии входящих в их состав частиц. Средняя кинетическая энергия движения молекул тела прямо пропорциональна его термодинамической температуре:

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

где  $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К.

Смысл коэффициента пропорциональности  $k$  будет раскрыт позже.

Из записанного равенства следует, что чем меньше температура тела, тем меньше скорость теплового движения составляющих его частиц. Очевидно, что при термодинамической температуре, равной нулю, в нуль обращается и средняя кинетическая энергия, и средняя скорость теплового движения частиц.

Таким образом, **абсолютный нуль** — это такая температура, при которой прекращается тепловое движение частиц, составляющих тело<sup>1</sup>.

## Вопросы для самопроверки

1. Какое состояние называют состоянием теплового равновесия?
2. Чем температура как параметр состояния теплового равновесия отличается от других параметров?
3. Как строятся эмпирические температурные шкалы? В чём их недостаток?
4. Как строится термодинамическая шкала температур? Какие точки выбраны на ней в качестве реперных?
5. Как связана средняя кинетическая энергия теплового движения молекул с термодинамической температурой?

---

<sup>1</sup> При абсолютном нуле прекращается тепловое движение молекул и атомов. Однако при этой температуре частицы, входящие в состав молекул и атомов, совершают так называемые нулевые колебания. Особенность этих колебаний заключается в том, что энергию, которой обладают частицы, нельзя передать.



1. Раскройте понятие температуры с точки зрения термодинамики и с точки зрения молекулярно-кинетической теории строения вещества. Покажите связь термодинамической и молекулярно-кинетической трактовок понятия «температура».
2. Чему равна температура кипения спирта по термодинамической шкале, если она составляет  $78\text{ }^{\circ}\text{C}$ ?
3. Температура вещества в недрах Земли на расстоянии  $100\text{ км}$  от её поверхности равна  $1200\text{ К}$ . Чему равна эта температура по шкале Цельсия?
4. Определите температуру газа, если средняя кинетическая энергия теплового движения его молекул  $8,1 \cdot 10^{-21}\text{ Дж}$ .
- 5\*. Рассчитайте и сравните между собой средние квадратичные скорости теплового движения при  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  молекул водорода ( $m = 3,3 \cdot 10^{-27}\text{ кг}$ ), кислорода ( $m = 5,3 \cdot 10^{-26}\text{ кг}$ ) и азота ( $m = 46,5 \cdot 10^{-27}\text{ кг}$ ).

## Вопросы для дискуссии

Достигим ли абсолютный ноль температуры?

## § 27. Внутренняя энергия макроскопической системы

**1. Понятие внутренней энергии.** Понятие внутренней энергии вам известно из курса физики основной школы. Вспомним его. Макроскопические тела состоят из движущихся и взаимодействующих частиц: молекул, атомов, ионов. В свою очередь, атомы и ядра атомов тоже состоят из движущихся и взаимодействующих частиц.

Движущиеся тела обладают кинетической энергией, следовательно, частицы вещества тоже обладают кинетической энергией.

Взаимодействующие тела обладают потенциальной энергией. Поскольку частицы вещества взаимодействуют между собой, то они обладают потенциальной энергией.

Следовательно, частицы, из которых состоят макроскопические тела, обладают кинетической и потенциальной энергией, их сумма и есть **внутренняя энергия** макроскопической системы.

**Внутренней энергией  $U$  макроскопической системы называют физическую величину, равную сумме кинетической энергии теплового движения составляющих его частиц (молекул, атомов, ионов) и потенциальной энергии их взаимодействия.**

Единицей внутренней энергии, как и механической энергии, в СИ является *джоуль* (Дж).

К внутренней энергии относят и энергию движения и взаимодействия частиц, входящих в состав атомов и ядер вещества. Однако в молекулярной физике имеют дело с процессами, которые происходят при не слишком высоких температурах и не связаны с превращением вещества. В этих процессах внутриатомная и ядросферная энергия не изменяется.

Внутренняя энергия тела зависит от его состояния, т. е. является функцией состояния, и определяется однозначно параметрами  $p, V, T$ . Это значит, что тело, находясь в состоянии с данными значениями параметров, имеет одно и только одно значение внутренней энергии. При изменении состояния тела изменяется значение внутренней энергии.

Как вам известно, кинетическая энергия тела прямо пропорциональна квадрату его скорости. Поскольку молекулы имеют разные скорости и, следовательно, разные кинетические энергии, то их совокупность характеризуется средней кинетической энергией, которая прямо пропорциональна среднему квадрату скорости движения молекул:

$$\overline{E}_k = \frac{m_0 \overline{v^2}}{2}.$$

Так как температура тела прямо пропорциональна средней кинетической энергии составляющих его частиц, то внутренняя энергия тела зависит от его температуры, и об изменении внутренней энергии можно судить по изменению температуры тела.

Внутренняя энергия тела зависит и от его агрегатного состояния. Так, она больше у стоградусного пара, чем у воды такой же массы при той же температуре. Это объясняется различием потенциальных энергий взаимодействия молекул пара и воды.

На значение внутренней энергии влияет и деформация тела: у деформированного тела она больше, чем у недеформированного.

Следует иметь в виду, что внутренняя энергия тела не зависит от его движения как целого и от его положения в пространстве. Так, значения внутренней энергии у шарика, лежащего на полу и поднятого на некоторую высоту, одинаковы при одинаковых прочих условиях (температуре, деформации и пр.).

Теперь к параметрам состояния макроскопической системы можно добавить и внутреннюю энергию. Внутренняя энергия так же, как температура, давление и объём, *характеризует состояние макроскопической системы*.

**2. Способы изменения внутренней энергии.** Возникает вопрос, как определить внутреннюю энергию тела. Эту задачу можно

решить лишь для простейших макроскопических систем, и несколько позже вы научитесь это делать. В большинстве же случаев рассчитать внутреннюю энергию системы невозможно, так как для этого потребовалось бы знать энергию движения и взаимодействия каждой молекулы.

Вспомните, при изучении теоремы об изменении кинетической энергии отмечалось, что обычно нас интересует не само значение кинетической энергии, а её изменение. Это связано с необходимостью знать, какую работу может совершить тело за счёт имеющейся у него энергии. Значение совершённой работы равно изменению энергии тела.

Из курса физики основной школы вы знаете, что внутреннюю энергию макроскопической системы можно изменить в процессе совершения работы или путём теплопередачи.

Если взять монету и потереть её о поверхность стола, то через некоторое время можно ощутить, что температура монеты повысилась, следовательно, увеличилась её внутренняя энергия. На ощупь можно определить повышение температуры гвоздя, забиваемого молотком.

Внутренняя энергия системы уменьшается, когда она сама совершает работу. Если на дно толстостенного стеклянного сосуда налить немного воды и закрыть сосуд пробкой, а затем накачивать в него воздух, то при некотором давлении накачанного воздуха пробка из сосуда вылетит. В сосуде при этом образуется туман, который хорошо виден (рис. 83). Пробка вылетела из сосуда под действием избыточного по сравнению с атмосферным давлением воздуха в нём. При этом воздух совершил механическую работу за счёт своей внутренней энергии. Об уменьшении внутренней энергии свидетельствует понижение температуры воздуха в сосуде и как следствие этого — образование тумана.

Внутреннюю энергию можно изменить, не совершая работу. Например, внутренняя энергия воздуха в комнате и всех предметов, находящихся в ней, будет увеличиваться, если при закрытых окнах и дверях включить батареи парового отопления или затопить печь. Если опустить в горячую воду ложку, то температура ложки повысится, а температура воды — понизится. В этом случае изменение внутренней энергии макроскопических тел происходит без совершения работы в процессе **теплопередачи**.



Рис. 83



**Теплопередачей** называют способ изменения внутренней энергии тела, при котором происходит передача энергии от одной части тела к другой или от одного тела к другому без совершения работы.

При теплопередаче не происходит превращения энергии из одного вида в другой, как при совершении работы. Этот процесс характеризуется передачей энергии от более нагретого тела к менее нагретому. Как вам известно, существует три вида теплопередачи: *теплопроводность, конвекция и излучение.*

**3. Количество теплоты. Удельная теплоёмкость вещества.** Мерой изменения внутренней энергии в процессе теплопередачи является **количество теплоты**. Количество теплоты обозначается буквой  $Q$ , единица количества теплоты в СИ — *джоуль (Дж)*.

Количество теплоты  $Q$ , полученное телом массой  $m$  в процессе теплопередачи, рассчитывается по формуле:

$$Q = cm(T_2 - T_1),$$

где  $c$  — удельная теплоёмкость вещества,  $T_1$  — начальная температура тела,  $T_2$  — его конечная температура.

**Удельной теплоёмкостью** вещества называют физическую величину, равную количеству теплоты, которое нужно сообщить 1 кг вещества, чтобы повысить его температуру на 1 К (1 °С).

Такое же количество теплоты отдаст 1 кг вещества при понижении его температуры на 1 К (1 °С). Единица удельной теплоёмкости в СИ — *джоуль на килограмм-кельвин (Дж/(кг · К))*.

Как следует из формулы для расчёта количества теплоты, если тело в процессе теплопередачи получает энергию, то  $T_2 > T_1$  и  $Q > 0$ ; если тело отдаёт энергию, то  $T_2 < T_1$  и  $Q < 0$ .

Вопросы для самопроверки

1. Дайте определение внутренней энергии макроскопической системы.
2. От чего зависит внутренняя энергия макроскопической системы?
3. От чего не зависит внутренняя энергия макроскопической системы?
4. Как можно изменить внутреннюю энергию тела? Приведите примеры.
5. Дайте определение количества теплоты; удельной теплоёмкости вещества.

## Изменение агрегатных состояний вещества

**1. Испарение.** Вы хорошо знаете, что вещество в земных условиях может находиться в трёх агрегатных состояниях. При изменении внешних условий — температуры, давления — вещества могут переходить из одного агрегатного состояния в другое. Характерной особенностью таких превращений является резкое изменение свойств веществ. Рассмотрим эти переходы подробнее, начнём с перехода жидкость — пар.

**Явление превращения вещества из жидкого состояния в газообразное называют парообразованием.**

Парообразование может осуществляться в виде двух процессов: испарения и кипения.

Испарение происходит с поверхности жидкости при любой температуре. Так, лужи высыхают и при 10 °С, и при 20 °С, и при 30 °С.

**Испарением называют процесс превращения вещества из жидкого состояния в газообразное, происходящий с поверхности жидкости при любой температуре.**

С точки зрения молекулярно-кинетической теории строения вещества испарение жидкости объясняется следующим образом. Молекулы жидкости, участвуя в непрерывном тепловом движении, имеют разные скорости. Наиболее быстрые молекулы, находящиеся на границе поверхности воды и воздуха и имеющие сравнительно большую энергию, преодолевают притяжение соседних молекул и покидают жидкость. Таким образом, над жидкостью образуется пар.

Поскольку из жидкости при испарении вылетают молекулы, обладающие большей внутренней энергией по сравнению с энергией молекул, остающихся в жидкости, то средняя скорость и средняя кинетическая энергия молекул жидкости уменьшаются и, следовательно, уменьшается температура жидкости.

Скорость испарения зависит от рода жидкости. Так, скорость испарения эфира больше, чем скорость испарения воды и растительного масла. Кроме того, скорость испарения зависит от движения воздуха над поверхностью жидкости. Доказательством может служить то, что бельё сохнет быстрее на ветру, чем в безветренном месте при тех же внешних условиях.



Скорость испарения зависит от температуры жидкости. Например, вода при температуре 30 °С испаряется быстрее, чем при 10 °С.

Хорошо известно, что вода, налитая в блюдце, испарится быстрее, чем вода такой же массы, налитая в стакан. Следовательно, скорость испарения зависит от площади поверхности жидкости.

**2. Конденсация.** Молекулы, вылетевшие из жидкости и находящиеся над её поверхностью, участвуют в хаотическом движении. Они сталкиваются с другими молекулами, и в какой-то момент времени их скорости могут быть направлены к поверхности жидкости, и молекулы вернутся обратно в жидкость.

**Процесс превращения вещества из газообразного состояния в жидкое называют конденсацией.**

Процесс конденсации происходит одновременно с процессом испарения.

**3. Кипение.** Второй процесс парообразования — *кипение*. Наблюдать этот процесс можно с помощью простого опыта, нагревая воду в стеклянной колбе. При нагревании воды в ней через некоторое время появляются пузырьки, в которых содержатся воздух и насыщенный водяной пар, образующийся при испарении воды внутри пузырьков. При повышении температуры давление внутри пузырьков растёт, и под действием выталкивающей силы они поднимаются вверх. Однако, поскольку температура верхних слоёв воды меньше, чем нижних, пар в пузырьках начинает конденсироваться, и они сжимаются. Когда вода прогреется по всему объёму, пузырьки с паром поднимаются до поверхности, лопаются, и пар выходит наружу. Вода кипит. Это происходит при такой температуре, при которой давление насыщенного пара в пузырьках равно атмосферному давлению.

**Процесс парообразования, происходящий во всём объёме жидкости при определённой температуре, называют кипением.**

Температуру, при которой жидкость кипит, называют **температурой кипения**. Эта температура зависит от атмосферного давления. При повышении атмосферного давления температура кипения возрастает.

Опыт показывает, что в процессе кипения температура жидкости не изменяется, несмотря на то, что извне поступает энергия. Переход жидкости в газообразное состояние при температуре кипения связан с увеличением расстояния между молекулами и, соответственно, с преодолением притяжения между ними. На совершение работы по преодолению сил притяжения расходуется подво-

димая к жидкости энергия. Так происходит до тех пор, пока вся жидкость не превратится в пар. Поскольку жидкость и пар в процессе кипения имеют одинаковую температуру, то средняя кинетическая энергия молекул не изменяется, увеличивается лишь их потенциальная энергия.

**4. Удельная теплота парообразования.** Для превращения разных веществ из жидкого состояния в газообразное требуется разная энергия. Эта энергия характеризуется величиной, называемой **удельной теплотой парообразования**.

**Удельной теплотой парообразования  $L$**  называют величину, равную количеству теплоты, которое нужно сообщить веществу массой  $1$  кг для превращения его из жидкого состояния в газообразное при температуре кипения.

Единица удельной теплоты парообразования в СИ — *джоуль на килограмм* (Дж/кг).

Рассчитать количество теплоты  $Q$ , которое необходимо сообщить веществу массой  $m$  для его превращения из жидкого состояния в газообразное можно по формуле:

$$Q = Lm.$$

При конденсации пара выделяется некоторое количество теплоты, причём его значение равно значению количества теплоты, которое необходимо затратить для превращения жидкости в пар при той же температуре.

**5. Плавление.** Этот процесс довольно часто встречается не только в природе, но и в быту.

**Плавлением называют процесс превращения вещества из твёрдого состояния в жидкое.**

Наблюдения показывают, что если измельчённый лёд, имеющий, например, температуру  $-10$  °С, оставить в тёплой комнате, то его температура будет повышаться. При  $0$  °С лёд начнёт таять, а температура не будет изменяться до тех пор, пока весь лёд не превратится в жидкость. Далее температура образовавшейся из льда воды будет повышаться.

Это означает, что кристаллические тела, к которым относится и лёд, плавятся при определённой температуре, которую называют **температурой плавления**. Важно, что во время процесса плавления температура кристаллического вещества и образовавшейся в процессе его плавления жидкости остаётся неизменной.

В описанном выше опыте лёд получал некоторое количество теплоты, его внутренняя энергия увеличивалась за счёт увеличения

средней кинетической энергии движения молекул. Затем он плавился, его температура при этом не менялась, хотя лёд получал некоторое количество теплоты. Значит, его внутренняя энергия увеличивалась, но не за счёт кинетической, а за счёт потенциальной энергии взаимодействия молекул. Получаемая извне энергия расходуется на разрушение кристаллической решётки. Подобным образом происходит плавление любого кристаллического тела.

Аморфные вещества не имеют определённой температуры плавления. При повышении температуры они постепенно размягчаются, пока не превратятся в жидкость.

**6. Кристаллизация.** Вам хорошо известен процесс, обратный плавлению.

**Процесс перехода вещества из жидкого состояния в твёрдое называют кристаллизацией.**

Охлаждаясь, жидкость будет отдавать некоторое количество теплоты окружающему воздуху. При этом будет уменьшаться её внутренняя энергия за счёт уменьшения средней кинетической энергии молекул. При определённой температуре начнётся процесс кристаллизации. Во время этого процесса температура вещества не будет изменяться, пока всё вещество не перейдёт в твёрдое состояние. Этот переход сопровождается выделением определённого количества теплоты и, соответственно, уменьшением внутренней энергии вещества за счёт уменьшения потенциальной энергии взаимодействия его молекул.

Таким образом, переход вещества из жидкого состояния в твёрдое происходит при определённой температуре, называемой **температурой кристаллизации**. Эта температура остаётся неизменной в течение всего процесса кристаллизации. Она равна температуре плавления этого вещества при неизменном внешнем давлении.

**7. Удельная теплота плавления.** Различные кристаллические вещества имеют разное строение. Соответственно, для того чтобы разрушить кристаллическую решётку твёрдого тела при температуре его плавления, необходимо сообщить ему разное количество теплоты.

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

Опыт показывает, что удельная теплота плавления данного вещества равна удельной теплоте кристаллизации. Удельную теплоту плавления обозначают буквой  $\lambda$ . Единица удельной теплоты плавления в СИ — Дж/кг.

Количество теплоты  $Q$ , необходимое для плавления вещества массой  $m$ , взятого при температуре плавления, рассчитывается по формуле:

$$Q = \lambda m.$$

Эта же формула используется при вычислении количества теплоты, выделяющегося при кристаллизации жидкости.

### Вопросы для самопроверки

1. Какой процесс называют парообразованием; конденсацией; плавлением; кристаллизацией?
2. Каковы сходство и различия процессов испарения и кипения?
3. Что характеризует удельная теплота парообразования; плавления; конденсации; кристаллизации?
4. Какие превращения энергии происходят при парообразовании и конденсации; при плавлении и кристаллизации?

---

### Упражнение 19

1. В латунном сосуде массой 650 г находится 400 г воды и 100 г льда при температуре  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Чему равна масса стогоградусного водяного пара<sup>1</sup>, который нужно впустить в воду, чтобы лёд растаял и вода нагрелась до  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ ? Удельная теплота парообразования воды  $2,3 \cdot 10^6$  Дж/кг, удельная теплота плавления льда  $3,3 \cdot 10^5$  Дж/кг, удельная теплоёмкость воды  $4,2 \cdot 10^3$  Дж/(кг·К), удельная теплоёмкость латуни 400 Дж/(кг·К).
2. Медный закрытый сосуд массой 1,5 кг содержит 10 кг льда при температуре  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ . В сосуд впускают водяной пар при температуре  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ , при этом в сосуде устанавливается температура  $35\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Чему равна масса пара, введённого в сосуд? Удельная теплоёмкость льда  $2,1 \cdot 10^3$  Дж/(кг·К), удельная теплоёмкость меди 380 Дж/(кг·К).
3. В сосуде находится 0,5 л воды и 300 г льда при температуре  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ . После того как в сосуд впустили 90 г водяного пара при температуре  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ , в нём установилась температура смеси  $33\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Определите теплоёмкость<sup>2</sup> сосуда.
4. В стеклянный стакан массой 120 г, имеющий температуру  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ , налили 200 г горячей воды при температуре  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Через 6 мин температура воды в стакане стала равной  $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Предполагая, что потеря энергии происходит равномерно, определите количество теплоты, которое теряется каждую минуту. Удельная теплоёмкость стекла 830 Дж/(кг·К).

<sup>1</sup> В задачах считать, что пар взят при нормальном атмосферном давлении, если нет специальных оговорок.

<sup>2</sup> Теплоёмкость  $C$  — произведение массы тела и удельной теплоёмкости.

## § 28. Работа в термодинамике

**1. Работа при изменении объёма газа.** Внутреннюю энергию макроскопической системы можно изменить не только путём теплопередачи, но и совершив работу. Получим формулу для вычисления работы, совершаемой макроскопической системой. Для этого рассмотрим простейшую систему — газ, который может расширяться или сжиматься, но как целое он не перемещается.

Пусть в горизонтально расположенном цилиндре под поршнем, который может перемещаться без трения, находится сжатый газ (рис. 84). В этом состоянии газ имеет объём  $V_1$  и давление  $p$ . Если предоставить поршню свободу, то газ расширится и передвинет поршень. Предположим, что поршень совершит такое малое перемещение, при котором изменением давления можно пренебречь. Тогда объём газа станет равным  $V_2$ , а давление останется прежним.

При расширении газ перемещается на расстояние  $l - l_0 = \Delta l$  под действием силы давления  $\vec{F}$ . Работа, которую совершает газ, равна произведению модуля вектора силы  $F$  и модуля вектора перемещения  $\Delta l$ :  $A = F\Delta l$ . При этом считаем, что сила давления газа на поршень  $F$  постоянна и равна произведению давления  $p$  на площадь  $S$  поршня, т. е.  $F = pS$ . Тогда  $A = pS\Delta l$ . Произведение  $S\Delta l$  — изменение объёма газа:  $\Delta V = S\Delta l$ , поэтому

$$A = p\Delta V.$$

Таким образом,

**работа газа при неизменном давлении равна произведению его давления и изменения объёма.**

Если газ расширяется, то его объём увеличивается,  $\Delta V > 0$  и работа газа — величина положительная ( $A > 0$ ). Если газ сжимается ( $\Delta V < 0$ ), то работа газа отрицательная ( $A < 0$ ). Если при изменении состояния газа его объём остаётся постоянным, то изменение объёма равно нулю ( $\Delta V = 0$ ) и работа газа тоже равна нулю ( $A = 0$ ).

При сжатии газа сила давления  $\vec{F}'$ , действующая на газ со стороны поршня (рис. 85), равна по модулю и направлена

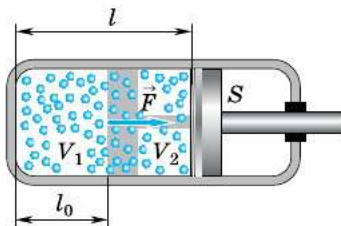


Рис. 84

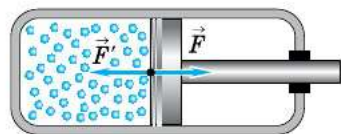


Рис. 85

противоположно силе  $\vec{F}$ , действующей со стороны газа на поршень:  $\vec{F}' = -\vec{F}$ . Следовательно, работа  $A'$ , совершаемая над газом внешними телами, равна работе газа  $A$  с противоположным знаком:  $A' = -A$ ;  $A' = -p\Delta V$ .

При сжатии газа ( $V_2 < V_1$ ) работа внешних сил положительна ( $A' > 0$ ), при расширении газа ( $V_2 > V_1$ ) работа внешних сил отрицательна ( $A' < 0$ ).

Полученная формула для вычисления работы макроскопической системы справедлива при любых изменениях объёма газа при постоянном давлении.

**2. Графическое представление работы.** Работу газа для случая постоянного давления можно представить графически. Построим график зависимости давления газа от его объёма. Поскольку давление газа не изменяется, то графиком будет прямая линия, параллельная оси абсцисс (рис. 86, а).

Работа газа равна произведению давления газа и изменения его объёма:

$$A = p\Delta V.$$

На графике этому произведению численно равна площадь прямоугольника, ограниченного графиком  $p = \text{const}$ , осью  $V$  и перпендикулярами, восставленными к оси абсцисс в точках  $V_1$  и  $V_2$ :

$$A = p\Delta V = p(V_2 - V_1).$$

Если давление газа не остаётся постоянным (рис. 86, б), то для вычисления работы необходимо разбить процесс изменения состояния газа на элементарные процессы, происходящие при неизменном давлении. После этого следует вычислить значения элементарной работы, которые численно равны площадям прямоугольников, а затем все их сложить. Суммарная работа будет и в этом случае равна площади фигуры, ограниченной графиком зависимости давления от объёма, осью абсцисс и перпендикулярами, восставленными к оси абсцисс в точках  $V_1$  и  $V_2$ .

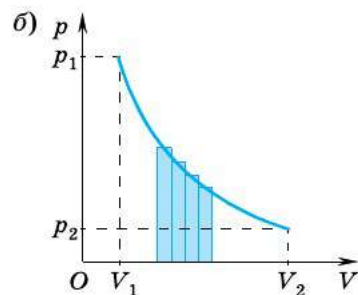
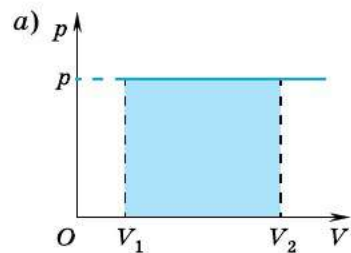


Рис. 86

## Вопросы для самопроверки

1. Как вычислить работу газа при постоянном давлении?
2. Каковы знаки работы газа при его расширении и сжатии?
3. Каковы знаки работы внешних сил при расширении и сжатии газа?

## Упражнение 20

1. Вычислите работу, которую совершил газ при расширении, если при давлении  $1,5 \cdot 10^5$  Па его объём увеличился с  $0,2 \cdot 10^{-2}$  до  $0,6 \cdot 10^{-2}$  м<sup>3</sup>.
2. По графику (рис. 87) определите работу, совершённую газом при переходе из состояния 1 в состояние 2. Каков знак работы в этом случае?

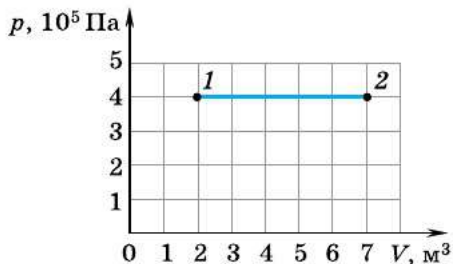


Рис. 87

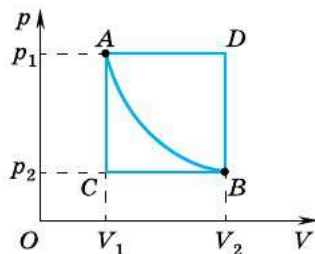


Рис. 88

3. Переход газа из состояния *A* в состояние *B* возможен с помощью трёх процессов, представленных на рисунке 88 графиками: *ACB*, *AB* и *ADB*. При каком из переходов газа из состояния *A* в состояние *B* совершается наибольшая работа? В каком случае работа будет наименьшей?
4. Значения каких физических величин, кроме работы, можно определить как площадь фигуры под графиком?
5. Чему равно давление газа, находящегося под поршнем в цилиндре, если работа, совершённая внешней силой при сжатии газа, равна 30 Дж? Площадь поршня 15 см<sup>2</sup>, перемещение поршня при сжатии 20 см.

## § 29. Первый закон термодинамики

**1. Закон сохранения механической энергии.** Вы уже изучили закон сохранения механической энергии.

Напомним, что если в замкнутой системе действует сила трения, которая является непотенциальной силой (её работа по зам-

кнутой траектории не равна нулю), то механическая энергия системы будет уменьшаться. Так, например, уменьшается механическая энергия автомобиля, движущегося по горизонтальной дороге с выключенным двигателем, о чём свидетельствует уменьшение его скорости. При этом наблюдается нагревание трущихся поверхностей, т. е. увеличение внутренней энергии. В этом примере механическая энергия системы не сохраняется, часть её превращается во внутреннюю энергию.

**2. Первый закон термодинамики.** Напомним, что внутреннюю энергию макроскопической системы можно изменить путём теплопередачи или при совершении работы.

Предположим, что над системой одновременно совершается работа  $A'$  и ей сообщается некоторое количество теплоты  $Q$ . Например, газ, находящийся в цилиндре под поршнем, сжимают и передают ему некоторое количество теплоты. Механическая энергия системы при этом не меняется. Следовательно,

**изменение внутренней энергии системы равно сумме работы, совершённой над системой, и переданного ей количества теплоты.**

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

Это равенство представляет собой **первый закон термодинамики**, или **закон сохранения энергии для тепловых процессов**.

Первый закон термодинамики можно записать иначе, учитывая, что работа внешних сил над системой  $A'$  равна работе системы  $A$  с противоположным знаком:  $A' = -A$ . Получим:

$$\Delta U = -A + Q, \text{ или}$$

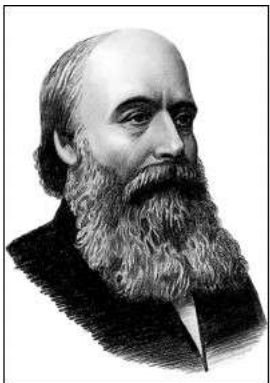
$$Q = \Delta U + A.$$

**Количество теплоты, переданное системе, идёт на совершение системой работы против внешних сил и на увеличение её внутренней энергии.**

**3. Эквивалентность теплоты и работы.** Первый закон термодинамики отражает тот факт, что внутренняя энергия системы может быть изменена как в процессе совершения работы, так и в результате теплопередачи. Работа и количество теплоты являются мерами изменения внутренней энергии системы при разных процессах.

Очевидно, что внутренняя энергия системы может быть изменена на одно и то же значение только при передаче ей некоторого коли-





**Джеймс Прескотт Джоуль** (1818—1889) — английский физик, член Лондонского королевского общества. Известен своими работами в области электромагнетизма, термодинамики, молекулярной теории газов. Одним из первых открыл закон сохранения энергии; экспериментально доказал эквивалентность теплоты и работы; вычислил скорость движения молекул газа и установил её зависимость от температуры; установил наряду с Э. Х. Ленцем закон для определения количества теплоты, выделяемого электрическим током (закон Джоуля — Ленца).

чества теплоты или только при совершении работы без теплообмена. Например, внутренняя энергия газа в цилиндре может быть увеличена на одно и то же значение при его сжатии и при теплообмене.

В этом заключается принцип эквивалентности теплоты и работы, который был доказан в 1843 г. опытами Джоуля и других учёных. Было показано, что за счёт работы 1 Дж внутренняя энергия системы всегда изменяется на столько же, на сколько она изменяется при сообщении ей количества теплоты 0,24 кал<sup>1</sup>.

**4. Невозможность создания вечного двигателя.** Долгое время учёные предпринимали попытки создания вечного двигателя, т. е. такого устройства, которое совершало бы механическую работу только за счёт внутренней энергии, не получая энергии извне. Из первого закона термодинамики следует невозможность создания такого двигателя. Действительно, если к системе не подводят энергию, т. е.  $Q = 0$ , то работа будет совершаться только за счёт внутренней энергии системы, которая с течением времени будет уменьшаться и в конце концов станет равной нулю, и двигатель перестанет работать.

## Вопросы для самопроверки

1. Что является мерой изменения внутренней энергии тела при совершении работы? Когда совершается положительная работа; отрицательная работа?

<sup>1</sup> Калория (1 кал) — внесистемная единица количества теплоты. 1 кал — количество теплоты, необходимое для нагревания воды массой 1 г на 1 °С. 1 кал = 4,19 Дж.

2. Что является мерой изменения внутренней энергии тела при теплопередаче?
3. Сформулируйте первый закон термодинамики.
4. В чём заключается принцип эквивалентности теплоты и работы?

## Упражнение 21

1. Можно ли считать, что первый закон термодинамики является законом сохранения энергии? Ответ поясните.
2. Может ли изменение внутренней энергии системы быть отрицательным?
3. Может ли внутренняя энергия системы остаться неизменной, если она одновременно участвует в теплообмене и совершает работу?
4. Определите изменение внутренней энергии системы, если совершённая ею работа равна 6 Дж, а сообщённое системе количество теплоты 9 Дж.
5. Определите работу внешних сил над системой, если система отдала количество теплоты 3,2 кДж и её внутренняя энергия увеличилась на 2,2 кДж.

## § 30. Второй закон термодинамики

**1. Необратимые процессы.** Вам известно, что при теплообмене тело, имеющее более высокую температуру, отдаёт некоторое количество теплоты и остывает, а тело, имеющее более низкую температуру, получает некоторое количество теплоты и нагревается.

В соответствии с первым законом термодинамики возможен и такой процесс, при котором менее нагретое тело отдаёт некоторое количество теплоты более нагретому телу и ещё сильнее остывает, а тело с большей температурой, в свою очередь, получая некоторое количество теплоты, ещё сильнее нагревается. При этом полная энергия системы сохраняется, если она замкнутая и теплоизолированная. Таким образом, первый закон термодинамики ничего не говорит о направлении процесса теплообмена, т. е. о том, какое тело отдаёт энергию, а какое её получает, и не запрещает самопроизвольную передачу энергии от холодного тела к горячему. Этот запрет накладывает второй закон термодинамики, который содержит утверждение о направленности процессов теплообмена. Прежде чем обсуждать этот закон, рассмотрим понятие **необратимости**.

Итак, при теплообмене энергия переходит от более нагретого тела к менее нагретому. Обратный процесс передачи энергии от хо-

лодного тела к горячему самопроизвольно происходить не может, т. е. теплопередача — необратимый процесс.

Если налить в сосуд раствор медного купороса, а сверху воду, то через некоторое время вследствие диффузии вещества перемешаются и раствор станет однородным. Диффузия произошла самопроизвольно. Обратный процесс, т. е. разделение смеси на вещества, самопроизвольно произойти не может. Диффузия — также пример необратимого процесса.

Ещё одним примером подобного процесса является движение шарика, упавшего на плиту и отскочившего обратно. При этом шарик сам не поднимется на ту же высоту, с которой он упал, поскольку часть механической энергии превратится во внутреннюю энергию воздуха, шарика и плиты. Если бы отсутствовало сопротивление воздуха и удар шарика о плиту был абсолютно упругим, то шарик после удара поднялся бы на прежнюю высоту и его движение было бы обратимым. Итак: *необратимыми являются процессы, обратные которым самопроизвольно не происходят.*

Все реальные процессы необратимы, в том числе и такой, как старение живых организмов.

Возникает вопрос, что нужно сделать, чтобы шарик, ударившись о плиту, поднялся на прежнюю высоту. Очевидно, необходимо иметь источник энергии, от которого шарик с помощью специального устройства передавалась бы энергия, равная энергии, затраченной на совершение работы против сил трения и превратившейся во внутреннюю энергию при деформации шарика и плиты. Иначе говоря, необходимо осуществить более сложный процесс, частью которого являлось бы движение шарика вверх после удара о плиту.

Аналогично можно передать энергию от тела с меньшей температурой телу с более высокой температурой. Однако для этого нужна специальная установка, с помощью которой передавалась бы энергия, т. е. необходимо осуществить более сложный процесс, частью которого являлась бы передача энергии от менее нагретого тела к более нагретому.

**Необратимым называют процесс, обратный которому может протекать лишь как одно из звеньев более сложного процесса.**

**2. Второй закон термодинамики.** Понятие необратимости процессов составляет содержание **второго закона термодинамики**, который указывает направление энергетических превращений в природе. Этот закон имеет несколько эквивалентных формулиро-



вок. Немецкий учёный **Рудольф Юлиус Эмануэль Клаузиус** (1822—1888) сформулировал второй закон термодинамики следующим образом:

**невозможен процесс, единственным следствием которого был бы переход энергии от холодного тела к горячему.**

Из приведённой формулировки следует, что, если процесс передачи энергии от холодного тела к горячему осуществляется, то при этом происходят определённые изменения в окружающих телах. В частности, такой процесс происходит в холодильнике: энергия передаётся от холодильной камеры среде, имеющей более высокую температуру, но этот процесс осуществляется при совершении работы над рабочим телом, и при этом происходят определённые изменения в окружающей среде.

**3. Объяснение необратимости.** Необратимость можно объяснить, зная строение вещества. Так, состояние системы из двух тел с разной температурой — упорядоченное (по значению температуры можно идентифицировать эти тела, средняя кинетическая энергия движения молекул которых так же различна). После того как тела привели в контакт, состояние стало неупорядоченным в том смысле, что значение температуры не позволяет различить эти два тела. Система перешла из упорядоченного состояния в беспорядочное. Беспорядочное состояние характеризуется выравниванием температуры и средней кинетической энергии молекул тел. Это состояние является равновесным. Обратный переход из беспорядочного состояния в упорядоченное сам по себе невозможен.

Вода и медный купорос в сосуде в начальный момент времени находились в упорядоченном состоянии: в нижней части сосуда размещались молекулы медного купороса, в верхней — воды. С течением времени молекулы перемешались и порядок нарушился. Произошло выравнивание плотностей жидкости, т. е. система «медный купорос — вода» также перешла из упорядоченного состояния в неупорядоченное. Обратный переход сам по себе невозможен.

Предположим, что в сосуде, разделённом на две половины перегородкой, находятся два разных газа: например, в левой половине водород, а в правой — кислород (рис. 89). Если убрать перегородку, то газы с течением времени перемешаются. Наступит равновесие: газы будут иметь одинаковую концен-

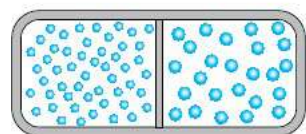


Рис. 89

трацию во всех областях сосуда. Состояние газов в начальный момент времени было упорядоченным, так как в левой половине сосуда находились молекулы одного газа, а в правой — другого. Затем вследствие хаотического движения молекулы газов перемешались: произошёл переход от упорядоченного состояния к беспорядочному. Беспорядочное состояние характеризуется выравниванием концентрации газа и других параметров состояния, ему свойственно отсутствие выделенных областей и направлений. Это состояние — равновесное. И в этом случае система переходит от упорядоченного состояния к беспорядочному. Самопроизвольный обратный переход невозможен.

Таким образом, *система всегда стремится перейти из упорядоченного состояния в неупорядоченное, а самопроизвольный обратный переход невозможен.*

## Вопросы для самопроверки

1. Какой процесс называют необратимым? Приведите примеры необратимых процессов.
2. Являются ли колебания маятника обратимым процессом?
3. Поясните с помощью примера выражение: «Система с течением времени переходит из упорядоченного состояния в неупорядоченное».
4. Может ли система перейти самопроизвольно из неупорядоченного состояния в упорядоченное? В каком случае возможен переход из неупорядоченного состояния в упорядоченное?
5. Сформулируйте второй закон термодинамики.

---

## За страницами учебника

### Статистическое объяснение необратимости

Беспорядочное состояние может быть реализовано большим числом способов, чем упорядоченное. Покажем это.

Пусть в каждой половине сосуда, разделённого перегородкой, находится по четыре молекулы газа. Снимем перегородку. Возникает вопрос, сколькими способами может быть реализовано такое состояние системы, при котором в каждой половине сосуда находится четыре молекулы водорода. Ясно, что только одним. Подсчитаем, сколькими способами может быть реализовано состояние, при котором в левой части сосуда находится три молекулы водорода и одна молекула кислорода. Для этого надо вычислить число

комбинаций из всех молекул, которое соответствует такому распределению молекул. Из четырёх молекул водорода ( $a, b, c, d$ ) выбираем три (либо  $a, b, c$ , либо  $a, c, d$ , либо  $a, b, d$ , либо  $b, c, d$ ), т. е. составляем сочетания по три элемента из четырёх ( $C_4^3$ ). Это число сочетаний равно:

$$C_4^3 = \frac{4 \cdot 3 \cdot 2}{1 \cdot 2 \cdot 3} = 4.$$

В таблице 18 приведены комбинации, соответствующие разным состояниям смеси газов.

**Таблица 18**

Номер состояния	Число молекул в левой части сосуда		Число комбинаций, соответствующих данному состоянию	Процент вероятности
	Молекулы кислорода	Молекулы водорода		
1	4	0	$C_4^4 C_4^0 = 1$	1,4
2	3	1	$C_4^3 C_4^1 = (C_4^1)^2 = 4^2 = 16$	22,9
3	2	2	$C_4^2 C_4^2 = (C_4^2)^2 = 6^2 = 36$	51,4
4	1	3	$C_4^1 C_4^3 = (C_4^1)^2 = 4^2 = 16$	22,9
5	0	4	$C_4^0 C_4^4 = 1$	1,4

Как видно из таблицы, из правой части сосуда может перейти любая из четырёх молекул, содержащихся в ней. Число возможных сочетаний равно:  $C_4^1 = \frac{4}{1} = 4$ .

Общее число комбинаций равно произведению сочетаний:  $C = C_4^3 C_4^1 = (C_4^1)^2 = 16$ .

Аналогично можно вычислить число возможных способов осуществления такого сочетания, когда в левой половине находится две молекулы водорода и две молекулы кислорода. Таких способов 36. Это состояние соответствует неупорядоченному равновесному состоянию системы, поскольку и в той и в другой половине находится одинаковое число молекул водорода и кислорода.

Беспорядочное состояние является наиболее вероятным. Этим и объясняется стремление системы перейти в беспорядочное равновесное состояние и невозможность обратного перехода.

## Вопросы для самопроверки

1. Какое состояние системы — упорядоченное или неупорядоченное — может быть реализовано большим числом способов?
2. Какое состояние системы — упорядоченное или неупорядоченное — является наиболее вероятным?



## Самоконтроль

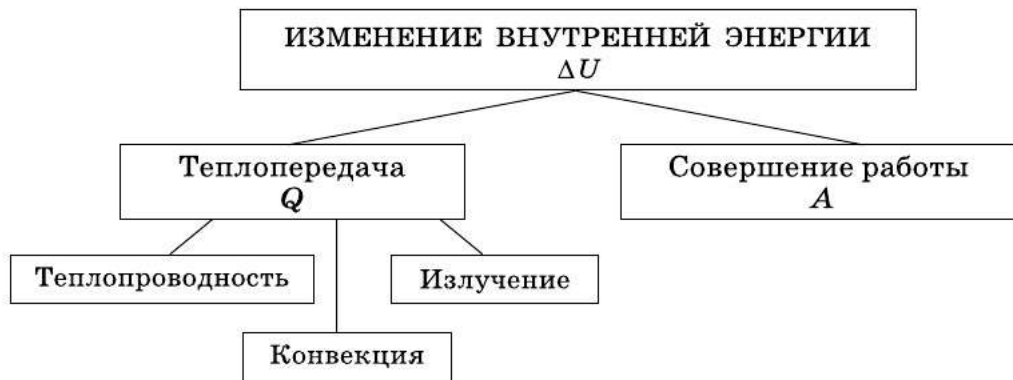
Выполните в рабочей тетради тренировочный тест 4.



### Основное в главе

1. Термодинамический метод изучения тепловых явлений использует следующие основные понятия: макроскопическая система, состояние макроскопической системы, параметры состояния системы, термодинамическая система, термодинамическое равновесие, необратимость. К параметрам состояния макроскопической системы относятся объём, давление, температура, внутренняя энергия.

2. Способы изменения внутренней энергии.



3. Основные величины (табл. 19).

Таблица 19

Величина	Обозначение	Единица	Определение	Формула
Работа в термодинамике	$A$	Дж	При постоянном давлении равна произведению давления и изменения объёма газа	$A = p\Delta V$

Величина	Обозначение	Единица	Определение	Формула
Количество теплоты:	$Q$	Дж	Мера изменения внутренней энергии в процессе теплопередачи	
получаемое телом при нагревании				$Q = cm\Delta T$
необходимое для плавления тела				$Q = \lambda m$
необходимое для превращения жидкости в пар				$Q = Lm$

#### 4. Законы термодинамики (табл. 20).

Таблица 20

Закон	Формулировка	Математическая запись
Нулевой закон термодинамики	Теплоизолированная термодинамическая система с течением времени всегда приходит в состояние теплового равновесия, из которого самопроизвольно выйти не может. Температура — параметр, значения которого одинаковы во всех частях равновесной системы	
Первый закон термодинамики (закон сохранения энергии для тепловых процессов)	Количество теплоты, переданное системе, идёт на совершение системой работы против внешних сил и на увеличение её внутренней энергии	$Q = \Delta U + A$
Второй закон термодинамики (закон, определяющий направление теплообмена)	Невозможен процесс, единственным следствием которого был бы переход энергии от холодного тела к горячему	





## **Свойства газов**

*В двух предыдущих главах были рассмотрены основные понятия и законы теорий, описывающих тепловые явления: молекулярно-кинетической теории строения вещества и термодинамики и соответственно сущность двух методов изучения тепловых явлений: молекулярно-кинетического (статистического) и термодинамического. Применим теперь эти законы и методы к анализу свойств некоторых макроскопических систем.*

*При изучении свойств макроскопических систем будем сначала строить модель системы, т. е. моделировать характер расположения, движения и взаимодействия частиц, из которых состоит та или иная макроскопическая система, затем получим уравнения, описывающие изменение состояния системы, и проверим их экспериментально. Начнём анализ макроскопических систем с самой простой системы — с газа.*

### **§ 31. Давление идеального газа**

**1. Идеальный газ.** Как вы уже знаете, в газах молекулы располагаются на больших по сравнению с их размерами расстояниях друг от друга. Силы притяжения между ними малы, молекулы взаимодействуют, по существу, лишь при столкновениях. Между столкновениями они движутся поступательно. Чтобы построить количественную теорию такого газа, необходимо учесть взаимодействия между молекулами, их размеры и т. п.

Это трудная задача. Поэтому рассмотрим более простую модель, называемую **идеальным газом**.

При построении простейшей модели газа пренебрегают размерами его молекул. Это можно сделать исходя из следующих соображений. В  $1 \text{ м}^3$  газа при нормальных условиях содержится  $2,7 \cdot 10^{25}$  молекул. Линейные размеры молекулы составляют приблизительно  $10^{-10}$  м, объём молекулы равен, следовательно,  $10^{-30} \text{ м}^3$ . Соответственно объём всех молекул в  $1 \text{ м}^3$  газа равен примерно  $10^{-5} \text{ м}^3$  ( $10 \text{ см}^3$ ). Он мал по сравнению с  $1 \text{ м}^3$ . Поэтому размерами молекул газа можно пренебречь по сравнению с размерами сосуда, в котором он находится, и считать молекулы газа материальными точками.

Кроме того, при построении модели газа учитывают, что расстояния между молекулами газа достаточно велики. Так, расстояние между молекулами водяного пара в 12 раз больше, чем между молекулами воды. Поскольку силы притяжения между молекулами довольно быстро убывают с расстоянием, ими при небольших давлениях можно пренебречь.

При столкновениях молекул между ними действуют силы отталкивания. Поскольку время столкновения молекул значительно меньше времени их движения между столкновениями, можно считать, что большую часть времени молекулы движутся, не взаимодействуя между собой.

**Газ, молекулы которого представляют собой материальные точки, не взаимодействующие между собой, называют идеальным.**

Идеальный газ — модель, которая так же, как и любая другая модель, имеет определённые границы применимости. В частности, эта модель неприменима при низких температурах и высоких давлениях.

**2. Давление газа.** Молекулы газа, непрерывно двигаясь, сталкиваются со стенками сосуда, действуя на них с некоторой силой. При ударе о покоящуюся стенку молекула передаёт ей импульс. При этом импульс самой молекулы изменяется.

Давление — параметр макроскопический, т. е. характеризующий макроскопическую систему в целом. Его значение зависит от микроскопических параметров: от массы молекул и скорости их движения.

В разные моменты времени о стенки сосуда ударяется неодинаковое число молекул, поэтому и давление на стенки сосуда будет различно (рис. 90). Вы знаете, что давление газа измеряют манометром. Возникает вопрос, какое значение давления показывает манометр.

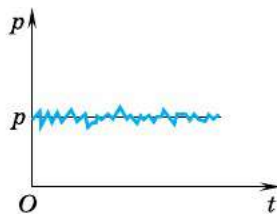


Рис. 90

Поскольку число молекул, действующих на единицу площади стенки, очень велико, а массы молекул малы, то незначительное изменение их числа не будет заметно сказываться на изменении значения давления и регистрироваться манометром. Поэтому манометр будет показывать среднее давление  $p$ , которое имеет вполне определённое значение и при неизменных условиях (массе газа, его объёме и температуре) остаётся постоянным.

**3. Основное уравнение молекулярно-кинетической теории идеального газа.** Давление газа на стенку сосуда создаётся ударами о неё молекул газа, при которых происходит изменение импульсов молекул и стенки. Очевидно, давление газа на стенки сосуда тем больше, чем больший импульс передают молекулы стенке, а импульс молекулы, как вам известно, зависит от массы молекулы  $m_0$  и от скорости её движения  $v$ . Поскольку макроскопическое тело состоит из большого числа молекул и они имеют разные скорости, то в формулу давления входит средний квадрат скорости теплового движения молекул  $\overline{v^2}$ .

Кроме того, чем больше молекул ударяется о стенку сосуда, тем большее давление оказывает газ на неё. Поэтому в формулу давления газа входит концентрация молекул  $n$ , равная числу молекул газа, содержащихся в единице объёма.

Формулу давления идеального газа на стенки сосуда можно вывести математически, однако этот вывод достаточно сложен, поэтому приведём формулу в готовом виде:

$$p = \frac{1}{3} n m_0 \overline{v^2}.$$

Множитель  $\frac{1}{3}$  означает, что все направления движения молекул равноправны, и если выбраны три координатные оси, то вдоль каждой из них в среднем движется одинаковое число молекул и проекции среднего квадрата скорости на координатные оси одинаковы. Таким образом, давление идеального газа на стенки сосуда



прямо пропорционально массе молекул газа, их концентрации и среднему квадрату скорости теплового движения его молекул.

Формулу давления идеального газа на стенки сосуда можно записать в другом виде:

$$p = \frac{2}{3} \frac{nm_0 \overline{v^2}}{2},$$

где  $\frac{m_0 \overline{v^2}}{2} = \overline{E}_k$  — средняя кинетическая энергия молекул газа.

Следовательно,

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

Таким образом,

**давление идеального газа прямо пропорционально средней кинетической энергии теплового движения его молекул и числу молекул в единице объёма.**

Это уравнение называют **основным уравнением молекулярно-кинетической теории идеального газа.**

Полученная формула связывает макроскопический параметр состояния газа — давление, которое может быть измерено манометром, с микроскопическими параметрами — массой молекул и средним квадратом скорости (средней кинетической энергией) их теплового движения.

Вопросы для самопроверки

1. Какой газ называют идеальным?
2. Почему при построении модели «идеальный газ» можно пренебречь размерами молекул и их взаимодействием?
3. Какой из газов — водород, кислород или гелий — наиболее близок по свойствам к идеальному, если их температура одинакова?
4. Каковы границы применимости модели «идеальный газ»?
5. Чем обусловлено давление газа на стенки сосуда?
6. От чего зависит давление газа на стенки сосуда?

Упражнение 22

1. В двух сосудах одинакового объёма находятся азот и водород, причём средний квадрат скорости движения молекул и их число в обоих сосудах одинаковы. Сравните давление газов в сосудах.

2. Определите давление воздуха в футбольном мяче объёмом  $2500 \text{ см}^3$ , если в нём находится  $4,5 \cdot 10^{23}$  молекул. Средняя масса молекулы воздуха  $4,8 \cdot 10^{-26} \text{ кг}$ , средний квадрат скорости движения молекул  $1,6 \cdot 10^5 \text{ м}^2/\text{с}^2$ .

3. Определите число молекул газа, содержащегося в трёхлитровом сосуде, если средний квадрат скорости движения его молекул  $3,6 \cdot 10^5 \text{ м}^2/\text{с}^2$ , масса молекулы газа  $4,6 \cdot 10^{-23} \text{ г}$ , давление газа  $920 \text{ Па}$ .

4. Какой объём займёт газ массой  $4 \text{ кг}$  при давлении  $2 \cdot 10^5 \text{ Па}$ , если средняя квадратичная скорость движения его молекул  $500 \text{ м/с}$ ?

## § 32. Уравнение состояния идеального газа

1. **Средняя кинетическая энергия теплового движения молекул и температура тела.** Напомним, что средняя кинетическая энергия теплового движения молекул прямо пропорциональна термодинамической температуре:

$$\overline{E_k} = \frac{3}{2} kT.$$

Можно сказать, что *температура является мерой средней кинетической энергии теплового движения молекул вещества.*

Коэффициент пропорциональности  $k$ , входящий в формулу, является *фундаментальной физической постоянной* и носит название **постоянной Больцмана**. Она показывает, на сколько изменяется средняя кинетическая энергия теплового движения молекул при изменении температуры тела на  $1 \text{ К}$ .

Подставив выражение для средней кинетической энергии теплового движения молекул в формулу давления идеального газа, получим

$$p = \frac{2}{3} n \cdot \frac{3}{2} kT, \text{ или}$$

$$p = nkT. \quad (1)$$

Из этого выражения следует, что при одинаковых значениях давления и температуры концентрация молекул различных газов одна и та же.

Постоянную Больцмана можно вычислить, зная, что концентрация молекул газа при нормальных условиях, т. е. при темпера-

туре  $T = 273,15 \text{ К}$  и  $p = 101\,325 \text{ Па}$ , равна постоянной Лошмидта  $L = 2,68 \cdot 10^{25} \text{ м}^{-3}$ . Подставив эти значения в формулу давления, получим:

$$k = \frac{p}{nT};$$

$$k = \frac{101\,325 \text{ Па}}{273,15 \text{ К} \cdot 2,68 \cdot 10^{25} \text{ м}^{-3}} = 1,38 \cdot 10^{-23} \frac{\text{Дж}}{\text{К}}.$$

Таким образом, постоянная Больцмана  $k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К}$ .

**2. Уравнение состояния идеального газа.** Как вы уже знаете, состояние макроскопической системы характеризуется определёнными параметрами. К ним относятся объём  $V$ , давление  $p$ , температура  $T$ . При изменении состояния газа изменяются его параметры. Уравнение, которое описывает изменение состояния идеального газа и устанавливает связь между параметрами его начального и конечного состояний, называют **уравнением состояния идеального газа**.

Учитывая, что концентрация молекул  $n = \frac{N}{V}$ , запишем уравнение (1) иначе:

$$p = \frac{Nk}{V}T, \text{ или}$$

$$pV = NkT. \quad (2)$$

Уравнение (2) и есть **уравнение состояния идеального газа**.

**3. Уравнение Менделеева — Клапейрона.** Число молекул  $N$  равно произведению постоянной Авогадро  $N_A$  на количество вещества  $\nu$ , которое, в свою очередь, равно отношению массы газа  $m$  к его молярной массе  $M$ , т. е.:

$$N = N_A \nu = \frac{N_A m}{M}.$$

Подставив это выражение в формулу (2), получим:

$$pV = \frac{m}{M} N_A k T. \quad (3)$$

Произведение постоянной Больцмана  $k$  на постоянную Авогадро  $N_A$  называют **универсальной газовой постоянной** и обозначают буквой  $R$ .

$$R = kN_A = 8,31 \text{ Дж/(моль} \cdot \text{К)}.$$

Универсальная газовая постоянная показывает, какую энергию необходимо сообщить 1 моль идеального газа, чтобы увеличить его температуру на 1 К.

Заменив произведение  $kN_A$  на  $R$  в уравнении (3), запишем:

$$pV = \frac{m}{M}RT. \quad (4)$$

Уравнение (4) так же, как и уравнение (2), является уравнением состояния идеального газа; оно связывает параметры какого-либо состояния газа произвольной массы. Это уравнение называют **уравнением Менделеева — Клапейрона**.

**4. Уравнение Клапейрона.** Предположим, что газ переходит из некоторого состояния 1, которое характеризуется параметрами  $p_1, V_1, T_1$ , в состояние 2, которое характеризуется параметрами  $p_2, V_2, T_2$ . При этом масса газа и его химический состав остаются неизменными. Запишем уравнение Менделеева — Клапейрона для первого и второго состояний газа:

$$p_1V_1 = \frac{m}{M}RT_1; \quad p_2V_2 = \frac{m}{M}RT_2.$$

Разделим первое уравнение на второе. Получим:

$$\frac{p_1V_1}{p_2V_2} = \frac{T_1}{T_2}; \quad \frac{p_1V_1}{T_1} = \frac{p_2V_2}{T_2},$$

или

$$\frac{pV}{T} = \text{const.} \quad (5)$$

Уравнение (5) называют **уравнением Клапейрона**. Это уравнение связывает параметры двух состояний газа при неизменной массе газа и его химическом составе.

**Произведение давления газа данной массы и его объёма, делённое на термодинамическую температуру, есть величина постоянная.**

**5. Внутренняя энергия идеального газа.** Напомним, что молекулы идеального газа не взаимодействуют между собой, поэтому его внутренняя энергия равна только кинетической энергии теплового движения его молекул:

$$U = E_k, \text{ или } U = N\bar{E}_k.$$

Подставив в эту формулу выражение для средней кинетической энергии молекул и выражение для числа молекул газа  $N = \frac{m}{M}N_A$ , запишем:

$$U = \frac{N_A m}{M} \cdot \frac{3}{2} kT, \text{ или}$$

$$U = \frac{3}{2} \frac{m}{M} RT.$$

Эта формула позволяет рассчитать внутреннюю энергию идеального одноатомного газа.

### Вопросы для самопроверки

1. Докажите на примерах связь между средней кинетической энергией теплового движения молекул и температурой тела.
2. Каков физический смысл постоянной Больцмана?
3. Какое уравнение называют уравнением состояния идеального газа?
4. Связь между какими параметрами состояния газа выражает уравнение Менделеева — Клапейрона?
5. Каков физический смысл универсальной газовой постоянной? Почему она названа универсальной?
6. Как читается уравнение Клапейрона?
7. От чего зависит внутренняя энергия идеального газа?

### Упражнение 23

1. В баллоне находится газ при температуре  $27^\circ\text{C}$  и давлении  $3 \cdot 10^5$  Па. После того как  $\frac{1}{3}$  газа выпустили из баллона, давление в нём стало равным  $1,8 \cdot 10^5$  Па. Определите, какая температура установится в баллоне.
2. Чему равен объём газа при нормальных условиях, если при  $50^\circ\text{C}$  и давлении  $1,8 \cdot 10^5$  Па газ занимает объём  $0,5$  м<sup>3</sup>?
3. Определите плотность кислорода при температуре  $100^\circ\text{C}$  и давлении  $2 \cdot 10^5$  Па.
4. Резиновый шар, содержащий 2 л воздуха, находится при температуре  $20^\circ\text{C}$  и давлении  $10^5$  Па. Какой объём займёт воздух, если шар опустить в воду на глубину 10 м? Температура воды  $4^\circ\text{C}$ .

### Самоконтроль

Выполните в рабочей тетради тренировочный тест 5.





## § 33. Газовые законы

**1. Изопроцессы.** Состояние идеального газа может изменяться таким образом, что, помимо массы, постоянным будет оставаться один из макроскопических параметров состояния. Например, если внести с улицы в тёплое помещение плотно закрытый сосуд с жёсткими стенками, то через некоторое время он и воздух в нём нагреются. Состояние воздуха в сосуде будет иным, нежели на улице, однако его масса и объём останутся прежними, изменятся только давление и температура. В этом и других подобных случаях уравнение состояния можно упростить и, полагая один из макроскопических параметров неизменным, получить связь между двумя параметрами, которые изменяются. Законы, выражающие эту связь, называют **газовыми законами**.

Процессы, протекающие при неизменном значении одного из макроскопических параметров состояния газа, называют **изопроцессами** (от греч. *isos* — равный, одинаковый).

**2. Изотермический процесс.** Рассмотрим процесс, который происходит при постоянной температуре.

**Изотермическим называют процесс изменения состояния термодинамической системы, происходящий при постоянной температуре.**

Такой процесс можно осуществить, если медленно сжимать поршнем газ, находящийся в цилиндре (рис. 91). При медленном сжатии теплообмен между газом и окружающим воздухом успеет происходить, и температура газа остаётся неизменной.

Получим уравнение, которым можно описать изменение состояния идеального газа при изотермическом процессе. Для этого запишем уравнение Клапейрона:

$$\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2},$$

где  $p_1$  и  $V_1$  — давление и объём газа в первом состоянии,  $p_2$  и  $V_2$  — давление и объём газа во втором состоянии.

Учитывая, что  $T_1 = T_2$ , получим:

$$p_1 V_1 = p_2 V_2, \text{ или}$$

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

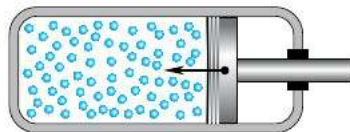


Рис. 91

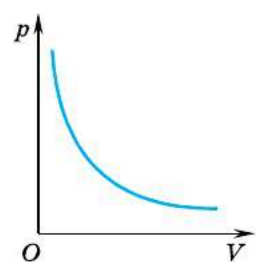


Рис. 92

Давление газа данной массы при неизменной температуре обратно пропорционально его объёму; или произведение давления газа данной массы и его объёма при неизменной температуре есть величина постоянная.

Этот закон назван законом Бойля — Мариотта. Он был независимо установлен английским учёным *Робертом Бойлем* (1627—1691) в 1661 г. и французским учёным *Эдмом Мариоттом* (1620—1684) в 1676 г.

Графиком зависимости давления газа от его объёма при постоянной температуре — **изотермой** — является гипербола (рис. 92).

Зависимость давления газа данной массы от его объёма при постоянной температуре можно объяснить на основе молекулярно-кинетической теории строения вещества. Действительно, вам уже известно, что давление газа на стенки сосуда тем больше, чем больше концентрация его молекул. При уменьшении объёма концентрация молекул возрастает, следовательно, увеличивается давление газа; при увеличении объёма концентрация молекул и давление газа увеличиваются.

Применим к изотермическому процессу первый закон термодинамики:

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

Поскольку при изотермическом процессе температура не меняется, то внутренняя энергия остаётся постоянной  $\Delta U = 0$ , т. е.

$$Q = A \text{ или } Q = -A'.$$

Это означает, что при изотермическом процессе количество теплоты, переданное системе, идёт на совершение системой работы против внешних сил. При этом если система получает некоторое количество теплоты, то она расширяется и совершает положительную работу. Если система отдаёт некоторое количество теплоты, то она сжимается и совершает отрицательную работу. Иначе говоря, если газ сжимают изотермически, то он отдаёт некоторое количество теплоты.

Закон Бойля — Мариотта применим к идеальному газу, т. е. имеет те же границы применимости, что и модель идеального газа: неприменим при низких температурах и высоких давлениях.



**3. Изобарный процесс.** Как и все тела, газы при нагревании расширяются. Продемонстрируем это. Закроем колбу пробкой, в которую вставлена изогнутая под прямым углом стеклянная трубка (рис. 93). В горизонтальной части трубки поместим столбик подкрашенной воды. При нагревании колбы даже руками будет видно, как столбик воды смещается вправо, а при охлаждении — влево. В этом случае меняются температура и объём воздуха в колбе, а давление остаётся постоянным, равным атмосферному.

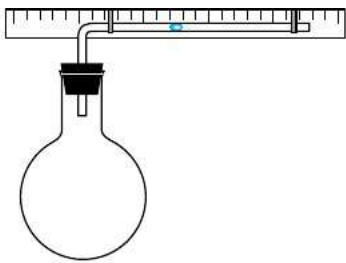


Рис. 93

**Изобарным** называют процесс изменения состояния газа, происходящий при неизменном давлении.

Установить зависимость объёма газа данной массы от температуры при постоянном давлении можно с помощью описанного выше прибора, если прикрепить к нему шкалу и по ней судить об объёме газа, а температуру измерять термометром. В этом случае зависимость между объёмом и температурой получим экспериментально.

Эту же зависимость можно получить теоретически, используя

уравнение Клапейрона: 
$$\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2}.$$

Учитывая, что  $p_1 = p_2$ , получим:

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

или

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

**Объём газа данной массы при постоянном давлении прямо пропорционален его термодинамической температуре; или отношение объёма газа данной массы к его термодинамической температуре при неизменном давлении есть величина постоянная.**

Этот закон был установлен экспериментально французским физиком *Жозефом Луи Гей-Люссаком* (1778—1850) в 1802 г. и носит его имя.

Закон Гей-Люссака иногда записывают иначе. Предположим, что газ переводят из состояния при нормальных условиях ( $p_0 = 10^5$  Па,  $T_0 = 273,15$  К,  $V_0$  — соответствующий объём) в состояние с параметрами  $T$  и  $V$  и при этом масса газа остаётся неизменной. Тогда

$$\frac{V}{V_0} = \frac{T}{T_0}, \text{ или}$$

$$V = \frac{V_0}{T_0} T.$$

Обозначив  $\frac{1}{T_0} = \alpha$ , получим:

$$V = \alpha V_0 T, \text{ где } \alpha = \frac{1}{273,15} \text{ К}^{-1}.$$

Коэффициент  $\alpha$  называют **температурным коэффициентом объёмного расширения газа**. *Он одинаков для всех газов и показывает, что при нагревании на 1 К объём газа увеличивается на  $1/273,15$  часть того объёма, который газ занимал при 273,15 К (при 0 °С).*

Напомним, что термодинамическая температура и температура по шкале Цельсия связаны соотношением:

$$T = t + 273,15.$$

Тогда формула закона Гей-Люссака будет иметь вид:

$$V = V_0 \alpha (t + 273,15).$$

Учитывая, что  $273,15 = \frac{1}{\alpha}$ , запишем:

$$V = V_0 (1 + \alpha t).$$

Зависимость объёма газа данной массы от температуры при постоянном давлении является линейной; график этой зависимости — прямая, называемая **изобарой** (рис. 94).

На рисунке 94, *а* приведён график зависимости объёма от термодинамической температуры, а на рисунке 94, *б* — от температуры по шкале Цельсия. В первом случае график должен проходить через начало координат (при  $T = 0$ ,  $V = 0$ ). Однако при низ-

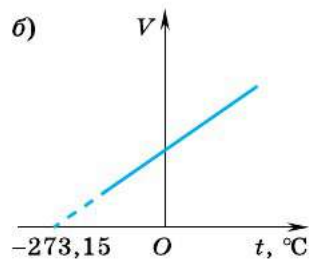
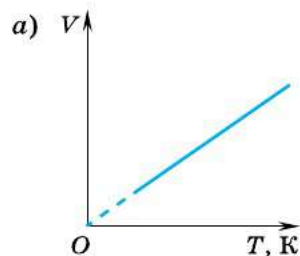


Рис. 94

ких температурах газ нельзя считать идеальным, поэтому график проводят пунктиром. Реальные газы при низких температурах превращаются в жидкости, а к жидкостям уравнение Клапейрона так же, как и закон Гей-Люссака, неприменимо.

Во втором случае график должен был бы пересечь ось абсцисс в точке  $t = -273,15 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Согласно молекулярно-кинетической теории строения вещества при увеличении температуры увеличивается средняя кинетическая энергия теплового движения молекул газа и, следовательно, увеличивается давление газа на стенки сосуда. Для того чтобы оно осталось неизменным (изобарный процесс), должна уменьшиться концентрация молекул. Это и происходит при увеличении объёма газа при его неизменной массе.

При изобарном процессе переданное системе количество теплоты расходуется и на изменение внутренней энергии системы, и на совершение системой работы против внешних сил:

$$Q = \Delta U + p\Delta V.$$

Если газу передаётся некоторое количество теплоты, то он расширяется ( $\Delta V > 0$  и  $p\Delta V > 0$ ) и его внутренняя энергия возрастает ( $\Delta U > 0$ ), газ нагревается ( $\Delta T > 0$ ).

Если газ отдаёт некоторое количество теплоты ( $Q < 0$ ), то он сжимается ( $\Delta V < 0$ ) и его внутренняя энергия уменьшается ( $\Delta U < 0$ ), газ охлаждается ( $\Delta T < 0$ ).

**4. Изохорный процесс.** Нагревая газ в закрытом сосуде с абсолютно твёрдыми стенками, можно осуществить процесс, происходящий при неизменном объёме.

**Изохорным называют процесс изменения состояния газа, происходящий при неизменном объёме.**

Запишем уравнение Клапейрона:  $\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2}$ .

Учитывая, что  $V_1 = V_2$ , получим:

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

или

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

Давление газа данной массы при постоянном объёме прямо пропорционально его термодинамической температуре; или отношение давления газа данной массы к его термодинамической температуре есть величина постоянная.

Этот закон был открыт французским учёным *Жаком Александром Цезаром Шарлем* (1746—1823) в 1787 г. и носит его имя.

Закон Шарля так же, как и закон Гей-Люссака, может быть записан иначе. Если газ переводится из состояния при нормальных условиях в состояние с параметрами  $p$  и  $T$  и при этом масса газа остаётся неизменной, то можно записать:

$$\frac{p_0}{T_0} = \frac{p}{T}, \text{ или } p = \frac{p_0}{T_0} T.$$

Обозначив  $\frac{1}{T_0} = \gamma$ , получим:

$$p = \gamma p_0 T, \text{ где } \gamma = \frac{1}{273,15} \text{ К}^{-1}.$$

Коэффициент  $\gamma$  называют **температурным коэффициентом давления газа**. Он одинаков для всех газов и показывает, что при нагревании на 1 К давление газа увеличивается на  $1/273,15$  часть того давления, которое производил газ при нормальных условиях.

Выражая температуру в градусах Цельсия, можно записать:

$$p = p_0(1 + \gamma t).$$

Графиком зависимости давления газа данной массы от температуры является прямая, называемая **изохорой** (рис. 95). График на рисунке 95, а должен был бы проходить через начало координат, однако при низких температурах применить к газу закон Шарля уже нельзя.

Согласно молекулярно-кинетической теории строения вещества при повышении температуры увеличивается средняя кинетическая энергия теплового движения молекул, а следовательно, при неизменной концентрации молекул увеличивается давление газа.

При изохорном процессе объём газа не изменяется, поэтому работа системы против

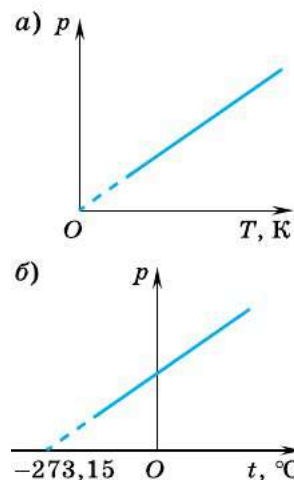


Рис. 95



Рис. 96

Для всех одноатомных газов коэффициент Пуассона имеет одно и то же значение. Эксперимент подтверждает этот результат в достаточно широком диапазоне температур.

**6. Адиабатный процесс.** Вспомним опыт с сосудом, из которого при нагнетании в него воздуха вылетала пробка (см. рис. 83), а в сосуде при этом образовывался туман. Процесс происходил настолько быстро, что теплообмен с окружающей средой не успевал осуществляться. Такой процесс называют **адиабатным**.

**Адиабатным называют процесс изменения состояния газа, происходящий в теплоизолированной системе, т. е. процесс, происходящий без обмена энергией с окружающей средой.**

При адиабатном процессе системе не передаётся энергия, следовательно,  $Q = 0$ .

В соответствии с первым законом термодинамики для адиабатного процесса можно записать:

$$\Delta U = -A.$$

Из этого уравнения видно, что при расширении газ совершает работу, его внутренняя энергия уменьшается и температура понижается. Действительно, при расширении работа газа положительна, а изменение внутренней энергии отрицательно. Подтверждением этого является опыт по адиабатному расширению воздуха.

При быстром сжатии газа внешние силы совершают положительную работу, и внутренняя энергия газа увеличивается. Примером может служить опыт с воздушным огнём (рис. 96). На дно толстого цилиндра кладут ватку, смоченную эфиром, резко ударяют по поршню, ватка воспламеняется. В этом случае при адиабатном сжатии воздуха и паров эфира их внутренняя энергия и, соответственно, температура возрастают.

Адиабатный процесс описывается с помощью уравнения Пуассона:

$$pV^\gamma = \text{const},$$

где  $\gamma$  — коэффициент Пуассона.

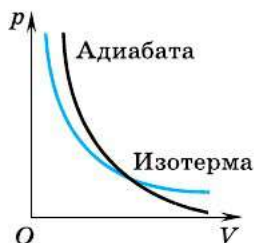


Рис. 97



На рисунке 97 изображены графики зависимости давления от объёма при изотермическом и адиабатном процессах. Как видно, **адиабата** идёт круче, чем изотерма.

## Вопросы для самопроверки

1. Что такое изопроцессы?
2. Как осуществить изотермический, изохорный, изобарный процессы?
3. Сформулируйте закон Бойля — Мариотта. Объясните его на основе молекулярно-кинетической теории. Запишите первый закон термодинамики для изотермического процесса.
4. Сформулируйте закон Гей-Люссака. Объясните его на основе молекулярно-кинетической теории. Запишите первый закон термодинамики для изобарного процесса.
5. Сформулируйте закон Шарля. Объясните его на основе молекулярно-кинетической теории. Запишите первый закон термодинамики для изохорного процесса.
6. Каковы границы применимости газовых законов?
7. Какой процесс называют адиабатным? Как его осуществить? Приведите пример адиабатного процесса.

## Упражнение 24

1. Закрытый сосуд, содержащий 5 л воздуха при давлении  $1,6 \cdot 10^5$  Па, соединяют с сосудом ёмкостью 3 л, из которого откачан воздух. Какое давление установится в сосудах после их соединения, если считать, что температура воздуха остаётся неизменной?
2. Плотность водорода при нормальных условиях  $9 \cdot 10^{-2}$  кг/м<sup>3</sup>. Чему равна плотность водорода при увеличении давления до  $3 \cdot 10^5$  Па при неизменной температуре?
3. На рисунке 98 приведены графики двух изотермических процессов. Какой из процессов происходит при более высокой температуре? Масса и химический состав газов, участвующих в процессах, одинаковы.
4. Какой объём займёт азот при температуре 200 °С, если при температуре 0 °С его объём равен 4 л? Считать, что изменение объёма происходит при постоянном давлении.
5. Горизонтально расположенный закрытый цилиндр разделён на две части подвижным поршнем. С одной стороны поршня в цилиндре содержится газ при температуре  $-73$  °С, с другой стороны — тот же газ при темпера-

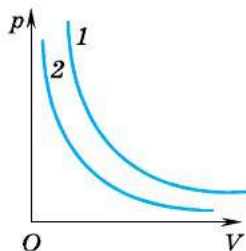


Рис. 98



туре  $27\text{ }^\circ\text{C}$ . Поршень находится в равновесии. Определите объёмы, занимаемые газами, если общий объём цилиндра  $500\text{ см}^3$ . Массы газа, находящегося с обеих сторон от поршня, одинаковы.

6. Сравните давления, при которых происходят изобарные процессы, представленные графиками на рисунке 99.

7. В цилиндре под поршнем находится воздух при давлении  $2 \cdot 10^5\text{ Па}$  и температуре  $27\text{ }^\circ\text{C}$ . Груз какой массы нужно положить на поршень после нагревания воздуха до температуры  $50\text{ }^\circ\text{C}$ , чтобы объём воздуха в цилиндре остался неизменным? Площадь поперечного сечения поршня  $30\text{ см}^2$ .

8. На рисунке 100 представлены графики двух изохорных процессов. Сравните объёмы газов, при которых они происходят, считая одинаковыми массу и химический состав газов.

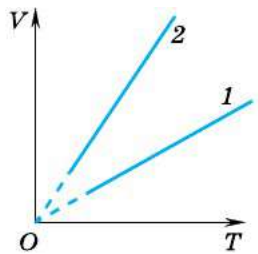


Рис. 99

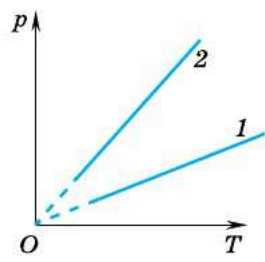


Рис. 100

## § 34. Критическое состояние вещества

**1. Модель реального газа.** Идеальный газ — самая простая модель газа, самая простая макроскопическая система. Реальные газы подчиняются законам, записанным для этой модели, лишь с той или иной степенью точности при определённых, не слишком высоких значениях давления и не слишком низких значениях температуры. Чем больше факторов учтено при построении модели, тем точнее она отражает объективную реальность. Уточним модель идеального газа и построим модель реального газа.

При построении модели идеального газа считалось, что размеры молекул малы по сравнению с размерами сосуда и молекулы не взаимодействуют между собой. Такой газ подчиняется уравнению Менделеева — Клапейрона.

Свойства реального газа зависят от взаимодействия его молекул и их размеров. Реальный газ не подчиняется уравнению Менделеева — Клапейрона в том виде, в каком он записан для идеального газа. Чтобы это уравнение более точно описывало состояние реального газа, в него необходимо ввести поправки, учитывающие собственный объём молекул и взаимодействие между ними. Следует иметь в виду, что и уравнение Менделеева — Клапейрона с по-

правками также справедливо лишь для определённой модели реального газа.

**2. Критическое состояние вещества.** Если идеальный газ сжимать, то при любых значениях температуры и давления он должен оставаться в газообразном состоянии. Реальный газ ведёт себя иначе. При определённых условиях он может быть переведён в жидкое состояние.

Рассмотрим процесс сжатия реального газа. Пусть в цилиндре под поршнем находится водяной пар при температуре, например,  $400\text{ }^\circ\text{C}$ . При изотермическом сжатии пар будет вести себя подобно идеальному газу (изотерма 1 на рис. 101). При более низкой температуре, например при  $200\text{ }^\circ\text{C}$ , и не слишком большом давлении пар подчиняется закону Бойля — Мариотта (участок АВ изотермы 4).

Начиная с некоторого значения объёма  $V_1$ , при дальнейшем сжатии пара давление остаётся неизменным (участок ВС изотермы 4). Так происходит до тех пор, пока весь пар не превратится в жидкость (точка С изотермы 4). При дальнейшем сжатии для небольшого изменения объёма необходимо значительное давление.

По графикам на рисунке 101 видно, что чем выше температура, тем меньше горизонтальный участок изотермы, т. е. точки В и С, соответствующие газообразному и жидкому состояниям системы, сближаются (изотерма 3). При некоторой температуре эти две точки совпадают (изотерма 2), и горизонтальный участок превращается в точку перегиба К. Эта точка соответствует состоянию, при котором исчезает различие между жидкостью и паром. Состояние системы, соответствующее на графике точке К, называют **критическим**. Температуру, при которой система находится в критическом состоянии, называют **критической температурой ( $T_k$ )**.

По мере повышения температуры жидкости в замкнутом сосуде её плотность уменьшается, а плотность пара возрастает, поскольку жидкость интенсивнее испаряется. При критической температуре плотность жидкости становится минимальной, а плотность пара максимальной (рис. 102). При температуре выше критической путём изотермического сжатия пар нельзя превратить в жидкость (изотерма 1 на рис. 101).

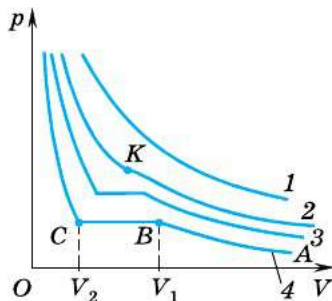


Рис. 101

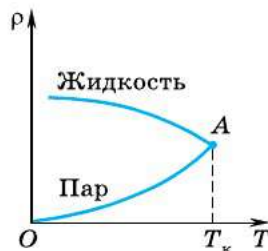


Рис. 102

В таблице 21 приведены значения критической температуры для некоторых веществ.

Таблица 21

Вещество	Критическая температура	
	°С	К
Вода	374,15	647,3
Аммиак	232,45	505,6
Углекислый газ	31,05	304,2
Кислород	-118,85	154,3
Водород	-239,95	33,2
Гелий	-267,9	5,25

В конце XVIII в. возникла идея сжижения газа. Первым в жидкость был переведён аммиак. Английский физик **Майкл Фарадей** (1791—1867) внёс определённый вклад в решение этой проблемы. Ему удалось получить жидкий хлор и перевести в жидкое состояние ряд других газов. Однако кислород, азот, водород сжигать не удалось. Причину этого правильно понял Д. И. Менделеев. Он предположил, что у данных газов очень низкая критическая температура. Чтобы перевести их в жидкость, необходимо эти газы сначала охладить до температуры ниже критической, а затем сжать.

### Вопросы для самопроверки

1. Поясните график зависимости плотности жидкости и её пара от температуры (см. рис. 102). Что означает точка А на графике?
2. Можно ли путём изотермического сжатия перевести углекислый газ, находящийся при температуре 50 °С, в жидкое состояние?
3. Почему идеальный газ остаётся в газообразном состоянии при любых значениях давления и температуры?
4. От каких параметров зависит внутренняя энергия реального газа?

## § 35. Насыщенный пар

**1. Парообразование.** Процесс перехода вещества из жидкого состояния в газообразное называют **парообразованием**. Парообразование осуществляется при испарении и при кипении. Вспомним, как происходит испарение.

Молекулы жидкости, участвующие в тепловом движении, удерживают друг около друга действующие между ними силы притяжения. Однако есть молекулы жидкости, кинетическая энергия которых достаточно велика и превосходит потенциальную энергию их взаимодействия. Такие молекулы могут совершить работу по преодолению сил притяжения (работу выхода) и покинуть жидкость.

Молекулы, вылетевшие из жидкости, беспорядочно движутся, некоторые из них в результате столкновений могут приобрести соответствующую скорость и вернуться в жидкость. Однако таких молекул мало, большинство молекул рассеиваются в окружающем пространстве, если сосуд, из которого они вылетают, открыт. Над жидкостью в этом случае находится **ненасыщенный пар**. Испарение будет происходить до тех пор, пока вся жидкость не превратится в пар.

**2. Насыщенный пар.** Пусть теперь жидкость находится в закрытом сосуде. В этом случае молекулы, вылетевшие из жидкости, уже не будут рассеиваться в атмосфере. Часть молекул возвратится в жидкость. В начале процесса испарения число молекул, вылетевших из жидкости, будет больше, чем число молекул, вернувшихся в неё. Поэтому плотность пара будет постепенно возрастать. При этом число молекул, возвращающихся в жидкость, тоже будет постепенно увеличиваться. Настанет такой момент, когда число молекул, вылетевших из жидкости, будет равно числу молекул, возвращающихся обратно в жидкость. Теперь число молекул над жидкостью и соответственно плотность пара изменяться не будут. Говорят, что в этом случае существует **динамическое равновесие** между паром и жидкостью и пар является **насыщенным**.

**Насыщенным называют пар, находящийся в состоянии динамического равновесия со своей жидкостью.**

**3. Свойства насыщенного пара.** Рассмотрим, какими свойствами обладает насыщенный пар. Пусть в цилиндре под поршнем находятся жидкость и её насыщенный пар (рис. 103, а). Будем опускать поршень, при этом объём пара уменьшится, а плотность



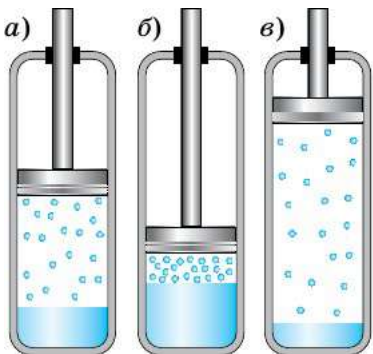


Рис. 103

и давление в первый момент возрастут. Это приведёт к нарушению равновесия между паром и жидкостью: число молекул, возвращающихся в жидкость, станет больше, чем число молекул, покидающих её (рис. 103, б). Число молекул пара уменьшится, и восстановится прежнее давление.

Это можно пояснить, используя уравнение состояния идеального газа:

$$p = nkT \text{ или } p = \frac{N}{V}kT. \text{ Если одновременно}$$

но в одно и то же число раз изменяются

число молекул газа и его объём, то давление при постоянной температуре остаётся неизменным.

Будем поднимать поршень в цилиндре (рис. 103, в), поддерживая неизменной температуру. При этом объём пара увеличится, а его плотность и давление в первый момент уменьшатся. В этом случае число молекул, вылетающих из жидкости, будет больше, чем число молекул, возвращающихся в неё. Плотность и давление пара начнут увеличиваться до тех пор, пока не достигнут прежних значений.

Таким образом, *давление насыщенного пара при данной температуре не зависит от его объёма, и для данного вещества его значение постоянно.*

Давление насыщенного пара при одной и той же температуре для разных веществ различно. Так, давление насыщенного пара воды при температуре 45 °С равно 10<sup>4</sup> Па, а ртути — всего 1,3 Па.

Будем нагревать жидкость в закрытом сосуде. При повышении температуры большее число молекул приобретёт энергию, достаточную для преодоления сил притяжения соседних молекул и вылета из жидкости. В первый момент равновесие нарушится. Если поддерживать температуру постоянной, то оно восстановится, но теперь над жидкостью будет находиться больше молекул пара, чем при более низкой температуре. Соответственно увеличатся плотность пара и его давление.

Если рассматриваемую систему «жидкость — насыщенный пар» охлаждать, то пар будет конденсироваться. Это означает, что в жидкость будет возвращаться больше молекул, чем из неё вылетать. Плотность и давление насыщенного пара будут уменьшаться.

Таким образом, *давление насыщенного пара возрастает с повышением температуры.*

**4. Точка росы.** Превращение ненасыщенного пара в насыщенный можно осуществить, понижая его температуру. Это явление наблюдал каждый из вас. Летним вечером после жаркого дня выпадает роса. Это связано с тем, что в воздухе содержится водяной пар. Днём этот пар является ненасыщенным, а к вечеру при понижении температуры он переходит в состояние насыщения и начинает конденсироваться.

**Температуру, при которой ненасыщенный пар становится насыщенным, называют точкой росы.**

Точка росы зависит от давления. Так, при давлении  $2,3 \cdot 10^3$  Па водяной пар становится насыщенным при температуре  $20^\circ\text{C}$ , а при давлении  $1,2 \cdot 10^4$  Па — при  $50^\circ\text{C}$ . Чем больше давление, тем выше точка росы, т. е. при более высоком давлении переход пара в состояние насыщения происходит при более высокой температуре.

Вопросы для самопроверки

1. Какой пар можно считать насыщенным?
2. Зависит ли давление насыщенного пара от его объёма? Ответ поясните.
3. Как ненасыщенный пар можно превратить в насыщенный?
4. Что называют точкой росы?
5. Как и почему точка росы зависит от давления?

Упражнение 25

1. Объясните зависимость давления насыщенного пара от температуры на основе молекулярно-кинетической теории строения вещества.
2. Различается ли зависимость давления от температуры для насыщенного пара и идеального газа? Ответ поясните.
3. Врач, осматривая горло пациента, пользуется специальным зеркальцем, предварительно нагревая его выше температуры  $37^\circ\text{C}$ . Объясните, зачем он нагревает зеркальце.

## § 36. Влажность воздуха

**1. Абсолютная влажность.** В окружающем воздухе всегда содержится определённое количество водяного пара. Это связано с тем, что вода непрерывно испаряется с поверхности водоёмов, растительности, почвы и пр. Обычно водяной пар, присутствующий





в атмосфере, ненасыщенный, однако при определённых условиях он может стать насыщенным, например при низкой температуре или сразу же после дождя. Содержание водяного пара в воздухе характеризуют **влажностью**.

Для того чтобы оценить влажность воздуха, вводят две величины: **абсолютную и относительную влажность**.

Воздух состоит из смеси различных газов и водяного пара. Давление воздуха складывается из давлений, производимых каждым газом в отдельности, в том числе водяными парами. Давление, которое производит каждый газ независимо от других, называют **парциальным**. По значению парциального давления водяного пара можно судить об абсолютной влажности воздуха.

**Абсолютная влажность воздуха  $p$  равна парциальному давлению (или плотности) водяного пара при данной температуре.**

Если парциальное давление водяного пара равно, например,  $1,08 \cdot 10^3$  Па, то это значение и есть абсолютная влажность воздуха при данной температуре.

Абсолютную влажность воздуха выражают также через плотность водяного пара, содержащегося в воздухе. При влажности воздуха  $8,3 \cdot 10^{-3}$  кг/м<sup>3</sup> в 1 м<sup>3</sup> воздуха содержится водяной пар массой  $8,3 \cdot 10^{-3}$  кг.

Абсолютную влажность воздуха измеряют с помощью **гигрометра**. На рисунке 104, *а* показан внешний вид конденсационного гигрометра, а на рисунке 104, *б* — гигрометр в разрезе. Этот прибор состоит из прикреплённой к стойке металлической коробочки 1, передняя стенка 2 которой сделана блестящей. В коробочке имеется отверстие, через которое в неё вставляют термометр 3. В другое отверстие плотно входит трубка, присоединённая к резиновой груше 4. Коробочка окружена полированным кольцом 5, отделённым от неё теплоизолированной прокладкой 6.

В коробочку наливают эфир и продувают через него воздух с помощью груши. Эфир, быстро испаряясь, охлаждает коробочку, и её поверхность запотевает. Это происходит потому, что водяной пар, находящийся в воздухе вблизи коробочки, при понижении температуры становится насыщенным. Эта температура называется, как вам известно, точкой росы. Измерив с помощью термометра точку росы, по таблице определяют давление (или плотность) насыщенного пара при данной температуре. Это значение и есть абсолютная влажность воздуха.

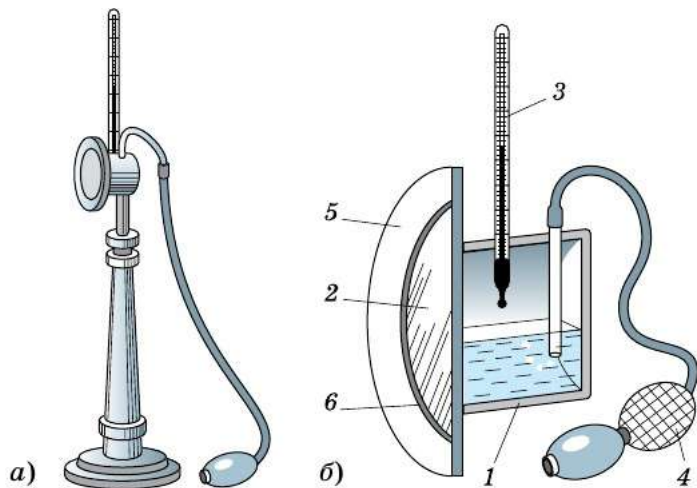


Рис. 104

Значения парциального давления и плотности насыщенного водяного пара при разной температуре приведены в таблице 22.

Таблица 22

Температура, °С	Давление насыщенного пара, кПа	Плотность насыщенного пара, $10^{-3}$ кг/м <sup>3</sup>	Температура, °С	Давление насыщенного пара, кПа	Плотность насыщенного пара, $10^{-3}$ кг/м <sup>3</sup>
-30	0,06	0,46	10	1,23	9,41
-20	0,10	0,88	15	1,70	12,84
-10	0,26	2,14	20	2,34	17,32
0	0,61	4,58	30	4,24	30,30
5	0,87	6,80	40	7,38	51,20

Например, необходимо определить абсолютную влажность воздуха при температуре 16 °С. Проведя опыт с гигрометром, установили, что точка росы равна 10 °С. Используя таблицу 22, определили, что при этой температуре давление насыщенного пара  $1,23 \cdot 10^3$  Па. Следовательно, абсолютная влажность воздуха при температуре 16 °С равна  $1,23 \cdot 10^3$  Па (или  $9,41 \cdot 10^{-3}$  кг/м<sup>3</sup>).



**2. Относительная влажность.** По абсолютной влажности нельзя сказать, сухой это воздух или влажный. При одном и том же значении парциального давления пара воздух может быть более или менее сухим в зависимости от температуры. Одно и то же давление пара или одна и та же его плотность при 15 и 25 °С делают воздух в разной степени влажным. При температуре 15 °С при данном давлении водяной пар ближе к насыщению, чем при 25 °С. Поэтому степень влажности воздуха характеризуют относительной влажностью.

**Относительной влажностью воздуха  $\varphi$**  называют величину, равную отношению абсолютной влажности  $\rho$  к парциальному давлению  $p_0$  насыщенного пара при той же температуре.

$$\varphi = \frac{P}{P_0} \cdot 100\%.$$

Эту формулу можно записать иначе:

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

Относительная влажность воздуха — отношение плотности  $\rho$  водяного пара, содержащегося в воздухе (абсолютной влажности), к плотности  $\rho_0$  насыщенного пара при этой же температуре. Обычно относительная влажность выражается в процентах.

Чтобы определить относительную влажность с помощью гигрометра, находят абсолютную влажность, а затем по таблице определяют значение парциального давления насыщенного пара при данной температуре. Например, давление насыщенного пара при температуре 16 °С равно  $1,81 \cdot 10^3$  Па. Следовательно, относительная влажность воздуха  $\varphi = \frac{1,23 \cdot 10^3 \text{ Па}}{1,81 \cdot 10^3 \text{ Па}} \approx 68\%$ .

Относительную влажность воздуха можно измерить с помощью **психрометра** (рис. 105). Этот прибор вы могли видеть в музеях, картинных галереях и других помещениях, в которых требуется поддерживать определённую влажность.

Психрометр состоит из двух термометров, резервуар одного из которых обернут куском ткани, опущенным в воду. Таким образом, один термометр (влажный) показывает температуру влажной ткани, с которой испаряется вода, а другой (сухой) — температуру воздуха. Поскольку при испарении жидкости температура понижается, то показания термометров будут разными.



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

Рис. 105

Если воздух в помещении содержит насыщенный пар, то термометры покажут одинаковую температуру, так как вода с влажного термометра не будет испаряться. Чем дальше воздух от состояния насыщения, тем интенсивнее происходит процесс испарения, тем соответственно больше разность показаний термометров.

Зная показания сухого термометра и разность показаний сухого и влажного термометров, можно определить относительную влажность воздуха по психрометрической таблице (см. рис. 105).

**3. Значение влажности.** Влажность воздуха играет большую роль в жизни человека, животных и растений. Нормальной влажностью жилых помещений считают 60%, так как наиболее комфортно человек себя чувствует при относительной влажности воздуха 40—60%. Если влажность меньше, то это ведёт к усиленному испарению воды из организма и высыханию слизистой оболочки носа, горла, лёгких, что повышает вероятность простудных заболеваний. В этих случаях необходимо увлажнять воздух в жилых и служебных помещениях. При низкой влажности быстро испаряется влага, накопленная растениями, что ведёт к их высыханию.

От влажности зависит климат, так как влажностью определяется количество осадков, образование тумана и т. п. Большое значение имеет знание влажности воздуха для метеорологических наблюдений, для предсказания погоды.

## Вопросы для самопроверки

1. Дайте определение абсолютной влажности воздуха.
2. Каков физический смысл относительной влажности воздуха?
3. Как измеряют влажность воздуха с помощью гигрометра?
4. Как измеряют влажность воздуха с помощью психрометра?
5. Чему равна влажность воздуха, если показания сухого и влажного термометров психрометра совпадают?
6. Как влияет влажность воздуха на жизнь живых организмов?

## Упражнение 26

1. При какой температуре — 15 или 20 °С — пар ближе к насыщению, если его парциальное давление при этих температурах одинаково?
2. Относительная влажность воздуха, содержащегося в комнате, 60%. Какова абсолютная влажность воздуха, если в комнате поддерживается температура 20 °С?
3. Сухой термометр психрометра показывает температуру 20 °С, а влажный — 14 °С. Какова относительная и абсолютная влажности воздуха?

## § 37. Применение газов

**1. Применение сжатого воздуха.** Широкое применение в технике имеют инструменты, которые работают на сжатом воздухе. Такие инструменты называют *пневматическими*. К ним относятся отбойные молотки, буры, разбрызгиватели краски (пульверизаторы) и др.

На рисунке 106 показано устройство отбойного молотка. Он представляет собой цилиндр 1, в котором ходит поршень 2. В цилиндр по шлангу 3 подаётся сжатый воздух, который направляется поочерёдно то в верхнюю, то в нижнюю часть цилиндра и давит на поршень. Поршень при этом совершает быстрое возвратно-поступательное движение и передаёт импульс молотку 4, который внедряется в породу (уголь, камень). Порода разрушается, образуя лунки.

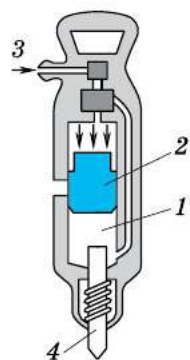


Рис. 106

Сжатый воздух используют в тормозных устройствах транспорта. Пневматический тормоз (рис. 107) работает следующим образом. Цилиндр 1 с поршнем 2 соединён с трубой 3, по которой поступает сжатый воздух, и с резервуаром 4, где воздух накапливается. Поршень соединён с тормозной колодкой 5. При одинаковом давлении на поршень с обеих сто-



рон тормозная колодка отжата от колеса. Если открыть тормозной кран *б*, то сжатый воздух устремится в атмосферу. Под давлением воздуха в резервуаре клапан *7* закроется, и на поршень слева, т. е. со стороны воздуха в резервуаре, будет действовать большее давление, чем справа. Тормозная колодка прижмётся к колесу. Если теперь закрыть тормозной кран *б*, то сжатый воздух будет поступать в цилиндр и равенство давлений на поршень справа и слева восстановится.

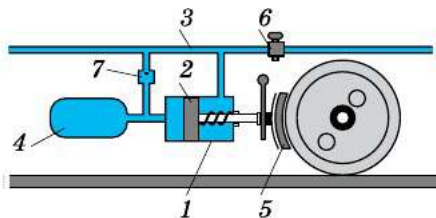


Рис. 107

Сжатый воздух, смешанный с песком, используют для очистки стен перед их окраской. В специальном так называемом пескоструйном аппарате под давлением находится смесь сжатого воздуха и песка, которая выходит из него, если открыть клапан. Струя воздуха с песком из-за разности давлений вырывается из аппарата с большой скоростью.

Сжатый воздух используется в метро, троллейбусах, автобусах для открывания дверей.

**2. Получение и применение сжиженных газов.** В технике широко применяют чистые газы. Так, кислород используют в доменных процессах, аргон и неон используют для заполнения электрических ламп, трубок для рекламы, азот — для получения аммиака и т. п. В смеси с ацетиленом кислород используют для сварки и резки металлов.

Чистые газы можно получить из воздуха. Для этого воздух в жидком состоянии разделяют на составляющие его газы. При превращении жидкого воздуха в пар сначала испаряются газы, имеющие более низкую температуру кипения: неон, азот, а затем аргон, кислород и др.

Получение жидкого воздуха основано на его охлаждении при быстром расширении. Воздух, вошедший в компрессор *К* (рис. 108), сжимается и поступает в змеевик *З*. В змеевике он охлаждается водой и поступает в расширитель *Д* (детандер).

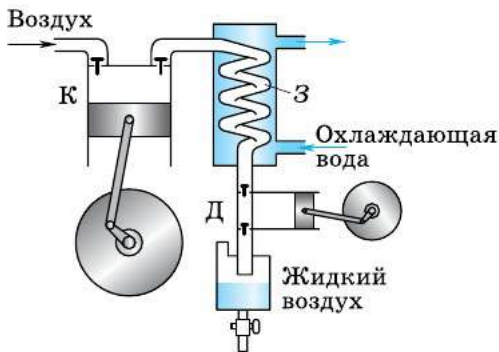


Рис. 108

В нём воздух, расширяясь и совершая работу, охлаждается до температуры ниже критической. При обратном ходе поршня воздух конденсируется и собирается в сосуде.

В современном устройстве для получения жидкого воздуха, предложенном русским физиком *Петром Леонидовичем Капицей* (1894—1984), вместо цилиндра с возвратно-поступательным движением поршня детандера применяют турбину, которую вращают сжатым воздухом (турбодетандер).

Главная задача при сжижении газов сводится к получению низких температур. В настоящее время получен жидкий гелий, имеющий температуру 4,2 К. Чтобы его получить, гелий предварительно охлаждают жидким водородом (20 К).

Если испаряющийся гелий быстро откачивать, то он интенсивно кипит при пониженном давлении; при этом температуру можно понизить до 1 К. Более низкие температуры получают иными, достаточно сложными способами. В одном из исследований атомы были охлаждены до температуры 0,18 мкК.

Сжиженные газы быстро испаряются, поэтому их сложно хранить. Обычно для этой цели используют сосуды Дьюара (термосы) — сосуды с двойными стенками, между которыми создан вакуум, что обеспечивает теплоизоляцию вещества, находящегося в сосуде.

## Вопросы для самопроверки

1. Приведите примеры использования сжатого воздуха.
2. Как устроен и как работает пневматический тормоз?
3. Как устроен и как работает пневматический молоток?
4. Как осуществляют сжижение воздуха?
5. Каков принцип получения низких температур при сжижении газов?

## § 38. Принципы работы тепловых двигателей

**1. Основные части теплового двигателя.** Одним из главных направлений научно-технического прогресса является развитие энергетики, в том числе теплоэнергетики. Теплоэнергетика — это отрасль народного хозяйства, связанная с использованием внутренней энергии тел. Для того чтобы использовать внутреннюю энергию, нужны специальные устройства, которые могли бы за счёт этой энергии совершать работу.

**Устройство, совершающее механическую работу за счёт внутренней энергии топлива, называют тепловым двигателем.**



ную работу за счёт первоначально полученного запаса внутренней энергии. Поэтому отработанный пар должен вернуться в исходное состояние и снова нагреться. Таким образом, для того чтобы двигатель работал непрерывно, он должен каждый раз возвращаться в исходное состояние, т. е. совершать **круговой процесс**, или **цикл**. Такой двигатель называют **циклическим**.

**3. Холодильник.** Чтобы вернуть рабочее тело в исходное состояние, его необходимо сжать. Если сжатие производить при тех же значениях давления, что и расширение, то работа сжатия будет равна работе расширения, а полная работа окажется равной нулю. Чтобы получить полную работу, отличную от нуля, нужно производить сжатие при меньших значениях давления, чем расширение.

Процесс сжатия следует осуществлять при более низкой температуре, чем расширение. Поэтому рабочее тело необходимо охладить. Для этого его приводят в контакт с телом, температура которого  $T_2 < T_1$ . Такое тело называют **холодильником**. Для паровой турбины холодильником является атмосфера или специальное устройство для охлаждения отработанного пара, для двигателя внутреннего сгорания — охлаждающая жидкость или атмосфера.

Следовательно, только часть количества теплоты  $Q_1$ , полученного от нагревателя, превращается в полезную механическую работу  $A$ . Остальное количество теплоты  $Q_2$  передаётся холодильнику.

На рисунке 109 работа сжатия соответствует площади фигуры под кривой  $BbA$ . Тогда полная работа, равная разности между работой расширения и работой сжатия, соответствует площади фигуры, ограниченной кривой  $AaBbA$ .

Таким образом, для обеспечения циклической работы теплового двигателя необходимы нагреватель с температурой  $T_1$ , холодильник с температурой  $T_2$  и рабочее тело. Рабочее тело получает от нагревателя количество теплоты  $Q_1$  и отдаёт холодильнику количество теплоты  $Q_2$ . Разность  $Q_1 - Q_2$  равна полезной работе:

$$A = Q_1 - Q_2.$$

*Итак, в циклически работающей тепловой машине невозможно преобразовать в механическую работу всё количество теплоты, полученное от нагревателя.*

Для того чтобы вернуть рабочее тело двигателя в исходное состояние, его необходимо сжать, затратив при этом энергию от

внешнего источника, поскольку, как следует из второго закона термодинамики, оно самопроизвольно в это состояние вернуться не может.

Этот вывод лежит в основе иной формулировки второго закона термодинамики: *невозможно осуществить такой периодический процесс, единственным результатом которого было бы получение работы за счёт энергии, взятой от одного источника.*

**4. Коэффициент полезного действия (КПД) теплового двигателя.** Эффективность работы теплового двигателя определяется его КПД.

Коэффициентом полезного действия называют отношение полезной работы  $A$  к количеству теплоты, полученному рабочим телом от нагревателя  $Q_1$ .

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

или

$$\eta = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1}.$$

Так как  $\frac{Q_2}{Q_1}$  меньше единицы, то коэффициент полезного действия никогда не может быть равным единице ( $\eta < 1$ ).

**5. Идеальный тепловой двигатель.** Французский учёный Карно, решая проблему повышения эффективности тепловых двигателей, предложил модель идеального теплового двигателя. Рабочим телом в нём служит идеальный газ. По первому закону термодинамики при изотермическом процессе всё полученное количество теплоты переходит в работу газа, при адиабатном процессе в работу газа переходит внутренняя энергия газа. При изохорном процессе работа не совершается, при изобарном — на совершение работы идёт только часть полученного рабочим телом количества теплоты, другая часть расходуется на изменение его внутренней энергии.

На рисунке 110 приведён график зависимости давления от объёма в идеальном тепловом двигателе Карно, называемый **циклом Карно**.

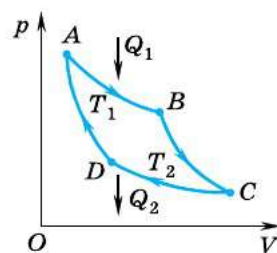


Рис. 110

Участок графика  $AB$  соответствует изотермическому расширению рабочего тела. При этом оно получает от нагревателя, температура которого  $T_1$ , количество теплоты  $Q_1$ . Участок графика  $BC$  соответствует адиабатному расширению рабочего тела, при этом оно охлаждается до температуры  $T_2$ , равной температуре холодильника. Затем рабочее тело изотермически сжимается (участок графика  $CD$ ) при температуре  $T_2$ . При этом холодильнику передаётся количество теплоты  $Q_2$ . И наконец, рабочее тело адиабатно сжимается, его температура при этом повышается до температуры нагревателя  $T_1$  (участок графика  $DA$ ).

**6. КПД идеального теплового двигателя.** КПД идеального теплового двигателя можно рассчитать по формуле:

$$\eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1},$$

или

$$\eta = 1 - \frac{T_2}{T_1}.$$

Карно доказал, что КПД любого реального теплового двигателя не может быть больше КПД идеального теплового двигателя, имеющего те же значения температуры нагревателя и холодильника.

КПД теплового двигателя всегда меньше единицы, даже если устранены все потери энергии. Это связано с тем, что некоторое количество теплоты всегда передаётся холодильнику.



**Никола Леонар Сади Карно** (1796—1832) — французский физик и инженер, один из создателей термодинамики. Известен своими работами в области термодинамики. Сформулировал второе начало термодинамики, доказав, что полезная работа совершается при передаче энергии от более нагретого тела к более холодному; ввёл понятие идеального цикла тепловой машины, вычислил для него КПД и доказал, что этот коэффициент является максимальным для любого реального теплового двигателя.



Совершенствуя механические или электрические двигатели, их КПД стремятся приблизить к 100%, уменьшая потери энергии. При совершенствовании тепловых двигателей решается задача приближения их КПД не к 100%, а к КПД идеального двигателя Карно, работающего при тех же температурах нагревателя и холодильника. А он тем больше, чем выше температура нагревателя и ниже температура холодильника. Поэтому для повышения КПД теплового двигателя стремятся повысить температуру нагревателя и понизить температуру холодильника. Сложность заключается в том, что повышение температуры нагревателя ограничивается свойствами применяемых в конструкции двигателей сплавов. В частности, они должны быть теплостойкими и жаропрочными. Кроме того, сплавы должны обладать высокой механической прочностью и выдерживать высокие давления, не разрушаясь и сохраняя свои упругие свойства.

В настоящее время температура пара, используемого в паровых турбинах, достигает 580 °С. КПД такой турбины составляет 40—41%. КПД идеального теплового двигателя при температуре нагревателя 580 °С и холодильника 27 °С равен 65%.

### Вопросы для самопроверки

1. Какие преобразования энергии происходят в тепловом двигателе?
2. Как определить работу газа по графику зависимости давления газа от его объёма?
3. Каково назначение холодильника в тепловом двигателе?
4. Чему равен КПД реального теплового двигателя? Может ли КПД теплового двигателя быть равным 100%, если устранить все потери энергии?
5. Что собой представляет цикл Карно? Почему адиабатный и изотермический процессы являются энергетически наиболее выгодными?
6. Чему равен КПД идеального теплового двигателя?
7. Как повысить КПД реального теплового двигателя?

### Упражнение 27

1. Чему равно количество теплоты, полученное тепловым двигателем от нагревателя, если он отдал холодильнику количество теплоты 400 кДж, а его КПД составляет 40%?
2. Чему должна быть равна температура холодильника идеального теплового двигателя, чтобы при температуре нагревателя 127 °С его КПД был равен 60%?

## § 39. Тепловые двигатели

**1. Паровые турбины.** В настоящее время существенная часть электроэнергии в нашей стране вырабатывается на электростанциях. На тепловых электростанциях роторы генераторов приводятся во вращение паровыми турбинами. В паровых турбинах механическая работа совершается за счёт энергии струи пара. С устройством турбины вы знакомились в курсе физики основной школы.

Повышение мощности турбин — важная инженерная задача. В настоящее время сконструированы турбины мощностью 1,2 ГВт; проектируются турбины мощностью 1,8 ГВт.

**2. Двигатели внутреннего сгорания.** Двигатель внутреннего сгорания — один из наиболее распространённых тепловых двигателей. Его преимуществом по сравнению с другими двигателями является то, что топливо сгорает внутри цилиндра двигателя. Это делает его более дешёвым, менее металлоёмким, более экономичным.

Существует два типа двигателей внутреннего сгорания: *карбюраторные* и *дизельные*. В карбюраторном двигателе горючая смесь (смесь топлива с воздухом) готовится вне двигателя в специальном устройстве (карбюраторе) и из него поступает в двигатель. В дизельном двигателе горючая смесь готовится в самом двигателе.

Как вам известно, двигатель внутреннего сгорания состоит из цилиндра 1, в котором ходит поршень 2, соединённый с шатуном 3 (рис. 111). Шатун насажен на коленчатый вал 4 и приводит его во вращение при поступательном движении поршня в цилиндре. В крышке цилиндра имеются два отверстия, в которые вставлены клапаны 5 и 6. Через один из них в цилиндр поступает горючая смесь, через другой выходят отработанные газы.

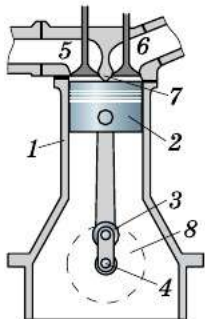


Рис. 111

В четырёхтактном двигателе внутреннего сгорания рабочий цикл состоит из следующих тактов: I — впуск; II — сжатие; III — рабочий ход; IV — выпуск. На рисунке 112 представлены графики зависимости давления горючей смеси от объёма для полного цикла работы карбюраторного двигателя внутреннего сгорания.

Во время первого такта происходит движение поршня вниз от *верхней мёртвой точки* в *нижнюю мёртвую точку*. При этом в цилиндр через впускной клапан 5 поступает горючая смесь. Объём сме-

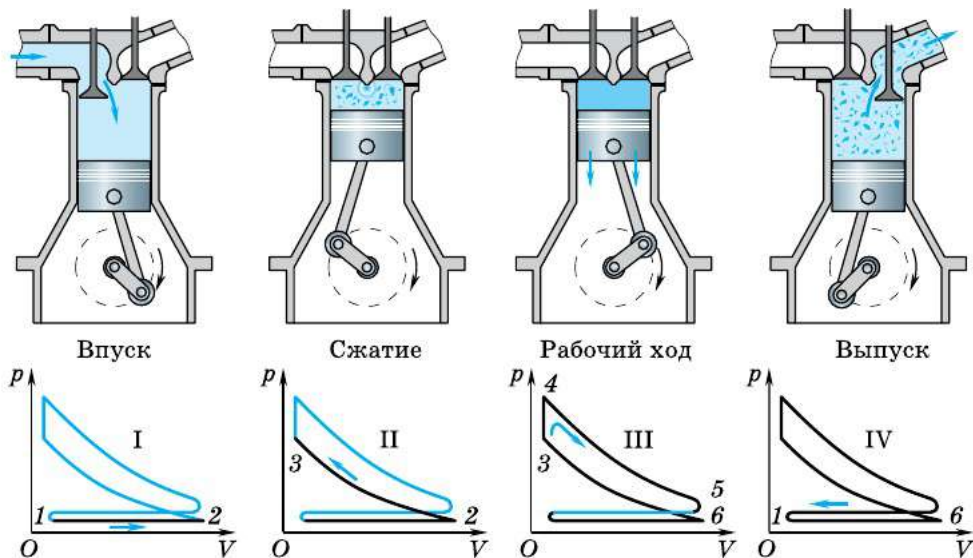


Рис. 112

си увеличивается при постоянном давлении. На графике этому процессу соответствует линия 1—2.

Во время второго такта происходит адиабатное сжатие горючей смеси (линия 2—3 на графике). При этом температура горючей смеси резко возрастает и достигает 300—350 °С.

При приближении поршня к верхней мёртвой точке в свече зажигания 7 карбюраторного двигателя проскакивает искра и горючая смесь воспламеняется. Сгорание смеси происходит настолько быстро, что поршень не успевает заметно переместиться и процесс можно считать изохорным ( $V = \text{const}$ ). На графике этому процессу соответствует линия 3—4.

При сгорании смеси выделяется большое количество теплоты, резко повышаются давление и температура газа, в результате чего происходит его адиабатное расширение (рабочий ход поршня). Расширяясь, газ толкает поршень и соединённый с ним коленчатый вал, совершает механическую работу. При этом газ охлаждается, так как часть его внутренней энергии идёт на совершение работы. На графике этому процессу соответствует линия 4—5.

После того как поршень придёт в нижнюю мёртвую точку, давление в цилиндре уменьшится (линия 5—6 на графике). При движении поршня вверх открывается выпускной клапан 6 и начинается выпуск отработанных газов (линия 6—1). Затем цикл повторяется.

Из четырёх тактов только третий является рабочим. Для того чтобы поршень переходил нижнюю и верхнюю мёртвые точки, на коленчатый вал насаживают массивный маховик 8. Благодаря его инертности коленчатый вал сразу не прекращает вращение, и поршень проходит мёртвые точки.

Обычно двигатель состоит из четырёх или восьми цилиндров. В четырёхцилиндровом двигателе в каждом из цилиндров поочередно осуществляется рабочий ход, и коленчатый вал всё время получает энергию от одного из поршней, что обеспечивает равномерное его вращение.

В настоящее время четырёхтактные карбюраторные двигатели устанавливаются в основном на автомобилях. Мощность автомобильных карбюраторных двигателей составляет десятки киловатт: автомобиля «Ока» — 22 кВт, автомобиля «Волга» — 77 кВт, а их КПД не более 30%. Невысокий КПД объясняется тем, что степень сжатия горючей смеси нельзя сделать слишком высокой, так как при сильном сжатии её температура значительно возрастает и она может самовоспламениться. Для различных легковых автомобилей степень сжатия, т. е. отношение первоначального объёма горючей смеси к её объёму при сжатии, составляет от 7,2 до 9.

В отличие от карбюраторных, в дизельном двигателе сжимается воздух, и степень сжатия обычно равна 14—16. Соответственно и температура воздуха может достигать 500—600 °С. График зависимости давления от объёма для полного цикла работы дизельного двигателя приведён на рисунке 113.

В конце такта сжатия в цилиндр впрыскивается топливо, которое при такой температуре самовоспламеняется и довольно медленно сгорает (линия 3—4 на рис. 113). Этот процесс можно считать изобарным. Затем следует адиабатное расширение (линия 4—5) и изохорное охлаждение (линия 5—6), после чего открывается выпускной клапан и продукты сгорания выбрасываются. Затем цикл повторяется.

Поскольку температура в цилиндре дизельного двигателя выше, чем в цилиндре карбюраторного, то выше и его КПД. Он составляет примерно 45%.

Дизельные двигатели внутреннего сгорания ввиду их большей экономичности исполь-

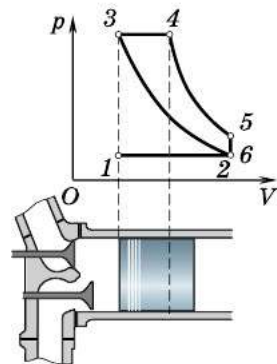


Рис. 113

зуются как в автомобилях, так и в тракторах, теплоходах и тепловозах. Мощность таких двигателей достигает нескольких тысяч киловатт.

**3. Реактивные двигатели.** В основе действия реактивного двигателя лежат законы реактивного движения. Газы, образующиеся в нём при сгорании топлива, выбрасываются из двигателя, создавая реактивную тягу.

Все реактивные двигатели состоят из бака с топливом, камеры, где оно сгорает, и устройств, обеспечивающих подачу топлива в камеру и истечение продуктов сгорания. Существует две группы реактивных двигателей: двигатели, работающие на твёрдом топливе, и двигатели, работающие на жидком топливе.

Пороховая ракета является примером простейшего двигателя, работающего на твёрдом топливе: порох, сгорая в камере, образует газы, которые выбрасываются из ракеты. В жидкостных реактивных двигателях сгорают жидкие горючие вещества (нефтепродукты, спирт и т. п.). Примером такого двигателя является *турбореактивный двигатель*, установленный на самолётах. На рисунке 114 показана схема устройства такого двигателя.

Турбореактивный двигатель заключён в цилиндрический корпус, в переднее отверстие входит воздух и попадает в компрессор, в котором сжимается. Сжатие осуществляется с помощью специальных лопаток, которые приводятся в движение газовой турбиной, установленной в задней части двигателя. Сжатый воздух поступает в камеру, в которую впрыскивается горючее (топливо). Горючая смесь воспламеняется, образуются газы, имеющие высокую температуру и высокое давление. Они приводят в действие турбину и выходят из сопла. Газы, вылетающие из сопла, имеют

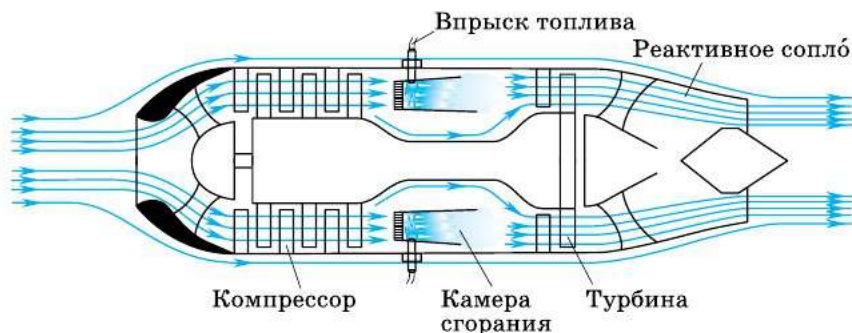


Рис. 114

значительную скорость и благодаря этому сообщают самолёту большой импульс.

Мощность такого двигателя достигает 40 МВт, а КПД равен 30%.

## Вопросы для самопроверки

1. Какие энергетические преобразования происходят при работе паровой турбины?
2. Что является нагревателем, рабочим телом и холодильником паровой турбины?
3. Как устроен двигатель внутреннего сгорания? Что является рабочим телом, нагревателем и холодильником в двигателе внутреннего сгорания?
4. Из каких тактов состоит работа двигателя внутреннего сгорания? Поясните работу карбюраторного и дизельного двигателей внутреннего сгорания, используя графики на рисунках 112 и 113.
5. Чем отличается карбюраторный двигатель внутреннего сгорания от дизельного?
6. Каковы устройство и принцип работы турбореактивного двигателя?

## § 40. Работа холодильной машины

**1. Принцип работы холодильной машины.** В тепловых двигателях работа совершается за счёт энергии, полученной от нагревателя. При этом количество теплоты, полученное от нагревателя, частично идёт на совершение работы, а частично передаётся холодильнику.

Возникает вопрос, как осуществить обратный процесс, т. е. как передать энергию от менее нагретого тела более нагретому. Второй закон термодинамики запрещает такой процесс, если он единственный. Однако он возможен, если совершается за счёт работы внешних сил.

Процесс передачи энергии от холодного тела к горячему происходит в **холодильных машинах**. Принципиальная схема холодильной установки изображена на рисунке 115. От холодильной камеры количество теплоты  $Q_2$  поступает к рабочему телу и при совершении внешними силами работы  $A$  нагретому телу передаётся количество теплоты  $Q_1$ . Таким образом,  $Q_1 = Q_2 + A$ .

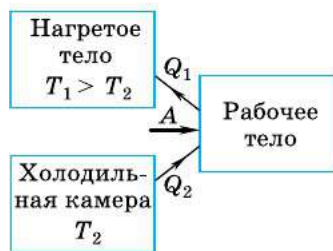


Рис. 115

Эффективность холодильной машины определяется возможностью забрать большее количество теплоты от холодильной камеры за счёт меньшей работы внешних сил, т. е. КПД холодильной машины равен:

$$\eta_x = \frac{Q_2}{A} = \frac{Q_2}{Q_1 - Q_2}.$$

Идеальная холодильная машина работает по обратному циклу Карно. Рабочее тело проходит в этом случае все те состояния, что и в прямом цикле, но только в обратном направлении.

КПД идеальной холодильной машины равен:

$$\eta_x = \frac{T_2}{T_1 - T_2}.$$

**2. Компрессорная холодильная машина.** Рассмотрим работу компрессорной холодильной машины. В ней в качестве рабочего тела обычно используют пары жидкостей, кипящих при низких температурах: аммиак, фреон и т. п.

Компрессор нагнетает пары аммиака под высоким давлением в змеевик *A* (рис. 116). При сжатии пары аммиака нагреваются, и в сосуде *B* они охлаждаются водой. Вода при этом получает количество теплоты  $Q_2$ , а пары аммиака превращаются в жидкость. Из змеевика *A* аммиак через вентиль поступает в змеевик *C* (испа-

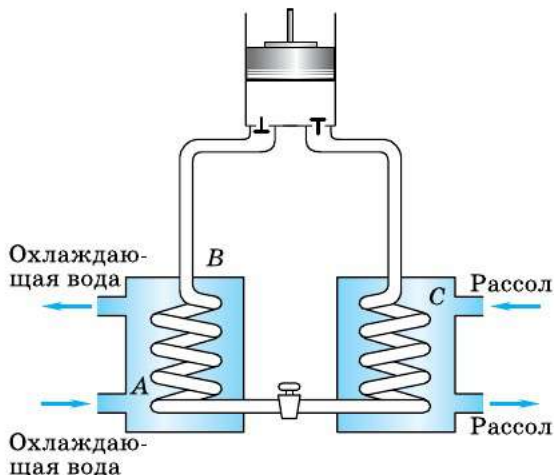


Рис. 116

ритель). Часть аммиака здесь испаряется, и его температура понижается до  $10^{\circ}\text{C}$ . Из испарителя аммиак отсасывается компрессором.

При испарении аммиак берёт от окружающего испаритель соляного раствора (рассола) количество теплоты  $Q_1$ , вследствие чего он охлаждается до  $8^{\circ}\text{C}$ . Таким образом, раствор играет роль холодного тела, отдающего энергию нагретому телу.

В некоторых современных холодильниках камера представляет собой полость с двойными стенками, в которой находится испаритель. В холодильнике такой конструкции отсутствуют движущиеся механические части. Циркуляция раствора аммиака осуществляется за счёт разности плотностей, обусловленной разностью температур.

**3. Тепловые двигатели и охрана окружающей среды.** Широкое использование тепловых двигателей в народном хозяйстве приводит к загрязнению окружающей среды. Так, при работе автомобильных двигателей происходит выброс продуктов сгорания в атмосферу. Они образуют смог, содержащий вредные для здоровья вещества. Поэтому ведутся работы по созданию экологически чистых двигателей, в частности электрических. Сложность заключается в разработке достаточно мощного источника электрической энергии, способного функционировать без подзарядки на расстоянии 300—500 км. Ведутся исследования по изысканию возможностей использования в качестве автомобильного топлива водорода, при сгорании которого образуется безвредная вода.

Вредное влияние на окружающую среду оказывают и тепловые электростанции. Это связано с тем, что в качестве топлива на них используется уголь. При сжигании угля в атмосферу попадают частицы сажи и других вредных веществ. Поэтому стоит задача превращения угля в жидкое или газообразное топливо, которое лучше сгорает. Уменьшить загрязнение атмосферы позволяет установка на электростанциях очистных сооружений.

## Вопросы для самопроверки

1. По какой формуле вычисляется КПД холодильника?
2. Как работает компрессорная холодильная машина?
3. Какие меры предпринимаются для решения экологических проблем, связанных с работой тепловых двигателей?



## Упражнение 28

1. Каково назначение электродвигателя в домашнем холодильнике? Становится ли в комнате холоднее при работе холодильника?
2. Заполните таблицу 23, систематизирующую сведения о вкладе отечественных учёных в развитие представлений о строении вещества, используя интернет-ресурсы.

Таблица 23

Фамилия учёного	Годы жизни	Основные исследования и их результаты

## Самоконтроль

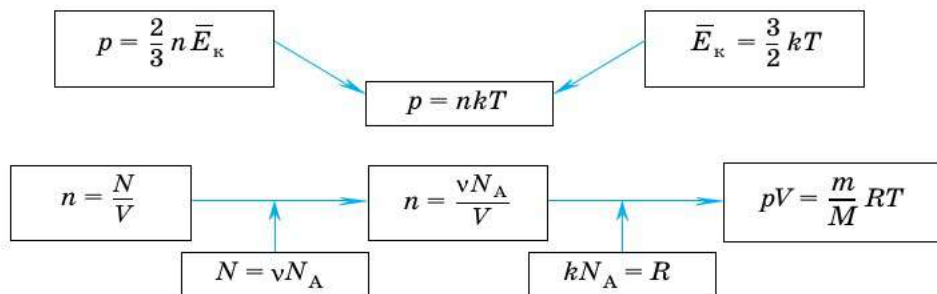
Выполните в рабочей тетради тренировочный тест 6.



### Основное в главе

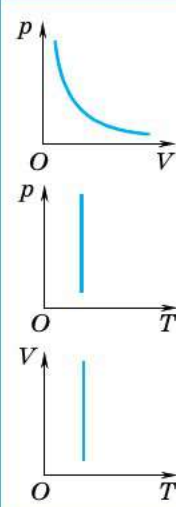
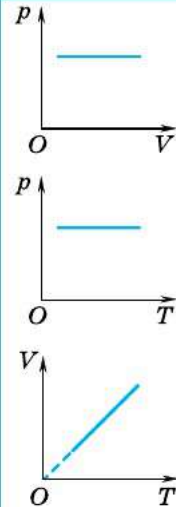
1. Для изучения свойств газов была построена простейшая модель — идеальный газ. Идеальным газом называют газ, молекулы которого представляют собой материальные точки, не взаимодействующие между собой.

2. Уравнение состояния идеального газа было получено из основного уравнения молекулярно-кинетической теории идеального газа и формулы, связывающей среднюю кинетическую энергию теплового движения молекул и термодинамическую температуру.



### 3. Газовые законы (табл. 24).

Таблица 24

Название процесса	Неизменные величины	Изменяющиеся величины	Математическая запись закона	Закон	График процесса	Первый закон термодинамики
Изотермический	$m, T$	$p, V$	$pV = \text{const};$ $p_1V_1 = p_2V_2$	Бойля — Мариотта		$\Delta U = 0;$ $Q = A$
Изобарный	$m, p$	$V, T$	$\frac{V}{T} = \text{const};$ $\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2}$	Гей-Люссака		$Q = \Delta U + A$

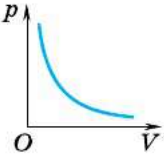
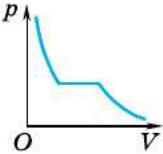
Название процесса	Неизменные величины	Изменяющиеся величины	Математическая запись закона	Закон	График процесса	Первый закон термодинамики
Изохорный	$m, V$	$p, T$	$\frac{p}{T} = \text{const};$ $\frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2}$	Шарля		$A = 0;$ $Q = \Delta U$
Адиабатный	$M, m$					$Q = 0;$ $\Delta U = -A$
Произвольный	$m$	$p, V, T$	$\frac{pV}{T} = \text{const};$ $\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2}$	Уравнение Клапейрона		
		$M, m,$ $p, V, T$	$pV = \frac{m}{M} RT$	Уравнение Менделеева — Клапейрона		

4. Свойства идеального газа изучались с помощью термодинамического и статистического методов, которые дополняют друг друга.

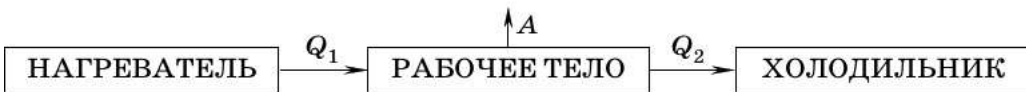


5. Сравнение свойств двух моделей газа: идеального и реального (табл. 25).

Таблица 25

	<i>Идеальный газ</i>	<i>Реальный газ</i>
<i>Описание модели</i>	Молекулы — материальные точки, не взаимодействуют между собой	Молекулы имеют размеры и взаимодействуют между собой
<i>Уравнение состояния</i>	Уравнение Менделеева — Клапейрона $pV = \frac{m}{M} RT$	
<i>Зависимость давления от объёма при постоянной температуре</i>		
<i>Внутренняя энергия</i>	Равна кинетической энергии теплового движения молекул и зависит только от температуры	Равна сумме кинетической энергии теплового движения и потенциальной энергии взаимодействия молекул; зависит от температуры и объёма

## 9. Основные части теплового двигателя.



10. КПД реального теплового двигателя:  $\eta = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1}$ .

КПД идеального теплового двигателя:  $\eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1}$ .

## 11. Характеристики тепловых двигателей (табл. 28).

Таблица 28

<i>Вид двигателя</i>	<i>Коэффициент полезного действия, %</i>	<i>Мощность</i>	<i>Область применения</i>
Двигатель внутреннего сгорания (автомобильный)	До 30	Около 60 кВт	Автомобили, мотоциклы, сельскохозяйственная техника, автобусы, теплоходы, тепловозы и др.
Паровая турбина	До 45	До 1200 МВт	Турбогенераторы



## **Свойства твёрдых тел и жидкостей**

*В предыдущих главах вы рассмотрели свойства такой макроскопической системы, как газ, при этом постепенно переходили от простой модели — модели идеального газа — к более сложной — модели реального газа. Теперь вы будете изучать свойства твёрдых тел, поступая аналогичным образом: сначала познакомитесь со строением и свойствами идеального кристалла, затем рассмотрите свойства реального кристалла, а после этого строение и свойства достаточно сложной макроскопической системы — жидкости.*

### **§ 41. Идеальный кристалл**

**1. Строение твёрдого кристаллического тела.** Вас окружает множество тел, которые в обычных условиях находятся в твёрдом состоянии, или, иначе говоря, твёрдых тел. Все они имеют разное строение. Так, разную структуру имеют медь и алюминий, оксид кремния и хлорид натрия (поваренная соль), металлы и пластмассы, стекло и дерево. Однако среди всего многообразия твёрдых тел можно выделить весьма многочисленную группу тел, имеющих правильную форму. Это кристаллы или твёрдые тела, находящиеся в кристаллическом состоянии. На рисунке 117 приведены примеры кристаллов.

Правильная внешняя форма кристаллов объясняется их упорядоченной структурой, при которой атомы, молекулы или ионы, входящие в состав кристалла, занимают определённые положения в пространстве.

Предположение о том, что правильная форма кристаллов связана с их внутренним строением, было сделано в середине XIX в. В 1912 г. немецкий физик **Макс Феликс Теодор фон Лауэ** (1879—1960) предложил исследовать строение кристаллов с помощью рентгеновских лучей. Этот и другие методы структурного анализа позволили в настоящее время изучить кристаллическую структуру более чем 30 000 веществ, от кристаллов химических элементов до сложнейших биологических кристаллов.



Рис. 117

Было установлено, что частицы, составляющие кристалл, расположены на некоторых расстояниях друг от друга в определённом порядке. Они связаны между собой силами взаимодействия, имеющими электромагнитную природу.

Частицы, участвуя в тепловом движении, совершают колебания относительно некоторых положений равновесия. Совокупность точек, соответствующих положениям равновесия частиц, и воображаемых линий, соединяющих их, называют **кристаллической решёткой**. Разные кристаллические решётки соответствуют разным веществам.

Кристаллическая решётка состоит из элементарных ячеек, которые представляют собой повторяющиеся элементы структуры. Так, элементарной ячейкой пространственной решётки кристалла поваренной соли является куб (рис. 118, а), а меди — гранецентрированный куб (рис. 118, б). Более сложную элементарную ячейку имеет кристалл натрия. Это тоже куб, но объёмно-центрированный (рис. 118, в). Кристалл магния имеет форму гексагональной (шестигранной) призмы (рис. 118, г). На рисунке 118 шарики обозначают точки равновесного положения атомов, а линии, соединяющие шарики, — силы взаимодействия между ними.

В таблице 29 приведены параметры элементарной ячейки некоторых кристаллов и биохимических соединений.

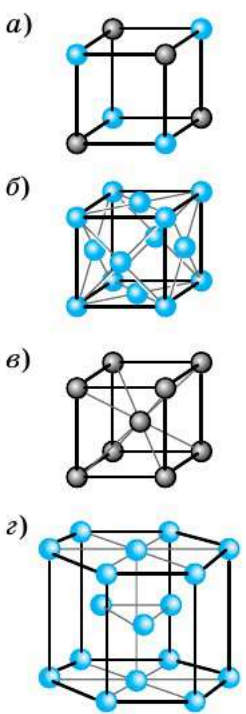


Рис. 118

Вид кристаллов и биохимических соединений	Ребро элементарной ячейки, $10^{-8}$ м	Число атомов в элементарной ячейке
Химические элементы, простейшие соединения	5—8	<10
Неорганические соединения, простые молекулярные соединения	5—15	До 100
Сложные органические соединения	20—30	До 1000
Белки	До 100—200	$10^3$ — $10^5$
Вирусы	До 2000	$10^6$ — $10^9$

В идеальном кристалле правильное расположение элементарных ячеек повторяется для сколь угодно удалённых атомов. Говорят, что в нём наблюдается *дальний порядок* в расположении частиц.

Частицами, из которых состоят кристаллы, могут быть атомы, молекулы, ионы. Соответственно существуют атомные, молекулярные, ионные кристаллы и ещё выделяют особо металлические кристаллы. Кристаллы различаются не только типом частиц, находящихся в узлах кристаллической решётки, но и природой и интенсивностью взаимодействия частиц.

**2. Полиморфизм.** Если атомами одного и того же химического элемента образованы разные кристаллические решётки, получаются разные вещества. На рисунке 119, *а* представлена пространственная решётка кристалла алмаза, а на рисунке 119, *б* — графита, который также состоит из атомов углерода. Соответственно свойства вещества в состояниях с разной кристаллической структурой различны. Так, алмаз значительно твёрже и прочнее графита. Способность вещества существовать в состояниях с разной кристаллической структурой называют **полиморфизмом**.

Помимо углерода, полиморфизмом обладает олово. Белое олово, имеющее объёмно-центрированную четырёхгранную решётку, — пластичный металл, а серое олово (порошок) с ал-

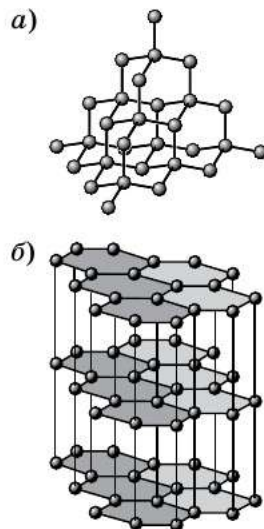


Рис. 119



мазоподобной тетрагональной решёткой — хрупкий полупроводник.

При определённых условиях возможны полиморфные превращения вещества. Так, белое олово при температуре ниже  $13\text{ }^{\circ}\text{C}$  может превратиться в серое. При этом происходит изменение структуры вещества.

Из графита можно получить алмаз при очень высокой температуре — более  $2000\text{ }^{\circ}\text{C}$  и очень больших давлениях — более  $10^{12}\text{ Па}$ .

## Вопросы для самопроверки

1. Каковы особенности строения кристаллического твёрдого тела?
2. Что собой представляет кристаллическая решётка?
3. Какие типы кристаллических решёток вам известны?
4. Что такое полиморфизм? Приведите примеры полиморфизма.

## § 42. Анизотропия свойств кристаллических тел

**1. Монокристаллы и поликристаллы.** Следствием упорядоченного внутреннего строения кристаллов является зависимость их свойств от выбранного направления, или **анизотропия свойств**. Анизотропия присуща лишь **монокристаллам**, т. е. одиночным кристаллам. Невооружённым глазом можно увидеть, например, монокристаллы поваренной соли, сахарного песка, кварца. Кристаллы, приведённые на рисунке 117, являются монокристаллами.

Чаще твёрдое тело представляет собой множество сросшихся кристаллов. Такое твёрдое кристаллическое тело называют **поликристаллом**. Примером поликристаллического тела может служить любой металл. Физические свойства поликристалла не зависят от выбранного в нём направления. Говорят, что поликристалл **изотропен**.

**2. Анизотропия теплового расширения.** Различие свойств монокристаллов и поликристаллов хорошо проявляется при тепловом расширении. Поликристаллическое тело расширяется по всем направлениям одинаково, поэтому его температурный коэффициент объёмного расширения в 3 раза больше температурного коэффициента линейного расширения.

Монокристаллы обладают анизотропией теплового расширения, т. е. в разных направлениях расширяются по-разному. Если, например, нагревать шар из монокристалла, то он превратится в эллипсоид. В таблице 30 приведены значения темпе-



ратурных коэффициентов линейного расширения  $\alpha$  по трём взаимно перпендикулярным направлениям для некоторых кристаллов.

Таблица 30

Кристалл	Температура, К	$\alpha_1, 10^{-6} \text{ град}^{-1}$	$\alpha_2, 10^{-6} \text{ град}^{-1}$	$\alpha_3, 10^{-6} \text{ град}^{-1}$
Гипс	313	1,6	42	29
	60	-2	-2	55
Цинк	150	8	8	65
	300	13	13	64
Кальцит	313	-5,6	-5,6	25

Как видно из таблицы, коэффициент линейного расширения монокристалла изменяется в зависимости от температуры и выбранного направления. У гипса и кальцита они по некоторым направлениям принимают даже отрицательные значения. Это означает, что при повышении температуры монокристалл расширяется по одному направлению и сжимается по двум другим.

Существует анизотропия и механической прочности монокристаллов. Например, пластинка слюды легко расслаивается на тонкие листы только вдоль одного направления. Разделить эту пластинку на части по другим направлениям очень трудно.

Электропроводность и оптические свойства многих кристаллов так же зависят от выбранного направления.

**3. Причина анизотропии свойств кристаллов.** Причиной анизотропии свойств монокристаллов является то, что частицы, их образующие, располагаются в определённом порядке. Если выделить в монокристалле несколько направлений, то можно заметить, что в каждом направлении будет располагаться разное число частиц (рис. 120, а). Различие в плотности расположения частиц, а как следствие и в силах взаимодействия в зависимости от выбранного направления и приводят к анизотропии свойств монокристаллов.

В поликристалле кристаллики расположены беспорядочно, поэтому на прямых, проведённых

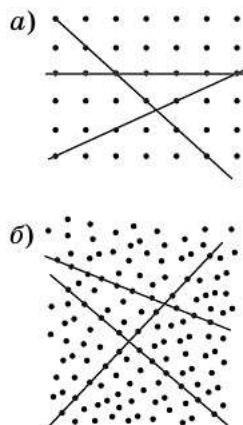


Рис. 120

в разных направлениях, будет находиться примерно одинаковое число частиц (рис. 120, б). Это и определяет независимость свойств поликристалла от направления.

## Вопросы для самопроверки

1. Какие твёрдые тела изотропны, а какие анизотропны? В чём проявляется анизотропия свойств кристаллов?
2. Объясните анизотропию и изотропию свойств кристаллов на основе строения твёрдых тел.
3. Чем объясняется большая прочность алмаза по сравнению с графитом?

## § 43. Деформация твёрдого тела.

### Виды деформации

**1. Упругие и пластические деформации.** Твёрдое тело под действием силы способно изменить свою форму. Подействовав силой на пружину, можно её растянуть (рис. 121) или сжать. Если положить линейку концами на опоры и поставить на её середину груз, то линейка прогнётся (рис. 122). В таких случаях говорят, что пружина и линейка деформировались.

**Деформацией называют изменение формы или объёма тела под действием приложенной к нему силы.**

Если взять стальную линейку и изогнуть её, а затем отпустить, то линейка примет первоначальную форму. Под действием силы линейка деформировалась, а после прекращения действия силы деформация исчезла.

**Деформации, полностью исчезающие после прекращения действия силы, называют упругими.**

Свойство тела восстанавливать форму и объём после прекращения действия силы называют **упругостью**.

Если изогнуть свинцовую пластину и отпустить, то она не восстановит первоначальную форму и останется деформированной.

**Деформации, которые не исчезают в теле после прекращения действия силы, называют пластическими.**

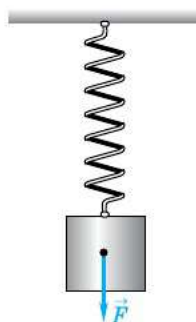


Рис. 121

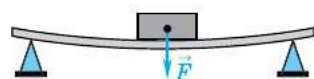


Рис. 122



В теле при этом будет сохраняться **остаточная деформация**. Свойство тел сохранять остаточную деформацию называют **пластичностью**.

Строго говоря, не существует абсолютно упругих и абсолютно пластичных тел, соответственно и деление материалов на упругие и пластичные достаточно условно. Если стальную линейку держать в изогнутом состоянии достаточно долго (несколько лет), то после прекращения действия сил её первоначальная форма не восстановится. Таким образом, проявление пластичности или упругости зависит от значения действующих сил и от времени их действия. Если силы очень велики, то упругий материал будет вести себя как пластичный.

Одни и те же материалы могут быть упругими или пластичными в зависимости от температуры. Так, кусок стали, находящийся при комнатной температуре, упруг, ему трудно придать определённую форму. Если же его сильно нагреть, то сталь станет пластичной и ей можно будет придать любую форму. Пластичный при комнатной температуре свинец становится упругим при температурах ниже  $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

**2. Объяснение упругих и пластических деформаций.** Выясним, как происходит упругая деформация, т. е. как возникают силы упругости. Частицы кристаллического тела располагаются друг относительно друга на определённых расстояниях, и между ними действуют силы притяжения и отталкивания. Когда тело находится в недеформированном состоянии, сумма сил, действующих на каждую частицу со стороны других, равна нулю, а потенциальная энергия частиц минимальна.

Если один конец тела закрепить, а к другому приложить силу, то эта сила сообщит частицам тела ускорение, они придут в движение и сместятся относительно положения равновесия. Пусть, например, тело сжимают с силой  $F$ . Частицы, находящиеся у края тела, приблизятся к частицам в следующем слое тела. При этом возрастут силы взаимодействия между частицами, равнодействующей которых является сила отталкивания. Она будет действовать на сместившиеся частицы, стремясь вернуть их в прежнее положение. Это и есть сила упругости. После прекращения действия внешней силы частицы вернуться на прежние места, а сила упругости исчезнет.

При пластической деформации частицы в кристалле смещаются иначе, чем при упругой. При пластической деформации происходит скольжение слоёв кристалла друг относительно друга

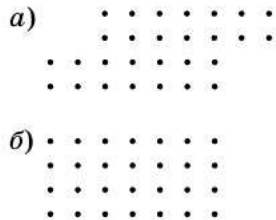


Рис. 123

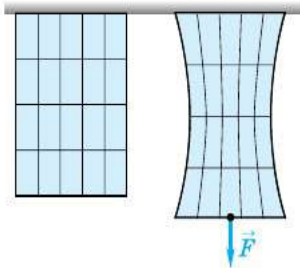


Рис. 124

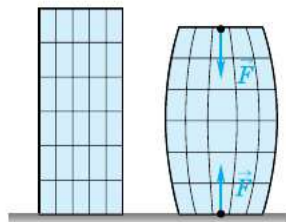


Рис. 125

(рис. 123, а). В этом случае частицы окружают такие же частицы, находящиеся на таких же расстояниях друг от друга, что и до смещения (рис. 123, б). Поэтому сила упругости в теле не возникает, хотя тело и находится в деформированном состоянии.

**3. Виды деформации.** Различают четыре основных вида деформации: *растяжение (сжатие), сдвиг, кручение и изгиб*.

Деформация **растяжения** была уже рассмотрена на примере пружины. Если один конец тела (пружины, стержня, проволоки) закрепить, а на другой подействовать силой, направленной вдоль этого тела (см. рис. 121), то тело растянется. То же самое произойдёт, если на оба конца тела подействовать двумя противоположно направленными силами. При растяжении увеличивается длина тела, но уменьшаются его поперечные размеры (рис. 124). Растяжение испытывают канаты, тросы, струны музыкальных инструментов, балки строительных конструкций и т. п.

**Сжатие** происходит под действием двух сил, направленных навстречу друг другу (рис. 125). В этом случае уменьшается длина тела, но увеличиваются его поперечные размеры. Сжатию подвергаются фундаменты зданий, опоры, столбы, стены, ножки столов, стульев и т. п.

Если на тело действуют силы так, как это показано на рисунке 126, то они стремятся сместить одну часть тела относительно другой. В этом случае тело испытывает деформацию, называемую **сдвигом**. При сдвиге изменяется форма тела, но не меняется его объём. Сдвиг сопровождается растяжением и сжатием. Из рисунка 127 хорошо видно, что длина диагонали  $AC$  увеличивается, а длина диагонали  $BD$  уменьшается.

Сдвиг — распространённый вид деформации, он имеет место всегда, когда существует трение. Например, если пытаться сдвинуть с места тяжёлое тело или тянуть его по полу, то и в том

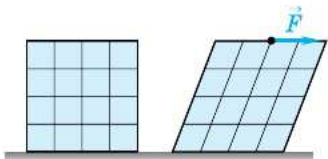


Рис. 126

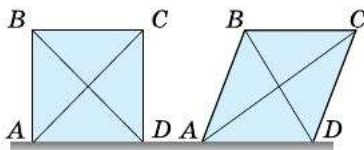


Рис. 127

и в другом случае тело и пол подвергаются деформации сдвига. Такой деформации подвергаются заклёпки и болты, соединяющие изделия, сварные швы. Если деформация сдвига из упругой превращается в пластическую, то происходит перемещение одних слоёв вдоль других, что подобно течению жидкости, когда одни слои жидкости непрерывно сдвигаются относительно других.

Пусть один конец стержня закреплён, а на другой действуют две параллельные и противоположно направленные силы, лежащие в плоскости, перпендикулярной оси вращения тела (рис. 128). При этом слои стержня повернутся друг относительно друга на некоторый угол. Возникающую деформацию называют **кручением**.

Наблюдать деформацию кручения можно, если взять резиновую трубку и вращать её концы в противоположных направлениях. Предварительно начерченная вдоль трубки прямая примет форму винтовой линии. Деформация кручения возникает при закручивании гаек, ей подвергаются детали машин, передающие вращательное движение: валы, на которые насажены зубчатые колёса, карданный вал автомобиля и др.

Деформация **изгиба** наблюдается в случае, показанном на рисунке 129. Изгибу подвержены рельсы железнодорожного пути, балки перекрытий в зданиях, козырьки весов и т. п. Как видно из рисунка 129, при изгибе выпуклая сторона тела растягивается, а вогнутая — сжимается. Таким образом, изгиб сводится к растяжению и сжатию различных частей тела.

Внутри изгибаемого тела находится слой, который меняет свою форму, но не

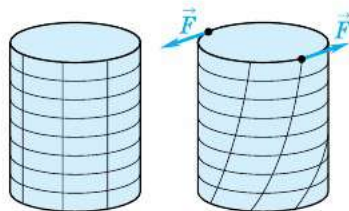


Рис. 128

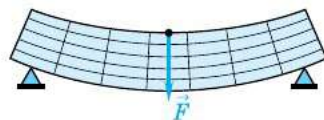


Рис. 129

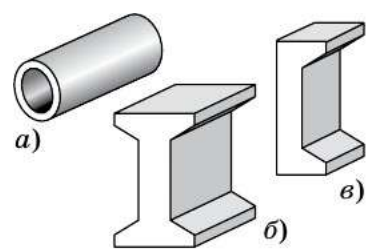


Рис. 130

меняет длину, т. е. не испытывает ни растяжения, ни сжатия. Этот слой называют *нейтральным*. Вблизи нейтрального слоя тело почти не испытывает деформации, и возникающая здесь сила упругости мала. Поэтому в деталях, подверженных изгибу, можно уменьшить площадь сечения около нейтрального слоя. В строительных конструкциях сплошные стержни заменяют трубами

(рис. 130, а), брусья — тавровыми или двутавровыми балками (рис. 130, б), а также швеллерами (рис. 130, в). Это позволяет сэкономить металл и облегчить конструкции, не уменьшая их прочности.

Встречающиеся в телах деформации весьма разнообразны, чаще всего наблюдаемая деформация является сложной и представляет собой несколько деформаций одновременно. Любой вид деформации может быть сведён к двум наиболее простым: растяжению (сжатию) и сдвигу. Рассмотренные виды деформации могут быть как упругими, так и пластическими.

## Вопросы для самопроверки

1. Чем отличается упругая деформация от пластической?
2. Поясните, почему абсолютно упругая деформация является идеализацией.
3. Объясните причину возникновения в теле силы упругости при растяжении.
4. Перечислите основные виды деформации. Приведите примеры.
5. Почему в конструкциях можно сплошные детали заменять полыми?

## Упражнение 29

1. Почему пружинные динамометры с течением времени начинают давать неверные показания?
2. Почему струнные музыкальные инструменты нуждаются в периодической настройке?
3. Приведите примеры использования трубчатых конструкций в технике и трубчатого строения в природе.
4. Каким преимущественно деформациям подвергается опора моста; струна гитары?

## § 44. Механические свойства твёрдых тел

**1. Механическое напряжение.** Как вы уже знаете, в различных деталях машин и механизмов, частях сооружений под действием силы возникают деформации. При определённых деформациях может произойти разрушение конструкций. Поэтому возникает необходимость изучения механических свойств различных материалов и твёрдых тел. При этом необходимо прежде всего ответить на вопросы: как изменяется длина тела при действии на него различных сил, какую максимальную нагрузку может выдерживать тело, не разрушаясь, при какой нагрузке тело теряет свои упругие свойства и т. п. Механические свойства тел и веществ изучают экспериментально. Рассмотрим некоторые механические свойства твёрдых тел и их физические характеристики.

Будем растягивать тело, например металлический стержень площадью поперечного сечения  $S$ , действуя на него силой  $F$  в горизонтальном направлении (рис. 131). При этом в стержне возникнет сила упругости и он будет находиться в состоянии напряжения. Такое состояние деформированного тела характеризуется величиной, называемой **механическим напряжением**.

**Механическим напряжением  $\sigma$**  называют физическую величину, равную отношению силы  $F$ , которая действует на тело, к площади его поперечного сечения  $S$ .

$$\sigma = \frac{F}{S}. \quad (1)$$

В СИ единицей механического напряжения является *паскаль* (Па).

$$1 \text{ Па} = 1 \text{ Н/м}^2.$$

**2. Закон Гука.** При изучении механических свойств твёрдых тел необходимо установить зависимость механического напряжения от деформации. Наиболее просто эту зависимость можно получить для упругих деформаций.

Вам уже известно, что при малых деформациях сила упругости  $F_{\text{упр}}$  прямо пропорциональна абсолютному удлинению  $\Delta x$ :

$$F_{\text{упр}} = -k\Delta x,$$

где  $k$  — жёсткость тела,  $\Delta x = x - x_0$ ,  $x_0$  — начальная длина тела,  $x$  — длина тела в состоянии деформации. Записанный закон носит название **закона Гука**.



Рис. 131



Сила упругости по третьему закону Ньютона равна приложенной силе и направлена в противоположную сторону, т. е.  $F_{\text{упр}} = -F$ . Поэтому

$$F = k\Delta x. \quad (2)$$

Значение абсолютного удлинения не может служить мерой деформации, так как, зная только его, нельзя сказать, насколько сильно деформировано тело. Так, абсолютное удлинение 2 см будет значительным для пружины длиной 4 см и небольшим для пружины длиной 30 см. Поэтому для характеристики деформации вводится такая величина, как **относительное удлинение**.

**Относительным удлинением  $\varepsilon$  называют физическую величину, равную отношению абсолютного удлинения  $\Delta x$  к первоначальной длине тела  $x_0$ .**

$$\begin{aligned} \varepsilon &= \frac{\Delta x}{x_0}, \text{ или} \\ \varepsilon &= \frac{x - x_0}{x_0}. \end{aligned} \quad (3)$$

Подставив выражение (1), предварительно преобразовав его в формулу (2), получим:

$$\begin{aligned} \sigma S &= k\Delta x, \text{ или} \\ \sigma &= \frac{k(x - x_0)}{S}. \end{aligned}$$

Умножив числитель и знаменатель правой части равенства на  $x_0$  и учитывая выражение (3), получим

$$\sigma = \frac{kx_0}{S} \varepsilon.$$

Величину  $\frac{kx_0}{S}$  называют **модулем Юнга** и обозначают буквой  $E$ .

$$E = \frac{kx_0}{S}.$$

Теперь можно записать:

$$\sigma = E\varepsilon.$$

Полученное равенство представляет собой закон Гука, записанный в другой форме.

**При малых деформациях механическое напряжение, возникающее в теле, прямо пропорционально его относительному удлинению.**

В СИ единицей модуля Юнга является *паскаль (Па)*.

*Модуль Юнга равен напряжению, которое возникло бы в теле при изменении его длины в 2 раза.*

Модуль Юнга является характеристикой вещества, из которого сделано тело. Чем больше модуль Юнга, тем меньше деформируется тело при прочих равных условиях, т. е. модуль Юнга характеризует сопротивляемость материала упругой деформации. Значение модуля Юнга определяют экспериментально. Например, для меди он равен  $1,1 \cdot 10^{11}$  Па, для свинца —  $1,7 \cdot 10^{10}$  Па, для иридия значение модуля Юнга одно из самых высоких —  $5,28 \cdot 10^{11}$  Па.

Зная модуль Юнга, можно определить жёсткость тела:

$$k = \frac{ES}{x_0}.$$

Таким образом, жёсткость тела является, в отличие от модуля Юнга, характеристикой тела: зависит от материала, из которого оно изготовлено, площади поперечного сечения тела и его первоначальной длины.

**3. Прочность.** Прочность — способность вещества сопротивляться разрушению при различных внешних воздействиях. Механическое напряжение  $\sigma_{пр}$ , при котором тело начинает разрушаться, называют **пределом прочности**.

В таблице 31 приведены значения предела прочности для некоторых материалов.

**Таблица 31**

Материал	Предел прочности	
	при растяжении, Па	при сжатии, Па
Сталь инструментальная	$9,5 \cdot 10^8$	$6,7 \cdot 10^8$
Чугун	$10^8 - 2,2 \cdot 10^8$	$3,7 \cdot 10^8 - 8,8 \cdot 10^8$
Медь	$2,4 \cdot 10^8$	$4,2 \cdot 10^8$
Свинец	$3,0 \cdot 10^7 - 2,2 \cdot 10^7$	—
Дуб	$7,0 \cdot 10^7$	$7,0 \cdot 10^7$
Сосна	$7,0 \cdot 10^7$	$2,0 \cdot 10^7$

При строительстве различных сооружений, конструировании машин и механизмов учитывается, что механическое напряжение не должно быть равным или близким к пределу прочности. Обычно допускаемое механическое напряжение в несколько раз меньше предела прочности.

Число, показывающее, во сколько раз предел прочности больше допустимого механического напряжения, называют **запасом прочности**.

Для стали, в частности, установлен запас прочности от 2,5 до 4, для чугуна — от 6 до 8, для дерева — от 8 до 10. Значение запаса прочности зависит от характера сооружений и испытываемой ими нагрузки. Например, в зонах, подверженных землетрясению, запас прочности должен быть больше, чем в других районах.

**4. Хрупкость.** Разные материалы разрушаются при разных напряжениях и соответственно при разных деформациях. Материалы, разрушающиеся при небольших деформациях, называют **хрупкими**.

К хрупким материалам относятся стекло, фарфор, чугун и др. Изделия из них очень легко разбить. Хрупкие материалы не обладают пластичностью. Механическое напряжение в них очень быстро растёт с увеличением деформации, поэтому разрушение наступает уже при малых деформациях. Так, чугун разрушается при относительном удлинении 0,0045. Сталь, в отличие от чугуна, не относится к хрупким материалам, она разрушается при относительном удлинении 0,15.

**5. Твёрдость.** Твёрдость является одним из важнейших свойств твёрдого тела. От неё зависит срок службы деталей машин и механизмов, долговечность конструкций. Работа машин и механизмов сопровождается трением, которое может привести к разрушению материалов, не обладающих достаточной твёрдостью. То же относится, например, и к опорам сооружений, которые при малой твёрдости могут сломаться при небольших напряжениях. Режущие и давящие инструменты тоже должны быть твёрдыми, иначе они будут менять свою форму, а не форму обрабатываемой детали.

Как вам уже известно, самое твёрдое тело — алмаз. Алмазы укрепляют на концах резца и сверла бура для бурения скважин.

Твёрдость двух тел или веществ можно сравнить, поцарапав их друг о друга. Например, железо царапает медь, но медь не оставляет царапин на железе. Значит, железо твёрже меди.

цессе роста кристалла из-за механического воздействия, перепадов температуры, недостаточной чистоты раствора и т. п.

Наличие дефектов в кристалле сильно влияет на его свойства. В частности, в идеальном кристалле невозможна диффузия. Это связано с тем, что все узлы кристаллической решётки в нём заняты атомами данного вещества и внедрение атомов другого вещества в узлы или между узлами решётки идеального кристалла требует очень большой энергии, которой атомы не обладают.

В реальном же кристалле атомы другого вещества, попадая в область дефекта, могут занять свободное место. При этом их энергия оказывается достаточной для внедрения, поскольку в области дефектов связи между атомами слабее.

**2. Управление свойствами твёрдых тел.** Зная строение вещества, можно влиять на свойства вещества и создавать материалы с определёнными свойствами. Создание материалов с заданными свойствами, потребность в которых постоянно растёт, — одно из основных направлений научно-технического прогресса.

Наиболее важной считается задача повышения прочности материалов. Прочность можно повысить как при уменьшении дефектов решётки, так и при их увеличении. Максимальной прочностью обладает идеальный кристалл. Поэтому одна из возможностей повышения прочности — выращивание бездефектных кристаллов, т. е. кристаллов, близких к идеальному. Такие кристаллы выращивают в лабораториях. Они имеют нитевидную форму, и их прочность практически равна теоретической. Например, кристалл железа, полученный в лаборатории, имеет прочность  $14 \cdot 10^7$  Па, в то время как прочность обычного чистого железа  $2 \cdot 10^7$  Па.

При этом прочность можно повысить, увеличив концентрацию дефектов. С этой целью материал можно подвергнуть пластической деформации. Этот способ повышения прочности называют **наклёпом**. Примерами наклёпа являютсяковка, прокатка, волочение и т. п. Опыт показывает, что при наклёпе прочность возрастает в десятки раз.

Повышению прочности материалов способствует введение в них примесей, которые препятствуют распространению дефектов. Такими примесями могут быть атомы углерода, кремния, бора, азота. Поэтому широкое распространение в технике получают сплавы, которые имеют бóльшую прочность по сравнению с чистыми металлами, например различные стали (сплавы железа, углерода и других элементов), латунь (сплав меди и цинка), сплавы алюминия или магния с медью и другими элементами.

Помимо высокой прочности, сплавы обладают и другими свойствами, отличающими их от чистых металлов. Например, некоторые сплавы более термостойки, чем составляющие их металлы, другие, наоборот, плавятся при более низкой температуре. Так, олово плавится при температуре 232 °С, свинец — при 327 °С, а сплав олова со свинцом — при 170 °С. Температура плавления сплава карбида тантала с гафнием 4215 °С, поэтому его используют для изготовления тиглей для плавки металлов.

Существуют сплавы: обладающие очень высокой твёрдостью, упругие, лёгкие и прочные (дюралюминий), почти не расширяющиеся при нагревании, не подверженные окислению (нержавеющие стали), с большим электрическим сопротивлением (нихром), со специальными магнитными свойствами.

Причина, по которой сплав приобретает свойства, отличные от свойств его компонентов, заключается в том, что в расплавленном состоянии происходит активное перемещение частиц, поскольку они обладают высокой энергией теплового движения. Поэтому при кристаллизации образуется материал (сплав) с иным строением и с иными свойствами.

## Вопросы для самопроверки

1. В каких случаях возникают дефекты кристаллической решётки?
2. Как влияют примеси на прочность материала? Ответ обоснуйте.
3. Почему железо и его сплавы являются основными материалами в современной технике?

## Вопросы для дискуссии

Как вы считаете, дефекты кристаллической решётки полезны или вредны?

## Жидкие кристаллы

**1. Строение жидких кристаллов.** Некоторые кристаллические твёрдые тела, прежде чем превратиться в жидкость, проходят промежуточные состояния. В этих состояниях они одновременно обладают свойствами жидкости (текучесть) и кристаллического тела (анизотропия физических свойств).

Вещества, находящиеся в таких состояниях, называют **жидкими кристаллами**. Жидкие кристаллы, образующиеся при изменении температуры вещества, называют *термотропными*. Одна-



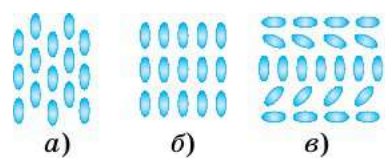


Рис. 132

ко это не единственный способ получения жидких кристаллов. Их получают также при растворении твёрдых тел в некоторых растворителях (*лиотропные жидкие кристаллы*), при взаимодействии с излучением (*фототропные жидкие кристаллы*).

В настоящее время насчитывается несколько тысяч веществ, способных находиться в жидкокристаллическом состоянии. Такое состояние присуще соединениям, молекулы которых имеют удлиненную, линейную форму. Для них направление осей молекул упорядочено, т. е. дальний порядок сохраняется по одному из трёх направлений. Центры масс этих молекул расположены беспорядочно.

В зависимости от того, как ориентируются молекулы в пространстве, различают три основных типа жидких кристаллов. В кристаллах первого типа оси молекул параллельны, а сами молекулы сдвинуты друг относительно друга на произвольные расстояния в направлении своих осей (рис. 132, а). В кристаллах второго типа молекулы параллельны друг другу и расположены слоями (рис. 132, б). Для кристаллов третьего типа характерно закручивание молекул в перпендикулярном направлении от слоя к слою (рис. 132, в).

**2. Свойства жидких кристаллов.** Особенности строения жидких кристаллов обуславливают их свойства. Так, возможностью хаотического поступательного движения молекул объясняется текучесть, а их упорядоченным расположением — анизотропия таких физических свойств, как упругость, электропроводность, диэлектрическая и магнитная проницаемость и др.

Свойства жидких кристаллов меняются в зависимости от температуры, длины волны внешнего излучения, механической деформации, воздействия электрического и магнитного полей. Это определяет возможности их широкого применения в системах хранения и обработки информации, в индикаторах и т. п.

**3. Применение жидких кристаллов.** Жидкие кристаллы имеют широкое практическое применение. Одним из свойств жидких кристаллов является зависимость их цвета от температуры. Это свойство используют для измерения температуры. Из смесей жидкокристаллических веществ изготавливают температурные индикаторы в интервале температур от  $-20$  до  $+250$  °С. Индикатор представляет собой тонкую гибкую плёнку из жидкого кристалла. При наложении плёнки на поверхность предмета по цвету индика-

тора можно определить температуру предмета, её изменение со временем.

Свойство жидких кристаллов изменять цвет также используется для выявления структурных дефектов непрозрачных объектов: благодаря неодинаковой теплопроводности дефекты вызывают различные цветовые эффекты в плёнке жидкого кристалла.

Жидкие кристаллы, оптические свойства которых изменяются под действием электрического поля, используются в цифровых индикаторах (электронные часы, микрокалькуляторы и т. п.), цветных телевизорах с жидкокристаллическим экраном. Принцип работы таких индикаторов следующий. Жидкокристаллическое вещество помещается между чёрной металлической пластиной и тонкой прозрачной для света металлической плёнкой, нанесённой на покровное стекло (рис. 133). Чёрная пластина и тонкая плёнка образуют конденсатор. Если на его обкладках напряжения нет, то свет проходит через жидкий кристалл и поглощается чёрной пластиной. Циферблат выглядит чёрным.

Если к обкладкам конденсатора приложено напряжение, то жидкий кристалл рассеивает свет и становится непрозрачным, так как под действием электрического поля меняется направление осей молекул. В этом случае циферблат будет светиться в тех местах, где создано электрическое поле. Если верхняя плёнка имеет форму цифры, то и область свечения получится в виде цифры.

Теория жидкокристаллического состояния вещества позволяет объяснить механизм действия моющих средств на загрязнённые поверхности. Растворённое в воде мыло представляет собой жидкокристаллическую систему. Оно образует множество двойных слоёв молекул мыла, разделённых слоями воды (рис. 134). Это приводит к тому, что раствор мыла, смачивая загрязнённые места, обволакивает частицы грязи мыльной плёнкой. Таким образом, частицы грязи и очищаемая поверхность покрываются слоями жидких кристаллов, которые легко скользят один по отношению к другому, и при небольшом механическом воздействии частички грязи отделяются и переводятся в раствор.

**4. Жидкие кристаллы в организме человека.** Жидкие кристаллы играют большую роль в жизнедеятельности организма человека. Так, белок, входящий в состав мышечной ткани, обладает спо-

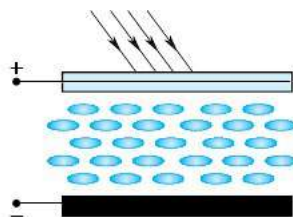


Рис. 133

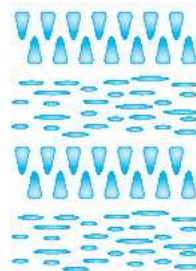


Рис. 134

способностью образовывать жидкие кристаллы. Гладкие и попеременно-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.

Форма жидких кристаллов наиболее удобна для протекания биологических процессов. Она соединяет в себе устойчивость к внешним воздействиям с необычайной пластичностью, гибкостью. Жидкокристаллические волокнистые образования обладают значительной прочностью, что необходимо для опорных тканей. Помимо этого, вещество в жидкокристаллическом состоянии очень чувствительно ко всем внутриклеточным процессам. Так, жидкие кристаллы обладают способностью адсорбировать, а также растворять некоторые вещества, не изменяя своей структуры, что обуславливает их участие в обмене веществ. Это объясняет, почему жидкие кристаллы обнаруживаются в важнейших функциональных участках клетки.

## Вопросы для самопроверки

1. Назовите общие свойства жидких кристаллов и жидкостей; жидких кристаллов и кристаллических тел. Объясните их на основе строения жидких кристаллов.
  2. Приведите примеры применения жидких кристаллов в технике.
  3. Какую роль играют жидкие кристаллы в организме человека?
- 

## § 45. Аморфное состояние твёрдого тела

### 1. Строение и свойства твёрдых тел в аморфном состоянии.

Твёрдое тело может существовать в двух различных состояниях — кристаллическом и аморфном. Эти состояния различаются по своим свойствам. Различие свойств вызвано тем, что внутреннее строение аморфных тел отличается от внутреннего строения кристаллических тел.

Рассматривая кусок сахара и сахарный леденец, предварительно очистив его поверхность, можно заметить, что сахар имеет кри-



сталлическое 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.

В кристаллических телах в расположении частиц (атомов, молекул, ионов) присутствует как ближний, так и дальний порядок. Это значит, что частицы твёрдого тела находятся на определённых одинаковых расстояниях друг от друга, причём это правильное расположение сохраняется во всём теле.

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. Твёрдые тела в аморфном состоянии можно отнести к жидкостям с большой вязкостью.

В аморфном состоянии в обычных условиях находятся стекло, вар<sup>1</sup>, смолы, янтарь, 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.

Тепловые, механические, электрические, оптические свойства тел в аморфном состоянии отличаются от соответствующих свойств кристаллических тел. Так, аморфные тела не имеют определённой температуры плавления. При повышении температуры они постепенно размягчаются, пока не превратятся в жидкости.

При кратковременных внешних воздействиях аморфные тела проявляют свойства твёрдых тел, в частности кусок вара при ударе раскалывается на части. При длительном внешнем воздействии проявляется такое свойство, как текучесть, присущее жидкостям. Так, твёрдые 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 твёрдого тела связаны с характером теплового движения: атомы и молекулы совершают в течение некоторого времени колебания относительно положений равновесия, перескакивают из одного положения в другое.

Тела, находящиеся в аморфном состоянии, изотропны: их свойства одинаковы по всем направлениям. В частности, у кристал-

---

<sup>1</sup> Вар — легкоплавкое смолистое вещество.

лического кварца температурный коэффициент линейного расширения для двух взаимно перпендикулярных направлений  $0,13 \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}$  и  $0,8 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ , а у плавленного кварца для всех направлений один и тот же и равен  $0,4 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ . Теплопроводность у кристаллического кварца для этих же направлений отличается почти в 2 раза. У плавленного кварца теплопроводность для всех направлений одна и та же, причём она в 4 раза меньше наименьшей теплопроводности кристаллического кварца. При низких температурах это различие ещё существеннее.

Таким образом, кристаллические и аморфные твёрдые тела различаются строением и, следовательно, свойствами.

**2. Полимеры.** К особой разновидности твёрдых тел относятся *полимеры* — вещества, молекулы которых состоят из большого числа повторяющихся звеньев. Молекулы полимеров содержат десятки и даже сотни атомов. По происхождению полимеры делят на два класса. К первому классу относят природные полимеры, такие как белки, натуральный каучук. Ко второму классу относят синтетические полимеры: полиэтилен, эпоксидные смолы и др.

Полимеры могут находиться как в аморфном, так и в кристаллическом состоянии. Аморфные полимеры при повышении температуры переходят из твёрдого состояния в жидкое с большой вязкостью. Многие кристаллические полимеры не переходят в жидкое состояние, а разлагаются на вещества при повышении температуры или сгорают.

Полимеры являются основой пластмасс, химических волокон, резины, лакокрасочных материалов, клея и др. К пластмассам, в частности, относят такие полимерные материалы, которые способны приобретать заданную форму при нагревании под давлением и сохранять её после охлаждения. Пластмассы обладают целым рядом таких физико-химических свойств, которые делают их незаменимыми материалами. Так, они устойчивы к коррозии, характеризуются высокими теплоизоляционными и электроизоляционными свойствами, низким коэффициентом трения.

Плотность большинства пластмасс существенно меньше плотности металлов. Например, плотность гетинакса и текстолита составляет  $1400 \text{ кг/м}^3$ , значение плотности органического стекла и эпоксидных материалов лежит в пределах от  $1200$  до  $1800 \text{ кг/м}^3$ . Кварцевое же стекло имеет плотность  $2200$ — $2300 \text{ кг/м}^3$ , алюминий —  $2700 \text{ кг/м}^3$ , свинец —  $11\,300 \text{ кг/м}^3$ . Поэтому детали и машины, выполненные с применением полимерных материалов, значительно легче.



Свойства пластмасс постоянно улучшаются. Особое значение для машиностроения имеет создание термостойких и высокопрочных пластмасс. В частности, уже существуют пластмассы, которые могут эксплуатироваться при температурах 160—170 °С и обладают при этом высокой прочностью и эластичностью.

**3. Композиты.** Стремясь полностью использовать положительные свойства пластмасс и других материалов, из них делают *композиционные материалы*, или *композиты*. В них не только сочетаются свойства исходных материалов, но проявляются и совершенно новые свойства. Наибольшее распространение получили такие композиционные материалы, как стеклопластики и слоистые пластики. Среди слоистых пластиков особое место занимают композиционные материалы из металла и пластмассы. К ним относятся металлопластмассы, которые получают, покрывая металлом пластмассу. Металлическое покрытие изменяет свойства пластмассы, в частности, она становится более стойкой к тепловым, механическим и другим воздействиям.

Металлопластмассы отличаются по своим свойствам как от металлов, так и от пластмасс. По сравнению с металлами они имеют в 4—9 раз меньшую плотность, теплопроводность, электропроводность, звукопроницаемость; по сравнению с пластмассами они более устойчивы к воздействию света, растворителей, к атмосферным воздействиям, более тепло- и износостойки, обладают большей механической прочностью.

Используя специальные добавки, можно получать материалы, обладающие самыми разными свойствами: твёрдостью и прочностью, превышающими твёрдость и прочность стали, устойчивостью к коррозии, огнестойкостью, тугоплавкостью и т. д.

## Вопросы для самопроверки

1. Сравните строение твёрдого тела в кристаллическом и аморфном состояниях.
2. Сравните свойства аморфных и кристаллических твёрдых тел.
3. Какие свойства твёрдого тела в аморфном состоянии делают его похожим на вязкую жидкость?
4. Докажите, что вещество может переходить из аморфного состояния в кристаллическое.
5. Что такое пластмассы? Каковы их свойства?
6. Приведите примеры применения пластмасс и композиционных материалов, произведённых на их основе.

## Наноматериалы и нанотехнология

**1. Наноструктуры.** Проникновение в глубь вещества открывает всё новые и новые его свойства. Так, в конце XX в. были открыты уникальные свойства объектов, состоящих из небольшого (по сравнению с макроскопическими телами) числа атомов. Их называют **наноструктурами**. К наноструктурам относят объекты, которые хотя бы в одном направлении имеют размеры от 1 до 100 нанометров (нм). Вспомните, что

$$1 \text{ нм} = 10^{-9} \text{ м.}$$

Существуют точечные наноструктуры, называемые **кластерами** (рис. 135). Их размеры по всем трём направлениям не превышают 100 нм. Кластеры содержат от десятков до десятков тысяч атомов или молекул. От числа атомов, содержащихся в кластере, зависят его физические и химические свойства. Так, при небольшом числе атомов кластер имеет свойства диэлектрика, а при увеличении числа атомов может приобрести свойства проводника.

Существуют линейные одномерные наноструктуры. Это такие наноструктуры, размеры которых меньше 100 нм в двух направлениях, а в третьем их размеры много больше, например сантиметры. Один из наиболее известных и перспективных для использования нанообъектов — **углеродные нанотрубки** (рис. 136). Они представляют собой свёрнутый в трубку слой графита толщиной в один атом углерода. Электрические и механические свойства нанотрубок определяют путём их использования для создания новых материалов, в медицине, экологии, наноэлектронике.

Есть нанообъекты, которые обладают двумерной структурой. Их размеры меньше 100 нм только в одном направлении. Примером двумерной наноструктуры может служить **графен** (рис. 137) — наноструктура, полученная не так давно (в 2005 г.).

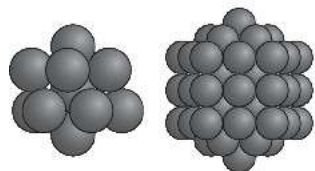


Рис. 135



Рис. 136

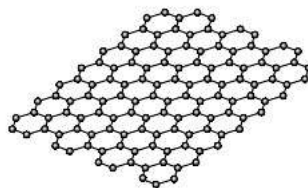


Рис. 137

**2. Наноматериалы.** Макроскопические объекты, если элементами их структуры являются наноструктуры, наноразмерные элементы, называют **наноматериалами**. В настоящее время уже создано большое число различных наноматериалов, обладающих свойствами, отличными от свойств обычных материалов. Рассмотрим некоторые примеры.

**Нанокристаллические материалы** включают в свой состав кластеры, размер которых порядка 10 нм. При этом чем меньше размер кластера, тем ярче выражены специфические свойства материала, например температура плавления, удельное сопротивление, твёрдость, прочность. Увеличение прочности нанокристаллов связано с тем, что при малых размерах кластеров уменьшается плотность существующих дефектов структуры и вероятность образования новых. Существенно, что в отличие от обычных кристаллов увеличение прочности нанокристалла сопровождается повышением его пластичности.

Широкое распространение получают в настоящее время **наноструктурные керамики**. Благодаря таким свойствам, как высокотемпературная прочность, химическая стойкость и лёгкость, они используются в аэрокосмической технике, в ортопедии и стоматологии, в тех случаях, когда необходимы водонепроницаемость и защита от коррозии. Удалось, например, создать из наноструктурной керамики двигатель внутреннего сгорания, температура рабочей камеры которого достигает 1400 °С, а КПД в 1,5 раза выше, чем у существующих двигателей внутреннего сгорания.

Наноструктурное керамическое покрытие поверхностей режущих инструментов позволяет повысить их твёрдость, термостойкость и уменьшить коэффициент трения, что приводит к увеличению сроков их эксплуатации. Нанокерамику, созданную на основе карбида бора, используют для изготовления лёгких и пулестойких бронезащитных материалов.

Ещё один класс наноматериалов — **нанокомпозиты**. В них по крайней мере одна компонента имеет наноразмеры. В отличие от обычных композиционных материалов, в нанокompозитах наличие небольшого числа наночастиц (2—5% массы материала) оказывает существенное влияние на их свойства.

Например, плёнка толщиной всего 45 нм, выполненная из полимерного нанокompозита и пронизанная кристаллами диоксида циркония, обладает высокой прочностью и упругостью. Она способна удержать жидкость, масса которой в 70 000 раз больше мас-

сы плёнки. Такая плёнка может применяться в качестве датчиков и мембран.

Плёнки и покрытия играют большую роль в современной технике. Наноструктурные плёнки могут представлять собой нанокристаллический материал, нанокерамику, наноккомпозиты. Нанесение такого покрытия на обычные материалы (дерево, стекло, бумагу и пр.) придаёт им необычные свойства. Так, вода, попадающая на обычное стекло, собирается на нём в капли. Если же на стекло нанести покрытие из полимерных слоёв и наночастиц кварца, то вода образует на нём ровный прозрачный слой.

Разработаны краска для окраски домов, «отталкивающая» грязь и влагу, покрытие для ткани, защищающее одежду от грязи.

**3. Нанотехнология.** Свойства наночастиц изучает нанонаука, находящаяся на границе физики, химии, биологии и информатики. Нанотехнология разрабатывает пути получения наноструктур и их практического использования.

В истории развития науки и техники можно выделить этапы, которые характеризуются переходом к качественно новым технологиям, определяющим направления развития цивилизации. Такой переход называют научно-технической революцией. Первую научно-техническую революцию (*индустриальную* или *энергетическую*) связывают с изобретением парового двигателя. Использование энергии пара привело к повышению производительности труда, к появлению новых транспортных средств и пр. Дальнейшее развитие науки, техники и технологий сделало возможным использование электрической, солнечной и атомной энергии.

Вторая научно-техническая революция (*информационная*) произошла в середине XX в. Она связана с развитием микроэлектроники, благодаря которому увеличились скорость и объём информационных потоков, появились компьютеры и всемирная информационная сеть (Интернет).

Конец XX в. ознаменовался началом третьей научно-технической революции — *нанотехнологической*. Как и в случае первых двух революций, для неё сложился ряд предпосылок. К ним относятся прежде всего развитие микроэлектроники (уменьшение размеров электронных устройств), обострение экологических проблем (необходимость для их решения альтернативных источников энергии), потребности медицины (необходимость создания новых технологий диагностики и лечения).

Исследования возможностей нанотехнологии в сфере микроэлектроники привели к созданию компактных и быстродействующих

щих микрочипов с использованием специальной структуры «кремний на изоляторе» со слоями кремния субмикронной и нанометровой толщины.

В области экологии нанотехнологии находят применение при создании энергетически выгодных источников света: светодиодов, газоразрядных ламп на основе кластеров тугоплавких металлов, при разработке дисплеев с малым энергопотреблением. Энергетически выгодным и экологически чистым топливом является водород, однако он взрывоопасен и должен храниться в массивных баллонах, потому и не находил широкого применения. В настоящее время разработан способ хранения водорода в углеродных нанотрубках, покрытых палладием или платиной. По оценкам на 500 км пробега автомобиля требуется всего 3 кг водорода. Извлекать водород можно, например путём подогрева воды.

Применение нанотехнологии в медицине и биологии имеет огромные перспективы, и это связано с тем, что молекулы ДНК, РНК, белков, клеточные мембраны имеют наноразмеры. К современным приложениям нанотехнологии в медицине относятся нанолечения, наноматериалы, диагностические нанотехнологические устройства, наноинструменты и наноманипуляторы. Например, разработаны таблетки наноструктурированного аспирина, которые в 5 раз легче обычного и во много раз эффективнее; созданы ранозаживляющие гели и мази на основе нанопорошков железа и магния. Наночастицы серебра обладают значительной бактерицидной и антивирусной активностью. Их включение в ткани делает ткани самодезинфицирующимися.

## Вопросы для самопроверки

1. Какие существуют типы наноструктур?
2. Каковы основные типы наноматериалов?
3. Почему развитие нанотехнологии считают третьей научно-технической революцией?

---

## § 46. Свойства поверхностного слоя жидкости

**1. Модель жидкого состояния.** Ранее были рассмотрены строение и свойства веществ в двух агрегатных состояниях: газообразном и твёрдом. Этим состояниям соответствуют два предельных случая пространственного расположения частиц. Идеальный

газ характеризуется полным беспорядком в расположении частиц и отсутствием взаимодействия между частицами, а идеальный кристалл — упорядоченностью строения и наличием достаточно больших сил взаимодействия, позволяющих сохранить этот порядок во всём объёме кристалла.

Жидкость занимает промежуточное положение между твёрдым телом и газом. Об этом свидетельствуют свойства жидкости. Например, жидкости так же, как и газы, не имеют формы, но, подобно твёрдым телам, имеют собственный объём и плохо сжимаемы. Наблюдаемые свойства жидкости позволяют построить её модель, а затем использовать эту модель для предсказания и объяснения новых свойств.

Вы уже знаете, что плотность жидкостей больше, чем плотность газов, и меньше, чем плотность твёрдых тел. Это означает, что молекулы жидкости находятся на существенно меньших расстояниях друг от друга, чем молекулы газов. Эти расстояния сравнимы с размерами самих молекул. Силы взаимодействия между молекулами жидкости уже достаточно существенны. Поэтому свойства жидкостей определяются как характером движения молекул, так и их взаимодействием.

Расположение частиц в жидкостях имеет определённый порядок. Однако этот порядок соблюдается только на небольших расстояниях (два-три молекулярных слоя). Поэтому говорят, что жидкостям, в отличие от твёрдых кристаллических тел, свойствен *ближний порядок* в расположении частиц. Тепловое движение молекул жидкости подобно тепловому движению молекул твёрдого тела в аморфном состоянии. Каждая молекула в течение некоторого промежутка времени колеблется около положения равновесия, время от времени она меняет положение равновесия, скачком перемещаясь в новое положение. Это новое положение равновесия отстоит от прежнего на расстоянии порядка размера самой молекулы. Среднее время жизни молекулы около определённого положения (время «оседлой жизни») больше времени её перемещения и быстро убывает с повышением температуры.

До настоящего времени теория жидкого состояния не имеет законченного вида. В частности, не удалось получить уравнение состояния жидкости, поскольку учесть все силы взаимодействия между молекулами жидкости — задача крайне сложная. Большой вклад в разработку теории жидкого состояния внёс русский учёный **Яков Ильич Френкель** (1894—1952). Им была разработана теория диффузии, вязкости и теплопроводности жидкости. По-



сколько теория жидкого состояния сложна, количественные закономерности мы рассматривать не будем. Однако описанная выше модель жидкости позволяет объяснить ряд её свойств.

**2. Текучесть.** В отличие от твёрдых кристаллических тел, жидкости обладают таким свойством, как **текучесть**. Это объясняется тем, что молекулы жидкости могут перемещаться из одного места в другое. Поэтому жидкости принимают форму того сосуда, в котором они находятся. По этой же причине диффузия в жидкостях происходит быстрее, чем в твёрдых телах. То, что, в отличие от газов, жидкости имеют собственный объём, объясняется наличием достаточно больших сил взаимодействия между молекулами жидкости, которые обеспечивают ближний порядок и не дают молекулам разлететься.

**3. Поверхностное натяжение жидкостей.** Жидкость на границе с газом или паром имеет свободную поверхность. Выясним, каковы её свойства. Для этого рассмотрим несколько примеров.

Вы не раз наблюдали капельки росы на листьях растений. Им присуща почти правильная шарообразная форма. Такую же форму имеют падающие дождевые капли, капли ртути.

Если положить на поверхность воды бритвенное лезвие, оно не утонет. Если лезвие погрузить в воду, то оно пойдёт ко дну. Это означает, что свойства поверхности жидкости отличаются от свойств её внутренних слоёв. Эти и другие примеры объясняются особенностями свойств поверхности жидкости.

Рассмотрим состояние молекул жидкости в поверхностном слое и внутри жидкости (рис. 138). На молекулу, находящуюся внутри жидкости, действуют силы со стороны окружающих её молекул, которые уравнивают друг друга.

Молекула, расположенная на поверхности жидкости, взаимодействует с соседними молекулами жидкости и с молекулами пара. Плотность пара меньше плотности жидкости, поэтому с выделенной молекулой жидкости взаимодействует меньше молекул пара, чем молекул жидкости, и в целом взаимодействие молекулы жидкости с молекулами пара слабее, чем с молекулами жидкости. В связи с этим появляется равнодействующая сила, направленная внутрь жидкости. Под действием этой силы часть молекул уходит из поверхностного слоя внутрь жидкости. Поверхностный слой сокращается и находится в состоянии натяжения.

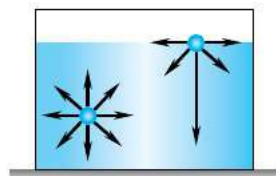


Рис. 138

**Силой поверхностного натяжения называют силу, действующую вдоль поверхности жидкости перпендикулярно к линии, ограничивающей эту поверхность, и направленную в сторону её сокращения.**

Характеристикой поверхностного слоя жидкости является поверхностное натяжение.

**Поверхностным натяжением  $\sigma$  называют величину, равную отношению силы поверхностного натяжения  $F$  к длине границы поверхностного слоя жидкости  $l$ .**

$$\sigma = \frac{F}{l}.$$

Единица поверхностного натяжения в СИ — *ньютон на метр* (Н/м).

Теперь можно объяснить, почему капля принимает шарообразную форму. Поверхность жидкости стремится сократиться, а, как известно, наименьшую поверхность при заданном объёме имеет шар.

### Вопросы для самопроверки

1. Почему время «оседлой жизни» молекул жидкости уменьшается с повышением температуры?
2. Почему жидкости плохо сжимаются?
3. Почему падающие дождевые капли имеют форму шара, хотя на них действует сила тяжести?
4. Дайте определение поверхностного натяжения.
5. Почему поверхностное натяжение уменьшается с повышением температуры?

### Упражнение 31

1. Почему насекомые-водомерки могут быстро скользить по поверхности воды, не погружаясь в неё?
2. Капля воды вытекает из вертикальной стеклянной трубки диаметром 2 мм. Найдите массу капли, если поверхностное натяжение воды равно 73 мН/м.
3. С помощью пипетки отмерили 76 капель минерального масла. Их масса оказалась равной 910 мг. Определите поверхностное натяжение масла, если диаметр отверстия пипетки 1,2 мм.
4. Какую работу надо совершить, чтобы выдуть мыльный пузырь радиусом 3 см, если поверхностное натяжение мыльного раствора 0,04 Н/м?

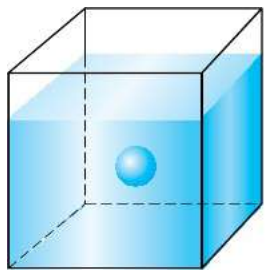


Рис. 140

Возникает вопрос, почему жидкость, налитая в стакан, принимает не форму капли, а форму стакана. Это объясняется тем, что, помимо силы поверхностного натяжения, на каплю действуют сила тяжести и сила взаимодействия молекул жидкости со стенками стакана. Если же силу тяжести уравновесить, а силу взаимодействия жидкости со стенками стакана исключить, то жидкость будет иметь форму шара. Это подтверждает следующий опыт. Большую каплю анилина введём в раствор поваренной соли, плотность которого равна плотности анилина. Капля будет находиться в равновесии и примет форму шара (рис. 140).

Поверхностное натяжение различных жидкостей неодинаково, оно зависит от примесей и от температуры. Чем выше температура жидкости, тем поверхностное натяжение меньше.

## § 47. Смачивание. Капиллярность

**1. Смачивание.** Вы уже знаете, что жидкость может растекаться по поверхности твёрдого тела, может собираться на ней в капли. Например, погрузив в воду стеклянную пластину, предварительно её обезжирив, а затем вынув из воды, можно увидеть, что пластина покрыта водой.

Если теперь эту же пластину смазать воском, опустить в воду и затем вынуть, то пластина либо будет сухой, либо на ней будут отдельные капли воды. Этот простой опыт показывает, что при соприкосновении жидкости с твёрдым телом происходит искривление поверхности жидкости у поверхности твёрдого тела, т. е. наблюдается **смачивание**.

Если жидкость растекается по поверхности твёрдого тела, то она является смачивающей. В описанном опыте вода смачивает чистое стекло. Если жидкость собирается в капли на поверхности тела, то она является несмачивающей. Вода, например, не смачивает стекло, смазанное парафином.

Таким образом, одна и та же жидкость может быть смачивающей и несмачивающей по отношению к разным телам. Наоборот, одно и то же твёрдое тело может смачиваться одной жидкостью и



не смачиваться другой. Например, вода смачивает чистое стекло, ртуть на чистом стекле собирается в каплю, т. е. не смачивает его.

**2. Причина смачивания.** Рассмотрим причину смачивания. Молекулы жидкости, находящейся на поверхности твёрдого тела, взаимодействуют не только друг с другом, но и с молекулами твёрдого тела. Силы притяжения между молекулами жидкости и твёрдого тела могут оказаться больше, чем между молекулами жидкости. В этом случае жидкость смачивает поверхность твёрдого тела, растекается по ней.

Если силы притяжения между молекулами жидкости больше, чем между молекулами жидкости и молекулами твёрдого тела, то жидкость не смачивает его, а стягивается в каплю.

Явление смачивания играет важную роль в нашей жизни. Так, в одних случаях необходимо предохранить обувь и одежду от смачивания. С этой целью обувь покрывают специальной смазкой, с которой вода скатывается. В других случаях необходимо, чтобы ткань смачивалась жидкостью, например при окрашивании.

Смачивание важно обеспечить, когда художник, например, рисует акварельными красками, иначе краски не будут ложиться на поверхность бумаги.

От того, является ли жидкость смачивающей или несмачивающей, зависит её форма в сосуде. Вы наверняка наблюдали, что вода, налитая в узкую мензурку или трубку, имеет вогнутую поверхность (рис. 141, а). Это связано с тем, что силы притяжения между молекулами воды и стекла больше, чем между молекулами воды, поэтому площадь соприкосновения жидкости со стеклом увеличивается и края жидкости приподнимаются.

Если же в мензурку налить ртуть, то её поверхность будет выпуклой (рис. 141, б), так как силы притяжения между молекулами ртути больше, чем силы притяжения между молекулами ртути и стекла.

Вогнутую или выпуклую поверхность жидкости в трубке называют **мениском**.

На явлении смачивания основан способ обогащения руды, называемый *флотацией*. Руду размельчают, взбалтывают в воде и добавляют в эту взвесь масло. В результате перемешивания крупинки ценной руды обволакиваются маслом, которое их смачивает. Крупинки пустой породы не смачиваются маслом, но смачивают-

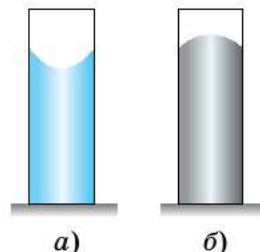


Рис. 141

ся водой. Затем в эту смесь вдувают воздух. Пузырьки воздуха «прилипают» к крупинкам ценной породы, покрытым маслом и потому не смачиваемым водой. Под действием выталкивающей силы они поднимаются вверх. Крупинки пустой породы, смоченные водой и не поддерживаемые воздухом, остаются при этом на дне.

**3. Капиллярные явления.** Если в сосуд с водой опустить тонкие трубки, называемые **капиллярами**, то можно заметить, что вода поднимется по ним и уровень её в трубках будет выше, чем в сосуде (рис. 142, *а*). Если опустить эти трубки в сосуд со ртутью, то уровень ртути в них будет ниже, чем в сосуде (рис. 142, *б*). Причём и в том и в другом случае поверхность жидкости в трубках будет изогнутой: поверхность воды вогнутой, а поверхность ртути выпуклой.

Причина капиллярных явлений — смачивание или несмачивание жидкостью твёрдого тела.

Поскольку вода смачивает стекло, то она образует в трубке вогнутый мениск. В этом случае на стенки трубки действует сила поверхностного натяжения  $\vec{F}_1$ , направленная вниз (рис. 142, *в*). По третьему закону Ньютона на воду со стороны стекла действует сила  $\vec{F}_2 = -\vec{F}_1$ , направленная вверх, которая и вызывает подъём жидкости в капилляре.

Если жидкость находится в покое, то сила  $\vec{F}_2$  уравнивает силу тяжести  $\vec{F}_{\text{тяж}}$ , действующую на столб воды в капилляре:  $\vec{F}_2 = -\vec{F}_{\text{тяж}}$ . Сила поверхностного натяжения  $F_1 = \sigma l$ , где  $l = 2\pi r$  — длина границы поверхностного слоя жидкости,  $r$  — радиус ка-

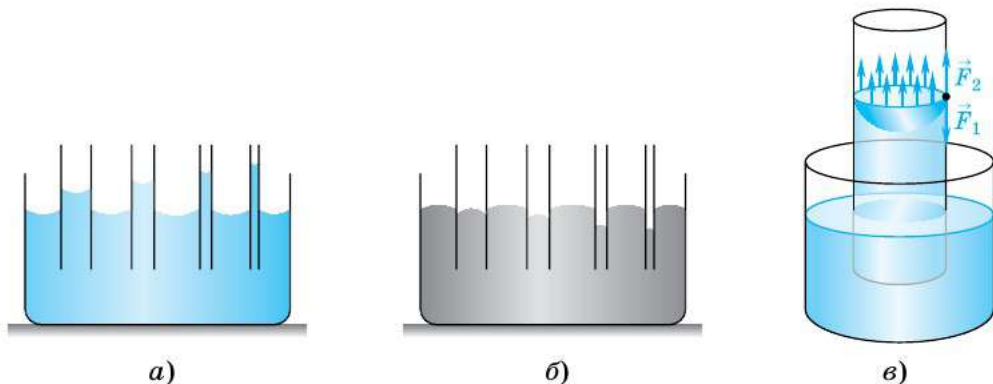


Рис. 142

пилляра. Сила тяжести, действующая на столб воды в капилляре:  $F_{\text{тяж}} = mg = \rho Vg$ . Объём столба воды равен произведению площади его поперечного сечения (площади круга) и высоты столба:  $V = \pi r^2 h$ . Подставив выражение силы поверхностного натяжения и силы тяжести в условие равновесия столба жидкости, получим:

$$2\pi r\sigma = \rho\pi r^2 h g.$$

Откуда

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

Таким образом, *высота подъёма жидкости в капилляре прямо пропорциональна поверхностному натяжению и обратно пропорциональна плотности жидкости и радиусу капилляра.*

Капиллярные явления наблюдаются в природе и учитываются в практике. В частности, питание растений обусловлено всасыванием из почвы влаги и питательных веществ, которое возможно благодаря наличию капилляров в корневой системе и стебле растения.

Учёт капиллярности необходим при обработке почвы. Так, для того, чтобы происходило более интенсивное испарение влаги из почвы, необходимо её уплотнять. В этом случае в почве образуются тонкие капилляры и влага по ним поднимается вверх и испаряется. Чтобы уменьшить испарение, почву разрыхляют, разрушая при этом капилляры, и влага дольше остаётся в почве.

Тела, имеющие большое число капилляров, хорошо впитывают влагу. По этой причине при вытирании рук полотенце впитывает в себя воду, керосин или расплавленный стеарин поднимается по фитилю лампы или свечи.

## Вопросы для самопроверки

1. Объясните причину смачивания.
2. Почему две капли ртути, приведённые в соприкосновение, сливаются в одну?
3. Почему чернилами или пастой нельзя писать на промасленной бумаге?
4. Почему шёлковая ткань плохо вытирает мокрые руки?
5. Почему вода поднимается по тонким трубкам и имеет вогнутый мениск, а ртуть опускается и её поверхность имеет выпуклый мениск?
6. Почему жидкость не поднимается по широкой трубке?

## Упражнение 32

1. Вычислите высоту подъёма воды и спирта в капиллярах радиусом 0,5 мм. Поверхностное натяжение воды  $7,3 \cdot 10^{-2}$  Н/м, спирта —  $2,1 \cdot 10^{-2}$  Н/м. Плотность воды  $1000$  кг/м<sup>3</sup>, спирта —  $800$  кг/м<sup>3</sup>.
2. На какую высоту опустится ртуть в капилляре радиусом 0,2 мм? Поверхностное натяжение ртути  $0,472$  Н/м, её плотность  $1,35 \cdot 10^4$  кг/м<sup>3</sup>.
3. Чему равно поверхностное натяжение бензина, если в трубке радиусом 0,2 мм высота его подъёма равна 3 см? Плотность бензина  $700$  кг/м<sup>3</sup>.
4. Какова масса воды, поднявшейся по капиллярной трубке диаметром 0,4 мм? Поверхностное натяжение воды  $7,3 \cdot 10^{-2}$  Н/м.



## Самоконтроль

Выполните в рабочей тетради тренировочный тест 7.



### Основное в главе

1. Сравнительная характеристика двух моделей твёрдого тела: идеального и реального кристалла (табл. 32).

Таблица 32

	<i>Идеальный кристалл</i>	<i>Реальный кристалл</i>
<i>Строение</i>	Совершенная трёхмерная периодическая решётка во всем объёме, лишённая любых дефектов строения	Трёхмерная периодическая решётка, имеющая дефекты

2. Твёрдое тело под действием внешней силы деформируется. Существуют различные виды деформации.



### 3. Свойства кристаллического тела (табл. 33).

**Таблица 33**

<i>Свойство</i>	<i>Определение</i>	<i>Характеристика</i>
Упругость	Свойство восстанавливать форму и объём после прекращения действия силы	Закон Гука $\sigma = E\varepsilon$ , где $\sigma = \frac{F}{S}$ , $\varepsilon = \frac{x - x_0}{x_0}$ , <i>E</i> — модуль Юнга, $\sigma$ — механическое напряжение
Пластичность	Свойство сохранять остаточную деформацию	
Прочность	Свойство сопротивляться пластической деформации и разрушению	Предел прочности
Хрупкость	Свойство разрушаться при небольших деформации и напряжении	

### 4. Сравнение строения и свойств твёрдого тела в кристаллическом и аморфном состояниях (табл. 34).

**Таблица 34**

	<i>Кристаллическое состояние</i>	<i>Аморфное состояние</i>
<i>Строение</i>	Упорядоченное (дальний порядок)	Отсутствие порядка в строении
<i>Свойства</i>	Анизотропность Плавится при определённой температуре Отсутствует текучесть	Изотропность Отсутствует определённая температура плавления Текучесть

### 5. Особенности строения и свойств жидкостей (табл. 35).

**Таблица 35**

<i>Строение</i>	<i>Свойства</i>
Ближний порядок в расположении частиц (два-три молекулярных слоя)	Текучесть Поверхностное натяжение



6. Свойства жидкостей и величины, характеризующие их (табл. 36).

Таблица 36

Свойство	Величина	Обозначение	Единица	Формула
Поверхностное натяжение	Поверхностное натяжение	$\sigma$	Н/м	$\sigma = \frac{F}{l}$ , $\sigma = \frac{\Delta U_{\text{пов}}}{\Delta S}$
Капиллярность	Высота подъёма жидкости	$h$	м	$h = \frac{2\sigma}{\rho g r}$

## Итоги раздела

### МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА

Основание молекулярно-кинетической теории строения вещества и термодинамики

#### Основные положения теории

Вещество состоит из частиц, частицы непрерывно и хаотически движутся, частицы взаимодействуют между собой

#### Основные величины

Макроскопические параметры состояния системы ( $p, V, T, U$ ), микроскопические параметры состояния системы ( $m_0, \overline{v^2}, \overline{E_k}$ )

#### Идеализированные объекты — модели

Идеальный газ, реальный газ, идеальный кристалл, реальный кристалл, жидкое состояние

#### Экспериментальные факты и данные наблюдений

Броуновское движение, диффузия, расширение и сжатие тел, опыты по определению размеров и массы молекул; наличие у твёрдого тела формы и объёма, наличие собственного объёма у жидкостей и отсутствие у них формы, отсутствие собственного объёма и формы у газов; хорошая сжимаемость газов и плохая сжимаемость жидкостей и твёрдых тел, текучесть жидкостей и др.

<p>Ядро молекулярно-кинетической теории строения вещества (идеального газа) и термодинамики</p>	<p><i>Основное уравнение молекулярно-кинетической теории идеального газа</i> Связь средней кинетической энергии теплового движения молекул идеального газа и его температуры</p> <p><i>Законы термодинамики</i></p> <p><i>Физические постоянные</i> Постоянная Авогадро, постоянная Больцмана, универсальная газовая постоянная</p>
<p>Следствия молекулярно-кинетической теории строения вещества и термодинамики</p>	<p><i>Уравнения состояния</i> Менделеева — Клапейрона и Клапейрона</p> <p><i>Газовые законы</i> Бойля — Мариотта, Шарля, Гей-Люссака</p> <p><i>Объяснение экспериментальных фактов, свойств газов, жидкостей и твёрдых тел</i></p> <p><i>Практическое применение</i> Создание новых материалов, развитие теплоэнергетики, использование свойств газов, жидкостей и твёрдых тел в жизни, промышленности, строительстве и сельском хозяйстве, для решения экологических проблем</p>

## Вопросы

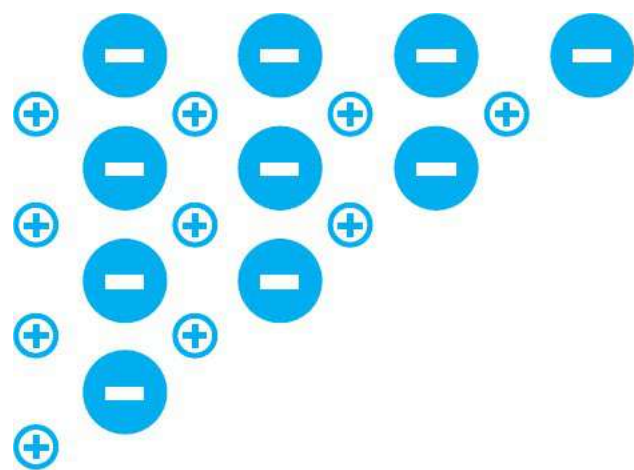
1. Помогут ли вам полученные знания о строении и свойствах твёрдых тел при выборе строительного материала для загородного дома?
2. Для выполнения какой профессиональной деятельности необходимы знания о строении и свойствах вещества? Подготовьте краткое сообщение о профессиях, связанных с материаловедением. Используйте для этого интернет-ресурсы и другие источники информации.
3. Каким образом полученные вами знания о строении и свойствах жидкостей могут быть использованы в работе на приусадебном участке?

## Темы проектов

1. Спроектируйте и изготовьте волосной гигрометр.
2. Экологически чистые тепловые двигатели.
3. Солнечные батареи: принцип работы и применение.
4. Создание материалов с заданными свойствами.
5. Композиционные материалы и их использование.
6. Наноматериалы и их применение в медицине.
7. Нанотехнология и проблемы экологии.
8. Нанотехнология и социально-этические проблемы.
9. Жидкие кристаллы в природе и технике.

## Исследовательские задания

1. Исследование зависимости поверхностного натяжения от примесей.
2. Исследование зависимости поверхностного натяжения от температуры жидкости.
3. Предложите эксперименты, позволяющие с помощью подручных средств исследовать зависимость давления газа данной массы от объёма при постоянной температуре и зависимость объёма газа данной массы от температуры при постоянном давлении. Выполните их и подготовьте соответствующие сообщения.
4. Предложите эксперимент, позволяющий наблюдать броуновское движение. Опишите свои наблюдения. Докажите экспериментально, что скорость движения броуновской частицы зависит от температуры.



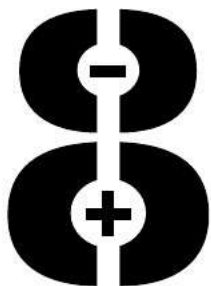
## ЭЛЕКТРОДИНАМИКА

Все физические явления связаны с взаимодействиями. В физике рассматривают четыре типа взаимодействий — *гравитационное, электромагнитное, ядерное и слабое*. При изучении механики вы познакомились с гравитационным взаимодействием.

Раздел физики, в котором изучается электромагнитное взаимодействие, называют **электродинамикой**. Электромагнитное взаимодействие — это взаимодействие электрически заряженных тел или частиц.

На электрические явления обратили внимание ещё в Древней Греции во времена **Фалеса Милетского** (VII—VI вв. до н. э.). Две с половиной тысячи лет учёными, изучавшими эти явления, накапливались факты, выдвигались различные гипотезы, на основе наблюдений и экспериментов формулировались законы. В частности, одним из важнейших результатов изучения электромагнитных явлений явилось установление существования в природе двух взаимосвязанных видов материи: вещества и поля.

Обобщением всего накопленного знания стала классическая электродинамика — одна из фундаментальных физических теорий. Как единая теория электродинамика была создана Максвеллом в 1864 г., но, как это часто происходит в процессе научного познания, учёные признали её лишь в конце XIX в. В 1888 г. немецкий физик **Генрих Герц** (1857—1894) экспериментально доказал существование электромагнитных волн, а в 1899 г. русский физик **Пётр Николаевич Лебедев** (1866—1912) впервые измерил давление света на твёрдые тела. Результаты этих опытов, теоретически предсказанных Максвеллом, стали экспериментальными подтверждениями истинности электродинамики как научной теории.



## Электростатика

*Электростатика является одной из частных теорий, входящих в состав электродинамики. В электростатике изучается взаимодействие покоящихся электрических зарядов.*

*Как и в любой физической теории, в электростатике можно выделить её основание, ядро и следствия. Основание электростатики составляют факты, полученные на основе наблюдений и экспериментов, отражающих поведение заряженных тел и электрическое взаимодействие. Основной моделью электростатики является точечный электрический заряд.*

*В ядро электростатики входят закон взаимодействия покоящихся точечных зарядов, экспериментально открытый Кулоном в 1785 г., и закон сохранения электрического заряда.*

*К следствиям данной теории относится возможность объяснять и предсказывать поведение заряженных тел в электрических полях, использовать знание электростатики в практических целях.*

### § 48. Электрический заряд

**1. Электрический заряд.** Электрический заряд — одно из основных понятий электродинамики, он определяет интенсивность электрического взаимодействия, которое проявляется в притяжении или отталкивании заряженных тел.



В природе существуют два рода электрических зарядов противоположных знаков — положительные и отрицательные. Все заряженные тела обладают определённым положительным или отрицательным зарядом. Принято считать, что заряд, приобретённый стеклянной палочкой, потёртой о шёлк (или бумагу), — *положительный*, а заряд, полученный на эбонитовой палочке (или янтаре), потёртой о мех, — *отрицательный*.

Говоря об электрическом заряде, всегда имеют в виду электрически заряженное тело. Носителем заряда может быть как элементарная частица, так и макроскопическое тело. Иначе говоря, *электрический заряд не существует без материального носителя*.

Заряд может принимать разные значения. Об этом свидетельствуют, например, разные углы отклонения стрелки электрометра, к которому прикасаются заряженными телами. Следовательно, заряд характеризуется не только знаком, но и модулем.

*Электрический заряд — это физическая величина, характеризующая способность тела к электрическому взаимодействию.* Заряд обозначают буквой  $q$ .

**2. Единица электрического заряда.** В СИ за единицу электрического заряда принят *кулон (Кл)*. Эта единица названа в честь французского физика *Шарля Кулона* (1736—1806), открывшего основной закон электростатики.

В СИ единица заряда является производной. К числу основных единиц электрических величин относится единица силы тока — *ампер*, и кулон определяют с помощью этой единицы.

Кулон — это электрический заряд, проходящий за 1 с через поперечное сечение проводника при силе тока 1 А.

1 Кл — это очень большой заряд. На теле малого размера такой заряд вообще не удержится, так как действие сил отталкивания между заряженными частицами приведёт к тому, что часть зарядов будет «выброшена» с поверхности заряженного тела. Чтобы металлическому шару сообщить заряд 1 Кл, надо, чтобы радиус шара был не меньше 10 м. На шаре же радиусом 1 см может удержаться заряд порядка  $10^{-6}$  Кл.

**3. Электрические силы.** Взаимодействие между заряженными телами называют *электрическим*, а возникающие при этом силы — *электрическими*.

Электрические силы, как и силы любой природы, имеют направление. Экспериментально было установлено, что *одноимённые электрические заряды отталкиваются друг от друга, а разноимённые — притягиваются*.

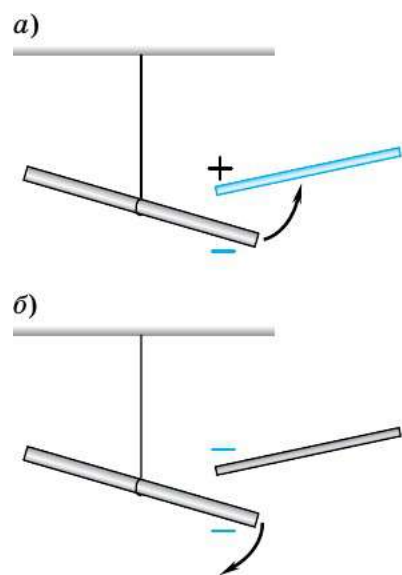


Рис. 143

В этом можно убедиться на опыте. К отрицательно заряженной эбонитовой палочке поднесём сначала положительно заряженную стеклянную палочку, а затем отрицательно заряженную эбонитовую. В первом случае палочки будут притягиваться друг к другу (рис. 143, а), а во втором — отталкиваться (рис. 143, б).

**4. Элементарный электрический заряд.** В конце XIX — начале XX в. учёными было экспериментально установлено, что в природе существует наименьший электрический заряд. Наименьшим зарядом, называемым **элементарным**, обладают электрон и протон. Электрон является носителем наименьшего отрицательного заряда, а протон — положительного.

Электрический заряд обладает таким свойством, как *дискретность*. Это означает, что значение любого заряда кратно целому значению элементарного заряда.

Заряд электрона равен  $e = -1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл. Заряд протона равен ему по модулю, но имеет положительное значение.

Модуль заряда любой другой частицы или тела равен произведению заряда электрона на целое число элементарных зарядов  $N$ , содержащихся в избытке (или недостатке) на данном теле:

$$q = eN.$$

Например, если необходимо определить заряд дважды ионизированного атома гелия He ( $\alpha$ -частицы), то следует умножить значение элементарного заряда на 2 — число электронов, которые «потерял» атом He:

$$q = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл} \cdot 2 = 3,2 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}.$$

Вопросы для самопроверки

1. Объясните, почему говорят, что заряд определяет интенсивность электрического взаимодействия.
2. Какие два рода электрических зарядов существуют в природе? Как взаимодействуют одноимённые заряды; разноимённые?

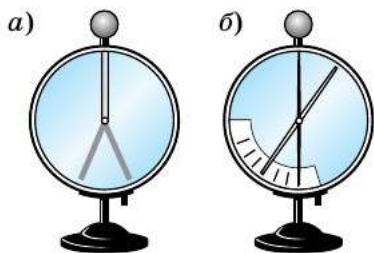


Рис. 144

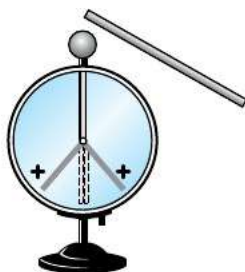


Рис. 145

3. Как определяется единица электрического заряда?
4. Какой заряд называют элементарным?
5. Что означает дискретность электрического заряда?
6. Может ли существовать электрический заряд без материального носителя? Ответ поясните.

## Упражнение 33

1. Отрицательно заряженное тело притягивает подвешенный на шёлковой нити лёгкий шарик. Можно ли утверждать, что шарик заряжен положительно? Ответ обоснуйте.
2. На рисунке 144 изображены электроскоп (рис. 144, а) и электрометр (рис. 144, б). Объясните устройство и принцип действия каждого прибора. Что между ними общего, чем они различаются?
3. При соприкосновении заряженной палочки с электроскопом ему был передан электрический заряд (рис. 145). Определите, каков знак заряда на палочке. Пунктиром показано первоначальное положение листочков электроскопа.
- 4.<sup>1</sup> Предложите опыт, которым можно было бы продемонстрировать делимость электрического заряда.
5. Металлический шарик имеет  $5 \cdot 10^5$  избыточных электронов. Чему равен его заряд?

## § 49. Электризация тел

**1. Явление электризации.** Из курса физики основной школы вам известно, что заряженные или наэлектризованные тела в результате трения (стеклянной палочки о бумагу или шёлк, эбонитовой — о мех и т. д.) приобретают свойство притягивать лёгкие предметы. Явление, при котором на телах появляются электрические заряды, называют **электризацией**.

<sup>1</sup> Индексом «э» обозначены задания экспериментального характера.



Следует отметить, что электризация тел происходит не только при трении. Например, если положить на лист плексигласа лист бумаги или газеты и тщательно его разгладить, то бумага и плексиглас прилипнут друг к другу, что обнаруживается при попытке их разделить (рис. 146).

Проведём опыт по электризации тел путём трения одного из них о другое — опыт со стеклянной палочкой и кусочком шёлка.

Напомним, что при трении стеклянной палочки о шёлк она заряжается положительно. До начала опыта и палочка, и кусочек шёлка были нейтральны, в чём легко убедиться с помощью электрометра. В результате же трения заряженными становятся оба тела — не только стеклянная палочка, но и кусочек шёлка. Это подтверждает отклонение стрелки электрометра (рис. 147), до которого дотронулись кусочком шёлка. Отклонение стрелки электрометра будет наблюдаться и в том случае, если до него дотронуться стеклянной палочкой.

Таким образом, *в результате электризации, в которой обязательно участвуют два тела, происходит перераспределение зарядов. При этом электризуются оба тела, приобретая заряды противоположных знаков.*

Зная строение атома, можно объяснить, что происходит при электризации. Электрические силы удерживают электроны внутри атома, но для разных веществ эти силы различны. При контакте тел часть электронов того вещества, у которых связь электронов с ядром атома слаба, переходит на другое. В результате на одном теле образуется недостаток электронов, и оно приобретёт положительный заряд, а на другом — избыток. Это тело станет отрицательно заряженным. В электрически нейтральных телах заряд всех электронов равен положительному заряду ядер атомов.

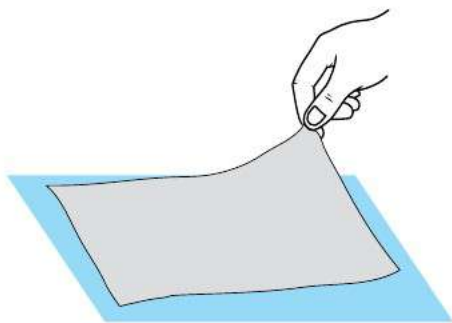


Рис. 146



Рис. 147

хом воздухе очень сильно электризуются листы бумаги; они слипаются, рвутся при разделении, загрязняются. Кроме того, между заряженной тканью или листом бумаги и другими предметами происходит электрический разряд, что может привести к возникновению пожара.

Существуют различные способы борьбы с нежелательной электризацией на производстве. К самым простым из них относятся тщательное заземление станков и механизмов, использование различного рода нейтрализаторов и антистатиков, повышение относительной влажности воздуха до 60—70%.

Однако явление электризации не только приносит вред; оно достаточно широко используется в технике. Например, явление притяжения лёгких мелких предметов наэлектризованными телами используется в устройстве электрических фильтров для очистки дыма от мелких частиц пепла, загрязняющих территорию вокруг тепловых электростанций, крупных заводов. Для этого в дымоходах устанавливают сетки, которым сообщают определённый электрический заряд. Электрофильтры устанавливают на химических заводах, в цехах, размалывающих цемент, и других производствах.

Используется электризация и в различных технических устройствах, например в копировальном аппарате типа ксерокса.

## Вопросы для самопроверки

1. В чём состоит явление электризации тел?
2. Почему при электризации заряжаются оба тела?
3. После расчёсывания сухих волос пластмассовая расчёска заряжается положительно. Какой заряд приобретают волосы? Почему?
4. Сформулируйте закон сохранения электрического заряда. Каковы границы применимости этого закона?
5. Приведите примеры проявления электризации в технике и быту.

## Упражнение 34

1. Почему при переливании бензина из одной цистерны в другую он может воспламениться, если не принять специальных мер предосторожности?
2. При скольжении стеклянного бруска с наклонной плоскости происходит его электризация. Повлияет ли это на конечную скорость бруска?
3. Два одинаковых тела, электрические заряды которых равны  $-q$  и  $4q$ , привели в соприкосновение. Чему равен заряд каждого тела после соприкосновения?

4. Металлический шарик, заряд которого  $-4,8 \cdot 10^{-11}$  Кл, привели в соприкосновение с точно таким же незаряженным шариком. Какой заряд получил второй шарик? Сколько избыточных электронов осталось на первом шарике?

## Вопросы для дискуссии

Один из учеников сформулировал закон сохранения заряда следующим образом: «Сумма зарядов всех частиц остаётся неизменной». Оцените правильность подобного утверждения.

## § 50. Закон Кулона

1. **Опыты Кулона с крутильными весами.** Французский учёный Кулон в 1785 г. установил на опыте закон взаимодействия неподвижных электрических зарядов.

Для выявления зависимости силы взаимодействия электрических зарядов от их модуля и расстояния между ними Кулон использовал специальный прибор — *крутильные весы* (рис. 149).

Крутильные весы представляют собой стеклянный цилиндр, внутри которого на тонкой серебряной нити подвешено лёгкое стеклянное коромысло. На одном конце коромысла закрепляется маленький металлический шарик 1, а на другом — противовес 2. Шарик 1 можно заряжать с помощью ещё одного металлического шарика 3, насаженного на стержень и закреплённого на крышке весов неподвижно.

При соприкосновении шарика 1 и заряженного шарика 3 заряд распределяется между ними и шарики отталкиваются. По углу закручивания нити, который отсчитывается по шкале, можно определить силу взаимодействия зарядов. Проведя большое число опытов, Кулон установил, что сила взаимодействия двух заряженных шариков обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними:

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

Заряд шарика 3 можно менять. При соприкосновении заряженного шарика с точно таким же незаряженным заряды распределяются поровну между шариками. В результате заряд на шарике 3

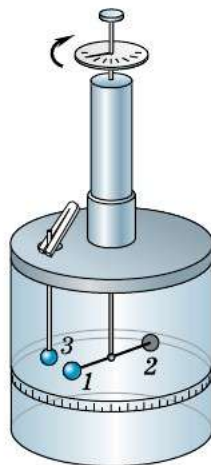


Рис. 149

уменьшится в 2, 4, 8 и т. д. раз. Соответственно уменьшится и заряд шарика 1. Меняя заряды шариков, Кулон выяснил, что сила их взаимодействия прямо пропорциональна произведению зарядов:

$$F \sim q_1 q_2.$$

**2. Закон Кулона.** В результате обобщения данных многочисленных экспериментов Кулон сформулировал закон.

**Сила взаимодействия двух точечных неподвижных зарядов в вакууме прямо пропорциональна произведению модулей зарядов и обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними.**

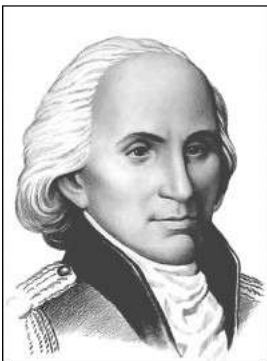
$$F = k \frac{q_1 q_2}{r^2},$$

где  $q_1$  и  $q_2$  — модули зарядов,  $r$  — расстояние между точечными зарядами,  $k$  — коэффициент пропорциональности, зависящий от выбора единиц физических величин.

Под точечными зарядами понимаются такие заряженные тела, размеры которых во много раз меньше расстояний между ними. Точечный электрический заряд, подобно материальной точке, является моделью реального тела, несущего определённый электрический заряд.

В единицах СИ значение коэффициента пропорциональности  $k$  равно  $9 \cdot 10^9 \text{ Н} \cdot \text{м}^2 / \text{Кл}^2$ .

Коэффициент  $k$  показывает, что два точечных заряда по 1 Кл, находящихся в вакууме на расстоянии 1 м друг от друга, взаимодействуют с силой  $9 \cdot 10^9 \text{ Н}$ .



**Шарль Огюстен Кулон (1736—1806)** — французский учёный, член Парижской академии наук. Известен своими работами по электричеству и магнетизму и исследованием сил трения; сформулировал закон сухого трения. Сконструировал чувствительный прибор — крутильные весы, с помощью которого можно было измерять очень малые силы; установил основной закон электростатики и распространил его на взаимодействие точечных магнитных полюсов. Экспериментальные исследования Кулона имели важное значение для создания теории электромагнитных явлений.

Силы взаимодействия двух неподвижных точечных зарядов направлены вдоль прямой, соединяющей их (рис. 150). В соответствии с третьим законом Ньютона  $\vec{F}_{12} = -\vec{F}_{21}$ .

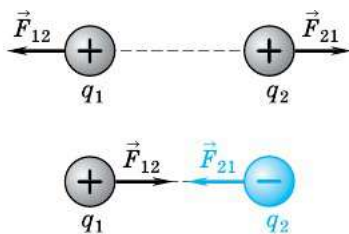


Рис. 150

Записанная формула закона Кулона справедлива для зарядов, взаимодействующих в вакууме. Если заряды находятся в какой-то среде, то в формулу вводят дополнительный коэффициент, характеризующий свойства этой среды.

**3. Принцип суперпозиции сил.** Этот принцип вам известен из механики. Как показывают опыты, сила взаимодействия двух точечных зарядов не изменяется при появлении возле них третьего заряда или любого другого числа зарядов.

На рисунке 151 показаны три взаимодействующих электрических заряда —  $q_1, q_2, q_3$ . Равнодействующая сила  $\vec{F}_1$ , действующая на заряд  $q_1$ , является геометрической суммой сил  $\vec{F}_{12}$  и  $\vec{F}_{13}$  взаимодействия этого заряда с зарядами  $q_2$  и  $q_3$ , определяемыми по закону Кулона:

$$\vec{F}_1 = \vec{F}_{12} + \vec{F}_{13}.$$

**4. Аналогия между электрическими и гравитационными силами.** Закон Кулона, характеризующий электрическое взаимодействие, по форме записи похож на закон всемирного тяготения Ньютона, определяющий силу гравитационного взаимодействия:

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}.$$

В обоих случаях сила взаимодействия обратно пропорциональна квадрату расстояния между телами и прямо пропорциональна величинам, характеризующим те свойства тел, которые определяют взаимодействия, — массам в одном случае и зарядам — в другом. Кроме того, учёными использовалась одна и та же экспериментальная установка (крутильные весы) для измерения сил электрического и гравитационного взаимодействия.

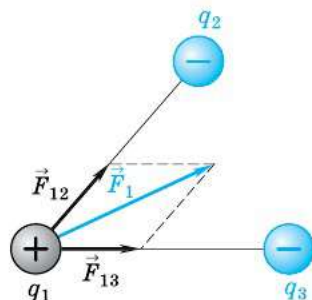


Рис. 151

Однако между силами гравитационного и электрического взаимодействия существует и важное различие. Ньютоновская сила тяготения — это всегда сила притяжения. Кулоновская же сила взаимодействия зарядов может быть и силой притяжения (между разноимёнными зарядами), и силой отталкивания (между одноимёнными зарядами).

### Вопросы для самопроверки

1. Сформулируйте закон Кулона.
2. Какие заряды можно считать точечными?
3. Чему равен в единицах СИ коэффициент  $k$ ? Каков его физический смысл?
4. Как устроены крутильные весы и какие эксперименты проводил с ними Кулон?
5. Каковы границы применимости закона Кулона?
6. В чём состоит принцип суперпозиции сил? Чему равна результирующая сила, действующая на электрический заряд со стороны других зарядов?

### Упражнение 35

1. Чему равна сила взаимодействия двух одинаковых точечных зарядов, равных  $9 \cdot 10^{-9}$  Кл, находящихся на расстоянии 0,3 м друг от друга в вакууме?
2. Точечные заряды  $5 \cdot 10^{-8}$  Кл и  $8 \cdot 10^{-8}$  Кл закреплены на расстоянии 2 м друг от друга в вакууме. В центре прямой, соединяющей заряды, находится третий заряд, равный  $1 \cdot 10^{-9}$  Кл. Чему равен модуль силы, действующей на третий заряд? Куда направлена эта сила?
3. Во сколько раз кулоновская сила взаимодействия электрона с ядром в атоме водорода больше силы их гравитационного взаимодействия? Масса электрона  $9,1 \cdot 10^{-31}$  кг, масса протона  $1,67 \cdot 10^{-27}$  кг.

### Вопросы для дискуссии

1. Как будут взаимодействовать два отрицательно заряженных шара, если заряд одного из них много больше заряда другого ( $q_1 \gg q_2$ )? Как вы считаете, возможно ли использование закона Кулона в подобной ситуации? Ответ обоснуйте.
2. Учёные установили, что Земля имеет положительный заряд. Можно ли земной шар считать точечным зарядом и использовать в расчётах закон Кулона?

## § 51. Электрическое поле

**1. Электрическое поле и его свойства.** Заряженные тела взаимодействуют друг с другом. Это подтверждают многочисленные опыты, а закон Кулона позволяет определить силу взаимодействия неподвижных электрических зарядов. Однако причины подобного взаимодействия, его механизм законом не раскрываются.

Немногим более чем через полвека после открытия закона Кулона, благодаря работам Фарадея и Максвелла, было установлено, что электрический заряд создаёт в окружающем пространстве **электрическое поле**, которое действует на другие заряды.

Самая существенная особенность электрического поля — его материальность, т. е. *электрическое поле — это вид материи*. Электрическое поле отличается от вещества — другого вида материи прежде всего тем, что его невозможно непосредственно воспринимать с помощью органов чувств. В реальности существования электрического поля можно убедиться только по его действиям: заряды, создающие поле, притягивают или отталкивают заряды, которые в него вносятся.

Электрическое поле, существующее вокруг неподвижных зарядов, называют **электростатическим**. Основные особенности электростатического поля заключаются в том, что оно:

- создаётся неподвижными электрическими зарядами;
- действует на электрические заряды.

**2. Напряжённость электростатического поля.** Если в электростатическое поле, созданное каким-либо зарядом, внести небольшое заряженное тело (*пробный заряд*), то на него поле подействует с определённой силой. Внеся в эту же точку поля другой (большой или меньший) заряд, можно обнаружить, что действующая сила увеличится или уменьшится прямо пропорционально этому заряду. Это следует и из закона Кулона.

Отношение силы, действующей на помещённый в некоторую точку поля заряд, к значению этого заряда для данной точки поля остаётся неизменным. Это отношение является силовой характеристикой электрического поля. Её называют **напряжённостью электростатического поля** и обозначают буквой  $E$ .

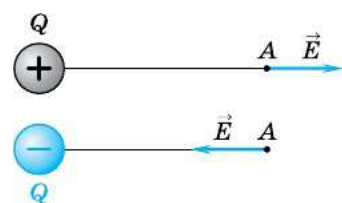


Рис. 152

Напряжённостью электростатического поля в определённой его точке называют физическую величину, равную отношению силы, с которой поле действует в данной точке на заряд, к значению этого заряда.

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}.$$

В СИ единица напряжённости поля — *ньютон на кулон* (Н/Кл).

Напряжённость поля, как и сила, величина векторная. Вектор напряжённости в любой точке электростатического поля направлен вдоль прямой, соединяющей эту точку и заряд, создающий поле. Направление напряжённости поля совпадает с направлением силы Кулона, действующей на положительный электрический заряд.

На рисунке 152 показано направление в точке \$A\$ вектора \$\vec{E}\$ поля, созданного положительным и отрицательным зарядами \$Q\$.

**3. Напряжённость поля точечного заряда.** Найдём напряжённость электростатического поля, созданного зарядом \$Q\$, в некоторой точке. Внесём в поле положительный заряд \$q\$.

По закону Кулона модуль силы взаимодействия зарядов равен:

$$F = k \frac{Qq}{r^2},$$

где \$Q\$ и \$q\$ — модули зарядов, \$r\$ — расстояние между ними. Подставляя выражение для \$F\$ в формулу напряжённости поля, получим:

$$E = \frac{F}{q} = k \frac{Qq}{r^2 q};$$

$$E = k \frac{Q}{r^2}.$$

**4. Принцип суперпозиции полей.** Поскольку напряжённость является силовой характеристикой поля и определяется как сила, действующая на единичный положительный заряд, можно считать, что принцип суперпозиции справедлив и для напряжённости. В том случае, когда источников электростатического поля несколько, результирующая напряжённость электростатического поля определяется геометрической суммой напряжённостей полей, созданных каждым зарядом. В этом заключается *принцип суперпозиции полей*, который может быть сформулирован следующим образом:



если в определённой точке пространства электростатическое поле создаётся несколькими источниками, напряжённости которых в данной точке  $\vec{E}_1$ ,  $\vec{E}_2$  и т. д., то результирующая напряжённость в этой точке равна:

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \dots + \vec{E}_n,$$

где  $n$  — число источников поля.

На рисунке 153 показано, как можно определить напряжённость поля в точке  $A$ , если оно создано двумя точечными электрическими зарядами противоположных знаков  $Q_1$  и  $-Q_2$ . Напряжённость поля заряда  $Q_1$  в точке  $A$  —  $\vec{E}_1$ , заряда  $Q_2$  —  $\vec{E}_2$ . Результирующая напряжённость поля  $\vec{E}$  в точке  $A$  равна геометрической сумме напряжённостей  $\vec{E}_1$  и  $\vec{E}_2$ .

Принцип суперпозиции полей позволяет рассчитать напряжённость поля, созданного протяжённым источником (линейным заряженным проводником, заряженной плоскостью, шаром и т. п.).

### Вопросы для самопроверки

1. Каковы основные особенности электростатического поля?
2. Дайте определение напряжённости электростатического поля.
3. Как определить напряжённость электростатического поля точечного заряда в некоторой точке?
4. В чём заключается принцип суперпозиции полей?

### Упражнение 36

1. Как изменится напряжённость поля точечного заряда  $Q$ , если:
  - а) расстояние  $r$  от некоторой точки до заряда увеличится вдвое;
  - б) заряд  $Q$  уменьшится вдвое, а расстояние  $r$  от некоторой точки до заряда увеличится вдвое?
2. Пробный заряд помещают в разные точки электростатического поля, созданного зарядом  $Q$  (рис. 154). В какой точке напряжённость поля будет наибольшей; наименьшей? В каких точках она одинакова?
3. В электростатическом поле, напряжённость которого  $1,6 \cdot 10^5$  Н/Кл, находится заряд  $4 \cdot 10^{-7}$  Кл. Чему равна сила, действующая на заряд со стороны электростатического поля?

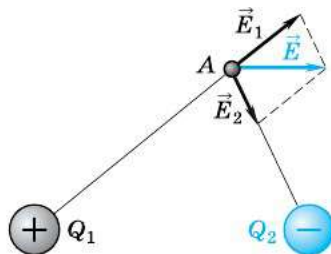


Рис. 153

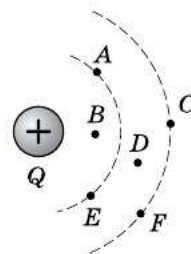


Рис. 154

4. Чему равен заряд, создающий электростатическое поле, если на расстоянии 1 см от заряда напряжённость поля равна  $3,6 \cdot 10^5$  Н/Кл?

5\*. Расстояние между зарядами  $3,2 \cdot 10^{-6}$  Кл и  $-3,2 \cdot 10^{-6}$  Кл равно 12 см. Определите напряжённость электростатического поля в точке, удалённой от обоих зарядов на 8 см.

## § 52. Линии напряжённости электростатического поля

**1. Линии напряжённости электростатического поля.** Как вы знаете, увидеть электрическое поле невозможно. Это создаёт определённые неудобства для его изучения. Поэтому Фарадеем был предложен способ наглядного изображения полей с помощью линий напряжённости.

**Линии напряжённости электростатического поля — линии, касательные к которым в каждой точке поля совпадают с направлением вектора напряжённости электростатического поля.**

Поскольку напряжённость электростатического поля имеет определённое направление, линии напряжённости или силовые линии также имеют направление. Принято считать, что линии напряжённости электростатического поля начинаются на положительных зарядах, а заканчиваются на отрицательных (для одиночных зарядов линии напряжённости уходят в бесконечность).

Линии напряжённости поля, созданного положительным зарядом, выглядят так, как показано на рисунке 155, *а*, а отрицательного — как на рисунке 155, *б*. Каждая стрелка на рисунках совпадает с направлением напряжённости поля. Линии напряжённости в первом случае направлены от заряда в бесконечность, а во втором — из бесконечности к отрицательному заряду и заканчиваются на нём.

На рисунке 156 приведены линии напряжённости электростатических полей: двух разноимённо заряженных шариков (рис. 156, *а*); двух одноимённо заряженных шариков (рис. 156, *б*).

На рисунке 156, *в* изображено поле, созданное двумя параллельными пластинами, заряды

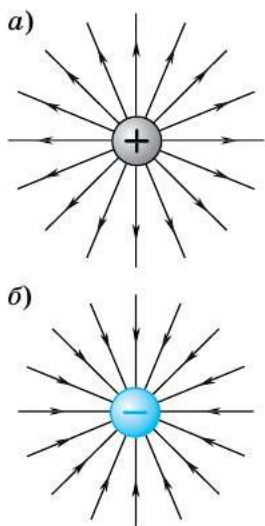


Рис. 155

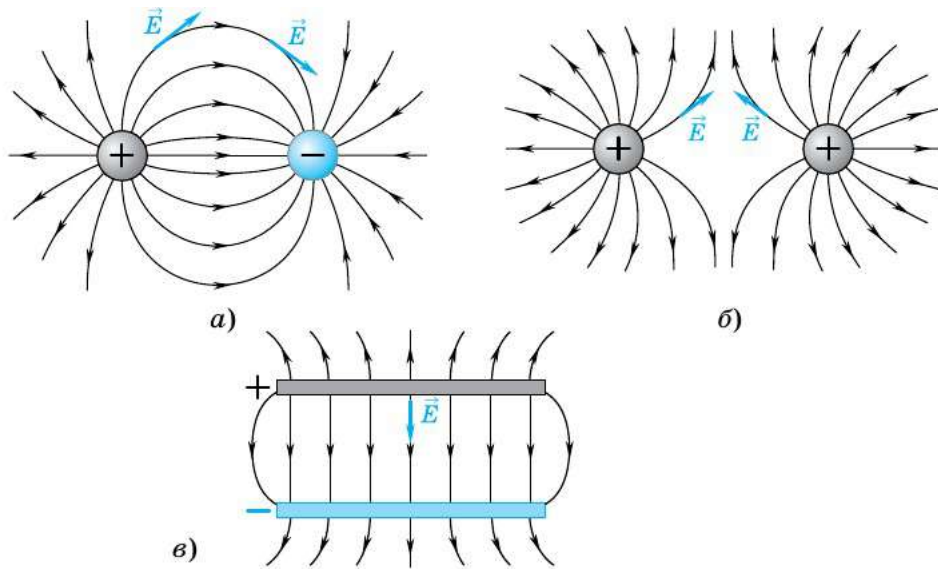


Рис. 156

которых противоположны по знаку и равны по модулю. Длина пластин много больше расстояния между ними. Линии напряжённости поля между пластинами параллельны друг другу. Электрическое поле, существующее между параллельными пластинами, можно приближённо считать **однородным**. Напряжённость однородного поля одинакова по модулю и направлению во всех точках.

Отличительной особенностью линий напряжённости электростатического поля является их непрерывность, а также то, что они никогда не пересекаются.

Густота расположения силовых линий характеризует электростатическое поле: *чем гуще линии, тем больше его напряжённость*, т. е. тем с большей силой оно действует на пробный заряд, помещённый в поле. Напряжённость поля заряда, показанного на рисунке 157, а, больше, чем напряжённость заряда, показанного на рисунке 157, б. Об этом можно судить по густоте линий напряжённости электростатических полей, создаваемых зарядами. На пробный заряд, помещённый поочередно в эти поля

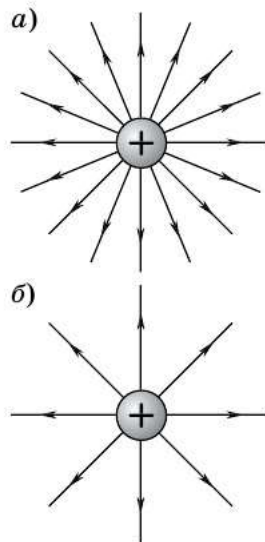


Рис. 157



на одинаковом расстоянии от источника поля, в первом случае действует бóльшая электрическая сила. В однородном электростатическом поле густота силовых линий одинакова.

Изображая электрические поля с помощью линий напряжённости, следует помнить, что они являются графической моделью.

**2. Наглядные картины электростатических полей.** Для получения наглядных картин электростатических полей в опытах используют ориентирующее действие электрического поля на мелкие частицы вещества.

Нальём в стеклянную кювету вязкий жидкий диэлектрик (касторовое масло, глицерин или вазелин) и насыплем в него частицы, например, манной крупы, талька или мелко настриженных волос. В эту кювету поместим металлическое тело (электрод), соединённое с полюсом электрофорной машины. При сообщении электроду некоторого заряда в жидкости создаётся электрическое поле, под действием которого частицы поворачиваются и выстраиваются вдоль силовых линий. Полученная таким образом картина линий напряжённости показана на рисунке 158. Если взять два электрода и сообщить им сначала разноимённые, а потом одноимённые заряды, то картины силовых линий будут иметь вид, показанный на рисунке 159.

### Вопросы для самопроверки

1. Какие линии называют линиями напряжённости электростатического поля?
2. Для чего вводятся линии напряжённости электростатического поля? Существуют ли они реально?

а)

б)

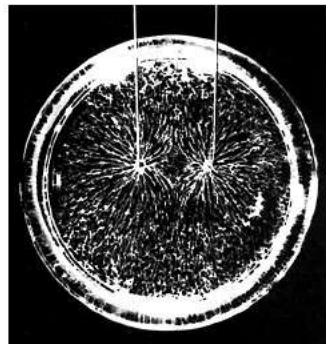
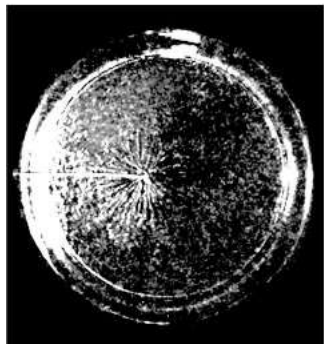


Рис. 158

Рис. 159

3. Как направлены линии напряжённости?
4. Что характеризует густота линий напряжённости?
5. Какое электрическое поле называют однородным? Как направлены линии напряжённости однородного поля?

## § 53. Проводники в электростатическом поле

**1. Электростатическая индукция.** Вещества, в которых присутствуют свободные электрические заряды, называют **проводниками**. Хорошими проводниками являются, например, все металлы, водные растворы солей и кислот.

В металлах свободными заряженными частицами являются электроны. В атомах металлов электроны, находящиеся на внешних оболочках, слабо взаимодействуют с ядром атома и могут утратить с ним связь и свободно передвигаться по всему объёму металла.

Выясним, что происходит в металлическом проводнике, если его внести в электростатическое поле. Для этого поместим металлический проводник  $A$  в электростатическое поле, созданное двумя разноимённо заряженными плоскостями  $B$  и  $C$ . Вектор напряжённости  $\vec{E}_0$  этого поля направлен от пластины  $B$  к пластине  $C$ . Под действием поля находящиеся в проводнике свободные электроны придут в движение (рис. 160), слева на поверхности проводника образуется избыточный отрицательный заряд, а справа — избыточный положительный заряд. Разделившиеся заряды создают своё собственное электростатическое поле напряжённостью  $\vec{E}$ , линии напряжённости которого направлены в сторону, противоположную внешнему полю. Когда напряжённость поля внутри проводника становится равной по модулю напряжённости внешнего поля, движение зарядов прекращается.

В соответствии с законом сохранения электрического заряда избыточные заряды на противоположных поверхностях проводника должны быть равны по модулю. Проверим это на опыте.

Закрепим на стержнях электрометров два плотно соприкасающихся металлических цилиндра  $A$  и  $B$  и внесём их в электростатическое поле положительно заряженного шара (рис. 161,  $a$ ). Стрелки электрометров отклонятся, что свидетельствует о появлении зарядов на цилиндрах. Свободные электроны под действием поля переместятся с цилиндра  $B$  на цилиндр  $A$ ,

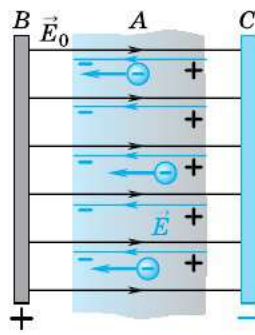


Рис. 160

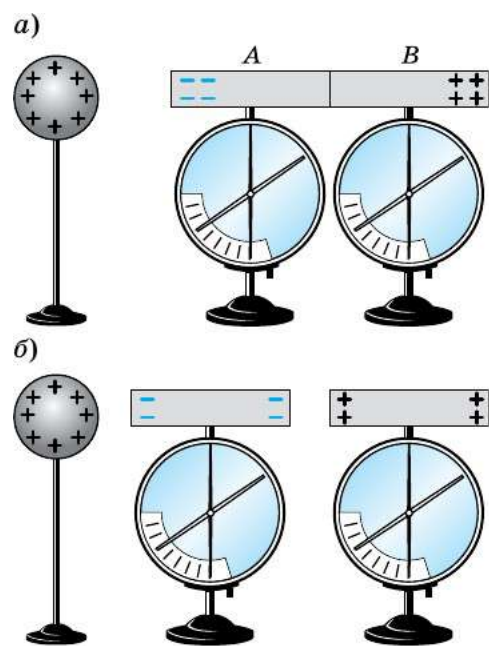


Рис. 161

При разъединении цилиндров в поле заряженного шара на них окажутся равные по модулю и противоположные по знаку заряды (рис. 161, б). Эти заряды сохраняются и в том случае, если заряженный шар, создающий поле, убрать. В том, что заряды цилиндров равны, можно убедиться, соединив их: стрелки электрометров установятся на нуле.

**2. Электростатическая защита.** Как вы знаете, в металлическом проводнике, внесённом в электростатическое поле, возникает собственное поле, которое компенсирует действие внешнего поля. Следовательно, *поле внутри металлического проводника отсутствует*. В этом можно убедиться на опыте.

В кювету с жидким диэлектриком и мелкими взвешенными частицами вещества (как в опыте, описанном в предыдущем параграфе) поместим два плоских электрода и зарядим их от электрофорной машины. Мелкие частицы расположатся между электродами, как показано на рисунке 162, а. Затем поместим в кювету металлическое кольцо. Мелкие частицы переориентируются и расположатся вдоль линий напряжённости электростатического поля, созданного кольцом (рис. 162, б). Внутри же металлического кольца расположение частиц не изменится. Следовательно, элек-

зарядив его отрицательно, а цилиндр *B* из-за недостатка электронов станет положительно заряженным. Явление, при котором на поверхности проводника (в данном случае на соединённых цилиндрах), помещённого в электростатическое поле, появляются электрические заряды, называют **электростатической индукцией** или **электризацией через влияние**. Электрические заряды, возникающие в результате электростатической индукции, называют **индуцированными**.

Если заряженный шар убрать, то стрелки электрометров установятся на нуле, так как в отсутствие электростатического поля электроны распределяются по всему объёму обоих цилиндров.



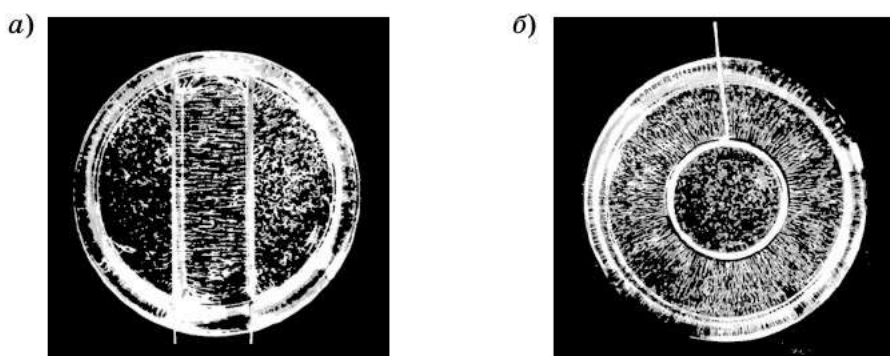


Рис. 162

тростатическое поле внутри кольца не проникает. Кольцо экранирует внутреннее пространство от внешних полей.

На этом свойстве основана *электростатическая защита*. Чтобы защитить чувствительные к электрическому полю приборы, их помещают внутрь замкнутых металлических ящиков-экранов. Чаще, однако, экранируют не приборы, а сам источник электрического поля, от нежелательного воздействия которого необходимо защитить расположенные поблизости устройства.

**3. Распределение зарядов в проводнике.** Выясним, как распределяются заряды на наэлектризованном проводнике. Для этого сообщим проводнику электрический заряд.

Проделаем опыт. Маленьким шариком на изолирующей ручке будем касаться различных точек на внешней поверхности заряженного полого металлического шара, а затем электрометра (рис. 163, а). Отмечая каждый раз угол отклонения стрелки электрометра, можно убедиться, что на поверхности шара заряд распределяется равномерно. Если же коснуться маленьким шариком

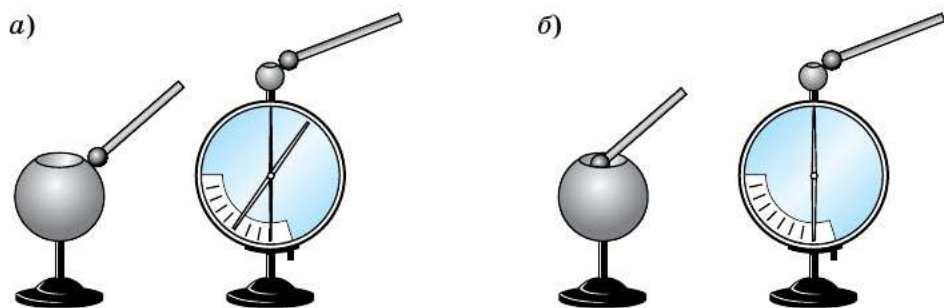


Рис. 163

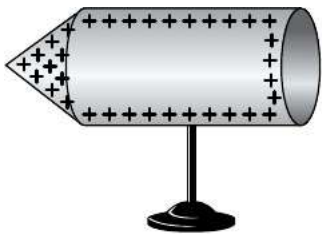


Рис. 164

внутренней поверхности заряженного шара, а затем электрометра, то стрелка электрометра не отклонится (рис. 163, б). Следовательно, на внутренней поверхности шара заряда нет. Этот результат объясняется тем, что между одноимёнными зарядами действуют силы отталкивания. Поэтому заряды стремятся разойтись на возможно большее расстояние и перемещаются на поверхность проводника. Это могут быть скопившиеся у поверхности проводника свободные электроны, если тело заряжено отрицательно, или положительно заряженные ионы, если тело заряжено положительно.

Если же зарядить проводник неправильной формы и также определить заряд на его поверхности, то выяснится, что наибольший заряд находится на выпуклостях проводника, особенно на остриях (рис. 164).

Напряжённость поля около острых выступов заряженного проводника может оказаться настолько большой, что в окружающем воздухе начнётся ионизация молекул и появятся положительные ионы и электроны. Заряженные частицы с тем же знаком заряда, что и на острие, движутся от него, увлекая нейтральные молекулы. Вследствие этого возникает направленное течение воздуха от острия, или, как говорят, «электрический ветер». Его можно обнаружить, если поднести к острию зажжённую свечу: её пламя отклонится в сторону от острия и может быть даже погашено.

Явление стекания зарядов с заострённых проводников приходится учитывать в технике. Для предотвращения стекания зарядов у всех приборов и механизмов, работающих под высоким электрическим напряжением, металлические части делают закруглёнными, а концы металлических стержней снабжают гладкими шариками.

## Вопросы для самопроверки

1. Как ведут себя свободные электроны металла, помещённого во внешнее электростатическое поле?
2. В чём состоит явление электростатической индукции?
3. Объясните опыты с двумя металлическими цилиндрами, помещёнными в электростатическое поле (см. рис. 161).
4. Что такое электростатическая защита?
5. Существует ли поле внутри проводника, помещённого в электростатическое поле? Ответ поясните.



## § 54. Диэлектрики в электростатическом поле

### 1. Поляризация диэлектрика.

Вещества, в которых нет свободных электрических зарядов, называют **диэлектриками** или изоляторами. Примерами хороших диэлектриков являются янтарь, стекло, эбонит, резина, шёлк, пластмасса и др.

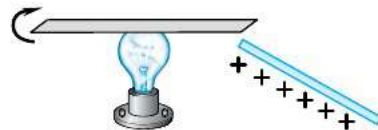


Рис. 165

Выясним, что происходит в диэлектрике при внесении его в электростатическое поле. Для этого проделаем опыт.

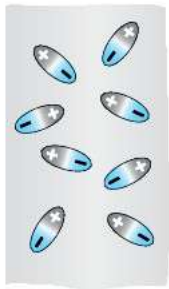
Возьмём длинную деревянную линейку и установим на подставку, например на закреплённую в цоколе электрическую лампу (рис. 165), так, чтобы линейка могла свободно вращаться. Наэлектризуем стеклянную (или эбонитовую) палочку и поднесём её к одному из концов линейки. Линейка начнёт поворачиваться. Следовательно, незаряженный диэлектрик, каким является деревянная линейка, притягивается к заряженному телу. Подобное поведение диэлектрика возможно только при условии появления на нём нескомпенсированного заряда.

Каков же механизм образования заряда на поверхности диэлектрика, ведь в нём нет свободных зарядов, которые могли бы перемещаться под действием электрических сил? Все электроны прочно связаны с атомами и не отрываются от них в нормальном состоянии. Это может означать, что появление электрических зарядов в диэлектрике обусловлено лишь их перераспределением в атомах и молекулах вещества диэлектрика.

**2. Поляризация полярных диэлектриков.** Молекулы некоторых диэлектриков состоят из ионов (например, молекула воды состоит из отрицательного иона кислорода и двух положительных ионов водорода). Центры распределения положительных и отрицательных электрических зарядов таких молекул обычно смещены относительно друг друга, образуя полярную молекулу, или так называемый *электрический диполь*. Электрический диполь — система, образованная двумя равными по модулю разноимёнными точечными зарядами. Диэлектрики, состоящие из молекул-диполей, называют *полярными диэлектриками*.

В отсутствие внешнего электростатического поля молекулы полярного диэлектрика расположены хаотически, и их собственные электростатические поля взаимно компенсируют друг друга (рис. 166, а). При внесении такого диэлектрика в электростатиче-

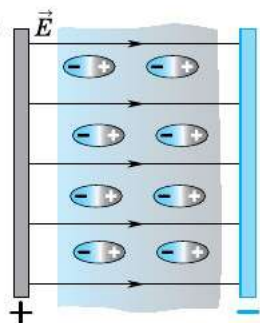
а)



ское поле каждая молекула под действием сил поля поворачивается, стараясь расположиться вдоль линий напряжённости поля (рис. 166, б). В результате одна грань диэлектрика оказывается заряженной отрицательно, а другая — положительно.

**Ориентацию диполей в диэлектрике под действием внешнего электростатического поля называют поляризацией диэлектрика.**

б)



Заряды, которые при этом возникают, называют **поляризационными**.

**3. Поляризация неполярных диэлектриков.** Молекулы некоторых диэлектриков состоят не из ионов, а из атомов, например молекулы водорода, азота и др. В отсутствие внешнего электростатического поля центры распределения положительных и отрицательных зарядов у этих молекул совпадают. Такие молекулы получили название *неполярных*, а диэлектрики, состоящие из них, называют *неполярными диэлектриками*.

Рис. 166

При внесении такого диэлектрика в электростатическое поле центры распределения положительных и отрицательных зарядов молекул диэлектрика смещаются в противоположные стороны, образуя своеобразные гантели-диполи. Оси подобных диполей ориентируются вдоль линий напряжённости внешнего поля. На рисунке 167 представлена модель неполярной молекулы вне поля (рис. 167, а) и в электростатическом поле (рис. 167, б).

В результате, как и в случае с полярными диэлектриками, в неполярных диэлектриках на одной грани появится положительный поляризационный заряд, на другой — отрицательный.

В отличие от свободных зарядов в проводнике, поляризационные заряды в диэлектрике не перемещаются в объёме диэлектрика, а могут только смещаться в пределах своей молекулы. Поэтому их часто называют также *связанными зарядами*. Эти заряды нельзя отделить друг от друга. Так, если поляризованный диэлектрик разрезать пополам, то на одном конце каждой половинки будет некомпенсированный положительный заряд, а на другом — отрицательный.

**4. Электрическое поле внутри диэлектрика.** Поляризационные заряды диэлектрика создают своё собственное электростатическое поле. Вектор напряжённости этого поля направлен навстречу вектору напряжённости внешнего поля и ослабляет его, но не компенсирует полностью (рис. 168).

Если обозначить через  $\vec{E}$  напряжённость поля в диэлектрике, а через  $\vec{E}_0$  — напряжённость поля в вакууме, то отношение

$$\frac{E_0}{E} = \varepsilon$$

показывает, во сколько раз напряжённость поля в диэлектрике меньше напряжённости поля в вакууме. Величину  $\varepsilon$  называют **диэлектрической проницаемостью** вещества.

Различные диэлектрики поляризуются внешним полем по-разному и имеют разную диэлектрическую проницаемость. Так, диэлектрическая проницаемость дистиллированной воды равна 81, а стекла — от 4 до 7 в зависимости от его сорта.

Если заряды находятся не в вакууме, а в какой-то среде, необходимо учитывать, что поляризация среды повлияет на взаимодействие зарядов. Поскольку напряжённость поля в диэлектрике уменьшается в  $\varepsilon$  раз, то и электрические силы, действующие на заряды, также уменьшаются во столько же раз. Следовательно, закон Кулона для зарядов, взаимодействующих в диэлектрике, имеет следующий вид:

$$F = k \frac{q_1 q_2}{\varepsilon r^2}.$$

Вопросы для самопроверки

1. В чём состоит отличие поляризационных зарядов от индуцированных?
2. Как происходит поляризация полярных диэлектриков?
3. Каков механизм поляризации неполярных диэлектриков?

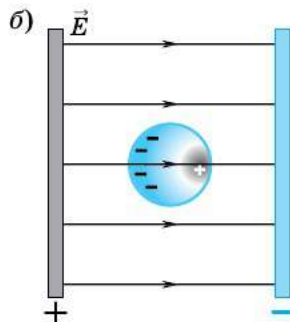
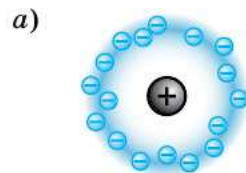


Рис. 167

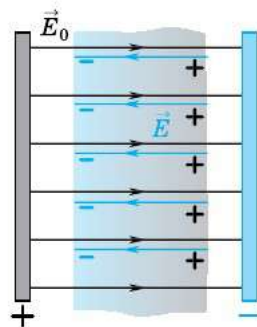


Рис. 168

4. Существует ли поле внутри диэлектрика, находящегося во внешнем электростатическом поле? Компенсирует ли оно внешнее поле?

5. По какой формуле определяется диэлектрическая проницаемость вещества?

## Упражнение 37

1. Запишите формулу для расчёта напряжённости поля точечного заряда, находящегося в диэлектрике.

2. Во сколько раз надо изменить расстояние между двумя зарядами, чтобы сила взаимодействия между ними при погружении в керосин была такая же, как в вакууме? Диэлектрическая проницаемость керосина 2,1.

3. Два одинаковых точечных заряда, находящихся в масле на расстоянии 6 см друг от друга, взаимодействуют с силой  $4 \cdot 10^{-4}$  Н. Чему равны эти заряды, если диэлектрическая проницаемость масла 2,5?

4. Заряд 8,4 нКл находится в жидком диэлектрике. Напряжённость поля этого заряда на расстоянии 3 см равна 40 кН/Кл. Чему равна диэлектрическая проницаемость диэлектрика?

## Самоконтроль

Выполните в рабочей тетради тренировочный тест 8.

## § 55. Работа электростатического поля

**1. Работа по перемещению заряда в однородном электростатическом поле.** Как вы уже знаете, электростатическое поле действует на помещённые в него заряды с определённой силой. Под действием силы заряды могут перемещаться. Из курса механики известно, что при перемещении тела под действием силы совершается работа.

Выясним, от чего зависит работа по перемещению электрического заряда в однородном электростатическом поле.

Пусть в однородном электростатическом поле напряжённостью  $\vec{E}$  заряд  $q$  перемещается из точки 1 в точку 2 (рис. 169, а) вдоль линий напряжённости поля. Работа  $A$ , совершаемая электростатическим полем по перемещению заряда в этом случае, равна:

$$A = Fs = qEd,$$

где  $s$  — путь, пройденный зарядом, равный расстоянию  $d$  между заряженными пластинами,  $F$  — электрическая сила, равная произведению заряда на модуль напряжённости электростатического



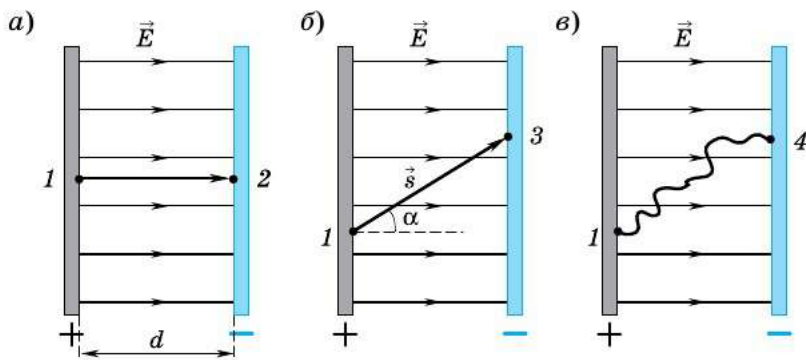


Рис. 169

поля  $F = qE$ . Напомним, что вектор силы, действующей на положительный заряд, направлен так же, как и вектор напряжённости поля.

Если заряд перемещается по прямой из точки 1 в точку 3 так, как показано на рисунке 169, б, то работа поля в этом случае равна:

$$A = F s \cos \alpha = qEd,$$

где  $\alpha$  — угол между направлениями вектора силы  $\vec{F}$  и вектора перемещения заряда  $\vec{s}$ .

Предположим, что перемещение заряда из точки 1 в точку 4 (рис. 169, в) происходит по криволинейной траектории. В этом случае траекторию можно разбить на малые участки и считать каждый участок прямолинейным. Работа поля на каждом таком участке равна:

$$A_i = qE s_i \cos \alpha_i,$$

где  $s_i$  — малый участок траектории,  $\alpha_i$  — угол между малым участком траектории и вектором напряжённости поля.

Можно записать  $A_i = qE d_i$ , где  $d_i = s_i \cos \alpha_i$ . Если сложить работы на всех участках траектории, то получим:

$$A = qEd.$$

Следовательно, *работа электростатического поля по перемещению заряда из одной точки поля в другую не зависит от формы траектории. Она зависит лишь от начального и конечного положения заряда.* Если начальное и конечное положения заряда совпадают, т. е. заряженная частица возвращается в исходное положение, то работа электростатического поля равна нулю.

**2. Электростатическое поле потенциально.** Вам хорошо известно, что все тела притягиваются друг к другу. Это взаимодействие называют *гравитационным*, оно характеризуется гравитационной силой или силой тяжести. Гравитационное взаимодействие так же, как и электростатическое, осуществляется посредством поля. Вокруг тела существует гравитационное поле, которое действует на другое тело. Вы знаете, что при перемещении тела между двумя точками в гравитационном поле работа силы тяжести не зависит от формы траектории его движения. Поле, работа сил которого не зависит от формы траектории, называют **потенциальным**. В § 50 проводилась аналогия между гравитационным и электрическим взаимодействиями. Можно провести аналогию между гравитационным и электростатическим полями: они оба потенциальные.

**3. Потенциальная энергия заряда в однородном электростатическом поле.** Работа потенциального поля — и гравитационного, и электростатического — равна разности потенциальной энергии тела в его начальном и конечном состояниях:

$$A = W_1 - W_2,$$

где  $W_1$  — потенциальная энергия тела в начальном состоянии,  $W_2$  — в конечном.

Потенциальная энергия заряда в данной точке поля зависит от выбора нулевого уровня потенциальной энергии. Если за нулевой уровень принять положение 1 (см. рис. 169), то потенциальная энергия заряда в положении 2 равна:

$$W = -qEd.$$

### Вопросы для самопроверки

1. Зависит ли работа сил электростатического поля от траектории движения заряда?
2. Как вы понимаете утверждение о том, что электростатическое поле потенциально?
3. Чему равна работа по перемещению заряда в электростатическом поле?
4. В чём проявляется аналогия электростатического и гравитационного полей?
5. Как связано изменение потенциальной энергии заряда в электростатическом поле с работой сил этого поля?

1. Сравните работу электростатического поля, образованного заряженными пластинами, при перемещении заряда  $q$  по контуру  $A$  и контуру  $B$  (рис. 170).

2. Заряд, равный  $-5 \cdot 10^{-7}$  Кл, переместили в однородном электростатическом поле напряжённостью  $2 \cdot 10^3$  Н/Кл на 10 см в направлении линий напряжённости. Чему равна работа, совершённая при перемещении заряда?

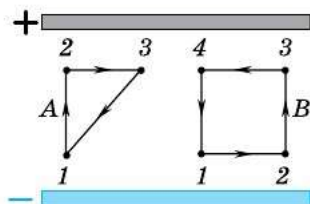


Рис. 170

## § 56. Потенциал электростатического поля

1. **Потенциал электростатического поля как его энергетическая характеристика.** Как вы знаете, силовой характеристикой электростатического поля является напряжённость. Кроме того, вы знаете, что при перемещении заряда в электростатическом поле из одной точки в другую совершается работа, которая равна разности потенциальной энергии заряда в этих точках. Следовательно, можно говорить о том, что существует и энергетическая характеристика электростатического поля — **потенциал**.

**Потенциалом электростатического поля в данной точке пространства  $\varphi$  называют физическую величину, равную отношению потенциальной энергии  $W$  заряда  $q$ , находящегося в поле, к этому заряду.**

$$\varphi = \frac{W}{q}.$$

Потенциал — величина скалярная.

В СИ единицей потенциала является *вольт* (В). Единица названа в честь итальянского учёного **Алессандро Вольты** (1745—1827), внёсшего большой вклад в изучение электрических явлений.

1 В — потенциал такой точки электростатического поля, в которой заряд 1 Кл обладает потенциальной энергией 1 Дж.

$$1 \text{ В} = 1 \text{ Дж/Кл}.$$

2. **Разность потенциалов.** Потенциал, как и потенциальная энергия, величина относительная и зависит от выбора нулевого уровня потенциальной энергии. На практике обычно используют

не значение потенциала в точке, а *разность потенциалов*, которая не зависит от выбора нулевого уровня.

Разность потенциалов обозначают буквой  $U$ , она равна:

$$U = \varphi_1 - \varphi_2,$$

где  $\varphi_1$  — потенциал в начальной точке траектории, а  $\varphi_2$  — в конечной. Разность потенциалов также называют *напряжением*.

Разность потенциалов определяется потенциальной энергией заряда в начальной и конечной точках траектории, а изменение энергии, в свою очередь, равно работе электростатической силы.

**Разностью потенциалов (или напряжением) между двумя точками поля называют физическую величину, равную отношению работы поля по перемещению заряда из одной точки в другую к этому заряду.**

$$U = \frac{A}{q}.$$

Предположим, что в электростатическом поле находится заряженный полый металлический шар. Он взаимодействует с полем и поэтому обладает потенциальной энергией, или потенциалом. Пусть заряд переносят с поверхности заряженного шара в некоторую точку поля. В этом случае работа поля равна произведению заряда и разности потенциалов поверхности шара и точки поля.

Потенциал проводника можно измерить с помощью электрометра. Для этого проводник соединяют со стрелкой электрометра, а его корпус заземляют. Отклонение стрелки электрометра покажет наличие разности потенциалов между проводником и землёй. Приняв потенциал земли равным нулю, можно считать, что электрометр измеряет потенциал проводника.

Если имеются два заряженных проводника, то, соединив один из них со стрелкой, а другой с корпусом электрометра, измеряют разность потенциалов заряженных проводников.

**3. Соотношение между разностью потенциалов и напряжённостью электростатического поля.** Используя формулу для нахождения разности потенциалов, можно записать:

$$A = q(\varphi_1 - \varphi_2).$$

Работа электростатического поля по перемещению заряда равна:

$$A = qEd.$$

Приравнивая правые части записанных равенств, найдём выражение, устанавливающее связь между напряжённостью электростатического поля и разностью потенциалов:



тростатического поля и разность потенциалов, т. е. между двумя характеристиками электростатического поля:

$$E = \frac{U}{d}, \text{ или}$$

$$U = Ed.$$

Таким образом, разность потенциалов двух точек однородного электростатического поля равна произведению напряжённости этого поля и расстояния между точками.

В § 51 была определена единица напряжённости — Н/Кл, вытекающая из определения этой физической величины. Сейчас можно ввести единицу напряжённости, которая следует из соотношения между силовой и энергетической характеристиками электростатического поля.

Напряжённость поля равна единице, если разность потенциалов между двумя точками, находящимися на расстоянии 1 м друг от друга в однородном поле, равна 1 В.

$$1 \text{ В/м} = 1 \text{ Н/Кл.}$$

### Вопросы для самопроверки

1. Какой характеристикой электростатического поля является потенциал?
2. От чего зависит и от чего не зависит потенциал электростатического поля?
3. Дайте определение разности потенциалов.
4. Какая формула выражает взаимосвязь напряжённости электростатического поля и разности потенциалов?
5. Каковы единицы напряжённости электростатического поля?

### Упражнение 39

1. Докажите, что напряжённость 1 В/м равна 1 Н/Кл.
2. Какую работу совершает электростатическое поле при перемещении заряда  $2 \cdot 10^{-6}$  Кл из точки с потенциалом 700 В в точку с потенциалом 200 В?
3. Чему равен электрический заряд, который перемещается из точки с потенциалом 100 В в точку с потенциалом 75 В, если известно, что силы электростатического поля совершают работу 1 мДж?
- 4\*. Поверхности, во всех точках которых потенциал имеет одно и то же значение, называют *эквипотенциальными*. Что собой представляют эквипотенциальные поверхности точечного заряда? Изобразите эквипотенциальные поверхности однородного электростатического поля.



## § 57. Электрическая ёмкость



**1. Электрическая ёмкость проводника.** Выясним, как зависит потенциал проводника от сообщённого ему заряда. Насадим металлический шар на стержень расположенного вдали от возможных источников поля и проводников электрометра, корпус которого заземлён. Будем постепенно увеличивать заряд шара (рис. 171, *a*). Заметим, что во сколько раз увеличится сообщённый заряд, во столько же раз возрастёт его потенциал (рис. 171, *б*), т. е. потенциал проводника прямо пропорционален его заряду:  $q \sim \varphi$ . Следовательно, отношение заряда проводника к его потенциалу есть величина постоянная для данного проводника:

$$\frac{q}{\varphi} = \text{const.}$$

Заземлим теперь корпус двух электрометров (рис. 172) и на один из них насадим полый металлический шар (рис. 172, *a*). Сообщим электрометрам одинаковые по модулю заряды. Можно заметить, что стрелки электрометров отклоняются на разные углы. Это означает, что электрометры имеют разные потенциалы. Чтобы потенциалы стали одинаковыми, электрометру с шаром необходимо сообщить дополнительный заряд. Следовательно, существует некоторая величина, характеризующая свойство проводника, от которого зависит, какой заряд нужно сообщить проводнику, чтобы его потенциал принял определённое значение. Эта величина — **электрическая ёмкость проводника**.

Так, электрическая ёмкость электрометра с шаром (см. рис. 172) больше, чем электрометра без шара.

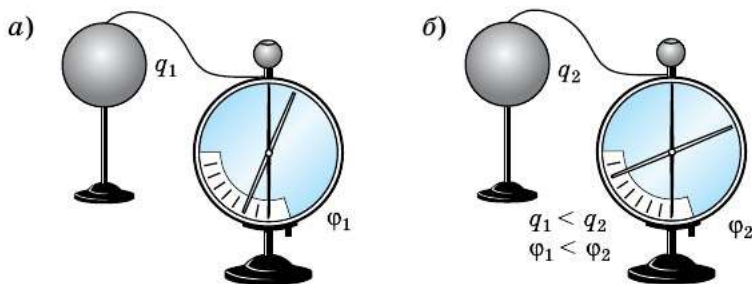


Рис. 171

Электрической ёмкостью проводника называют физическую величину, равную отношению заряда проводника к его потенциалу.

$$C = \frac{q}{\phi}.$$

Электрическая ёмкость (или ёмкость) является характеристикой проводника и не зависит ни от его заряда, ни от потенциала.

Прямая пропорциональная зависимость между потенциалом и зарядом проводника справедлива не только для шарообразного проводника, но и для любого уединённого<sup>1</sup> проводника произвольной формы. Коэффициент пропорциональности между  $q$  и  $\phi$  для каждого проводника определяется его размерами, формой, электрическими свойствами окружающей среды.

В СИ единицей ёмкости является *фарад* ( $\Phi$ ).

$$1 \Phi = 1 \text{ Кл/В.}$$

Ёмкость проводника равна  $1 \Phi$ , если при сообщении ему заряда  $1 \text{ Кл}$  потенциал проводника станет равным  $1 \text{ В}$ .

$1 \Phi$  — очень большая ёмкость. В частности, ёмкость такого огромного проводника, как земной шар ( $R \approx 6400 \text{ км}$ ), равна  $0,7 \text{ м}\Phi$ . Электрическая ёмкость человеческого тела составляет примерно  $0,5 \cdot 10^{-4} \text{ мк}\Phi$ .

**2. Конденсаторы.** Напомним, что большие заряды могут быть сообщены только проводникам больших размеров. Шар, например, которому можно сообщить заряд  $1 \text{ Кл}$ , должен иметь диаметр не меньше  $20 \text{ м}$ . Между тем во многих электротехнических и радиотехнических приборах необходимы устройства, способные при малых размерах и небольших относительно окружающих тел потенциалах накапливать достаточно большие заряды. Эти устройства получили название «конденсаторы».

**Конденсатором называют систему из двух разделённых слоём диэлектрика проводников, размеры которых больше расстояния между ними.**

В зависимости от формы проводников (обкладок или пластин) конденсаторы делятся на плоские, цилиндрические и сфериче-

<sup>1</sup> Уединённым называют проводник, находящийся вдали от заряженных тел и других проводников.

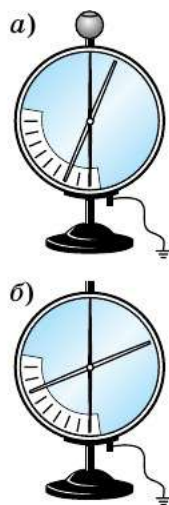


Рис. 172

ские. Чтобы на ёмкость конденсатора не оказывали влияние окружающие тела, проводникам придают такую форму, чтобы поле, создаваемое зарядами на обкладках, было сосредоточено между ними. Этому условию удовлетворяют две плоские пластины, два коаксиальных цилиндра, две концентрические сферы.

Обычный цилиндрический конденсатор представляет собой две ленты металлической фольги, разделённой тонкой пластмассой, парафинированной бумагой или другим изолятором, которые скручены в тугую спираль и запаяны. На практике используются и так называемые воздушные конденсаторы, в которых изолирующим слоем, отделяющим обкладки конденсатора, является воздух.

**3. Электрическая ёмкость конденсатора.** Свойство конденсатора накапливать и сохранять заряд характеризуется электрической ёмкостью. При сообщении обкладкам конденсатора разноимённых электрических зарядов  $+q$  и  $-q$  между ними возникает разность потенциалов.

Электрической ёмкостью конденсатора называют физическую величину, равную отношению заряда на обкладках конденсатора к разности потенциалов между его обкладками.

$$C = \frac{q}{U}.$$

Ёмкость плоского конденсатора зависит от площади его пластин  $S$ , расстояния между ними  $d$  и рода диэлектрика, который находится между пластинами, т. е. от диэлектрической проницаемости вещества  $\varepsilon$ .

Эту зависимость можно проверить на опыте, используя в качестве конденсатора две параллельные металлические пластины. Закрепим в штативах пластины и соединим их с электрометром: одну пластину с его стрелкой, другую — с корпусом (рис. 173). Зарядим конденсатор. Электрометр покажет разность потенциалов между пластинами.

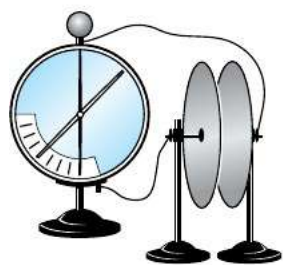


Рис. 173

Сдвигая одну пластину относительно другой, можно уменьшить площадь пластин, находящихся друг против друга. Электрометр покажет, что разность потенциалов при этом будет увеличиваться. Поскольку разность потенциалов обратно пропорциональна ёмкости конденсатора, а заряд пластин не изменился, то можно сделать вывод, что при уменьшении площади пластин конденсатора его ёмкость также уменьшается ( $C \sim S$ ).



Если пластины конденсатора отодвигать друг от друга, не меняя их площади, то разность потенциалов увеличится. Это указывает на уменьшение ёмкости конденсатора. Чем больше расстояние между пластинами конденсатора, тем меньше его ёмкость ( $C \sim 1/d$ ).

Вставив между обкладками конденсатора пластину из диэлектрика, обнаружим уменьшение разности потенциалов. Следовательно, ёмкость конденсатора в этом случае увеличится ( $C \sim \epsilon$ ).

Таким образом, ёмкость плоского конденсатора прямо пропорциональна площади пластин, обратно пропорциональна расстоянию между ними и зависит от свойств диэлектрика, находящегося между ними.

$$C \sim \frac{\epsilon S}{d}.$$

В СИ коэффициент пропорциональности между ёмкостью и определяющими её величинами называют **электрической постоянной**  $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Кл}^2/(\text{Н} \cdot \text{м}^2)$ . Следовательно, ёмкость плоского конденсатора равна:

$$C = \frac{\epsilon \epsilon_0 S}{d}.$$

## Вопросы для самопроверки

1. Дайте определение электрической ёмкости проводника.
2. Что представляет собой плоский конденсатор? Каково его значение?
3. От каких величин зависит ёмкость плоского конденсатора? Опишите опыт, который позволяет установить данную зависимость.

## Упражнение 40

1. Заряд, равный  $5 \cdot 10^{-4} \text{ Кл}$ , создаёт на пластинах конденсатора разность потенциалов 20 В. Чему равна ёмкость конденсатора?
2. Плоский воздушный конденсатор присоединён к источнику постоянного тока. Будет ли меняться заряд конденсатора и напряжение на нём, если заполнить пространство между его обкладками диэлектриком?
3. Пластины плоского конденсатора площадью  $200 \text{ см}^2$  каждая расположены на расстоянии 2 мм друг от друга. Пространство между пластинами заполнено слюдой. Чему равен заряд, сообщённый конденсатору, если напряжение между пластинами 3 кВ, а диэлектрическая проницаемость слюды 6?
- 4\*. Выведите формулу ёмкости плоского конденсатора<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> При выводе используйте предельный переход от сферического конденсатора к плоскому.

## § 58. Энергия электростатического поля заряженного конденсатора

**1. Работа, совершаемая при зарядке плоского конденсатора.** Для того чтобы зарядить конденсатор, необходимо совершить определённую работу. Эта работа равна энергии заряженного конденсатора. Убедиться в том, что заряженный конденсатор обладает энергией, можно, подключив его к электрической лампе. Кратковременная вспышка света свидетельствует о том, что заряженный конденсатор обладает энергией, и при соединении конденсатора с лампой его энергия превращается во внутреннюю энергию спирали лампы.

Суммарный электрический заряд обкладок конденсатора до зарядки и после окончания свечения лампы равен нулю. Единственное изменение, которое произошло при разрядке конденсатора, заключается в том, что исчезло электростатическое поле между его обкладками. Следовательно, энергией обладало электростатическое поле, существующее между обкладками заряженного конденсатора.

Выясним, чему равна энергия электростатического поля плоского конденсатора.

Представим себе, что конденсатор заряжается путём постепенного переноса заряда с одной пластины на другую. Очевидно, что одна пластина при этом зарядится положительно, другая — отрицательно. Как только пластины приобретут заряды, между ними возникнет разность потенциалов  $U_0$ , которая будет расти по мере увеличения заряда на пластинах.

Обозначим малый заряд, перенесённый с одной пластины конденсатора на другую, через  $q_0$ . Для перемещения заряда  $q_0$  с одной пластины на другую должна быть совершена работа  $A_0$ , которая равна

$$A_0 = U_0 q_0.$$

Будем повторять эту процедуру столько раз, сколько нужно для того, чтобы на пластинах получить заряды  $+q$  и  $-q$ .

Полная работа, необходимая для сообщения пластинам конденсатора зарядов  $+q$  и  $-q$ , вычисляется по формуле  $A = \frac{qU}{2}$ , где  $U$  — конечное напряжение на пластинах конденсатора. Эта работа равна энергии заряженного плоского конденсатора.

## 2. Энергия электростатического поля.

Работу, совершённую при зарядке конденсатора, можно определить графически. График зависимости напряжения на обкладках конденсатора от заряда на его обкладках (рис. 174) представляет собой прямую, проходящую через начало координат. Площадь треугольника, образованного графиком, осью абсцисс и перпендикуляром, восставленным к оси абсцисс в точке  $q$ , равна:

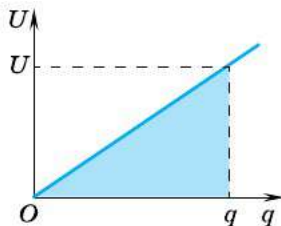


Рис. 174

$$S = \frac{Uq}{2}.$$

Следовательно, работа по переносу заряда с одной пластины на другую (энергия заряженного конденсатора) численно равна площади обозначенного треугольника.

Энергия электростатического поля плоского конденсатора равна работе по его зарядке:

$$W = A.$$

Поскольку  $C = q/U$ , можно записать:

$$W = \frac{Uq}{2} = \frac{q^2}{2C} = \frac{CU^2}{2}.$$

При вычислении энергии конденсатора можно пользоваться любым из этих выражений в зависимости от того, какие величины известны.

### Вопросы для самопроверки

1. Опишите опыт, показывающий, что электростатическое поле между обкладками заряженного конденсатора обладает энергией.
2. Объясните, как, используя график зависимости напряжения на обкладках конденсатора от заряда на его обкладках, можно вычислить работу при зарядке конденсатора.
3. По какой формуле можно рассчитать энергию электростатического поля заряженного конденсатора?

### Упражнение 41

1. Как изменится энергия заряженного конденсатора при увеличении расстояния между его обкладками, если:  
а) конденсатор отключён от источника тока;  
б) конденсатор подключён к источнику тока?



2. Чему равна энергия заряженного конденсатора ёмкостью 0,2 мкФ, если разность потенциалов между его обкладками 200 В?
3. Энергия фотовспышки лампы, питаемой от конденсатора, равна 36 Дж. Ёмкость конденсатора 800 мкФ. Рассчитайте напряжение, до которого заряжен конденсатор.

## Самоконтроль

Выполните в рабочей тетради тренировочный тест 9.



### Основное в главе

1. Физическая модель — точечный электрический заряд, графическая модель — линии напряжённости электростатического поля.

2. Основные величины (табл. 37).

Таблица 37

Величина	Обозначение	Единица	Определение	Формула
Электрический заряд	$q$	Кл	Физическая величина, характеризующая способность тела к электрическому взаимодействию	
Напряжённость электростатического поля  Напряжённость поля точечного заряда	$E$	Н/Кл; В/м	Физическая величина, равная отношению силы, с которой поле действует в данной точке на заряд, к значению этого заряда	$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}$  $E = k \frac{Q}{r^2}$
Потенциал электростатического поля	$\varphi$	В	Физическая величина, равная отношению потенциальной энергии заряда, находящегося в данной точке поля, к этому заряду	$\varphi = \frac{W}{q}$



<i>Величина</i>	<i>Обозначение</i>	<i>Единица</i>	<i>Определение</i>	<i>Формула</i>
Разность потенциалов (напряжение)	$U$	В	Физическая величина, равная отношению работы поля по перемещению заряда из одной точки в другую к этому заряду	$U = \frac{A}{q} = \varphi_1 - \varphi_2 = \frac{A}{q}$
Электрическая ёмкость проводника	$C$	Ф	Физическая величина, равная отношению заряда проводника к его потенциалу	$C = \frac{q}{\varphi}$
Электрическая ёмкость конденсатора	$C$	Ф	Физическая величина, равная отношению заряда на обкладках конденсатора к разности потенциалов между его обкладками	$C = \frac{q}{U}$

### 3. Законы электростатики (табл. 38).

Таблица 38

<i>Закон</i>	<i>Формулировка</i>	<i>Математическая запись</i>
Закон сохранения электрического заряда	Алгебраическая сумма электрических зарядов в замкнутой системе остаётся постоянной	$q_1 + q_2 + q_3 + \dots + q_n = \text{const}$
Закон Кулона	Сила взаимодействия двух точечных неподвижных зарядов в вакууме прямо пропорциональна произведению модулей зарядов и обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними	$F = k \frac{q_1 q_2}{r^2}$

## Темы проектов

1. Применение электростатической защиты в быту.
2. Дактилоскопия как метод получения и анализа информации.
3. Электрическое поле Земли.
4. Шаровая молния.

## Исследовательские задания

1. Электризация различных тел.
2. Исследование зависимости угла наклона подвешенных на нитях тел, находящихся в электрическом поле, от массы тел.
3. Потрите газетой надутый воздухом воздушный шарик, поднесите к потолку и отпустите. Зафиксируйте время, в течение которого шарик оставался висеть у потолка. Объясните причину подобного поведения шарика.
4. Проанализируйте предложенную физическую ситуацию и ответьте на поставленные вопросы.

«В однородное электрическое поле вносят две соединённые и незаряженные пластинки, укрепленные на изолирующих ручках. В электрическом поле пластинки разъединяют и определяют наличие зарядов на них.

1. Появятся ли заряды на пластинках, и если вы считаете, что появятся, то откуда и почему? Одинакового ли они знака?
2. Будут ли пластинки заряжены, если их разъединить после вынесения из поля? Почему?
3. Какой вывод можно сделать на основании такого опыта?»

Оцените правильность своих ответов в реальном эксперименте. Для создания однородного поля можно использовать разборный конденсатор, для определения заряда на пластинах — электрометр или электроскоп.

# Лабораторные работы

## Вычисление погрешностей измерений в лабораторных работах

### *Измерение физических величин*

**Измерить физическую величину** — это значит определить её значение опытным путём с помощью измерительных приборов (средств измерения).

Некоторые физические величины могут быть измерены непосредственно с помощью соответствующих приборов. Например, время, масса, сила тока, напряжение и др. Значения других величин измерить непосредственно нельзя: их определяют путём математических операций со значениями величин, измеренных с помощью приборов. К таким величинам относятся, например, жёсткость тела, коэффициент трения, ёмкость конденсатора и др. В связи с этим различают прямые и косвенные измерения.

**Прямое измерение** — определение значения физической величины непосредственно с помощью измерительного прибора.

**Косвенное измерение** — определение значения физической величины с использованием формулы, связывающей её с другими величинами, измеренными непосредственно с помощью прибора.

### *Причины и виды погрешностей измерений*

Измерительные приборы имеют либо шкалу, либо экран, на котором высвечивается значение измеряемой величины. Обычно на шкале отмечены пределы измерений величины и её единица.

**Цена деления шкалы  $C$**  — это значение измеряемой величины, соответствующее одному делению шкалы (или минимальная раз-

ность между числами, высвечивающимися на экране цифрового прибора, например на экране электронных часов). За деление шкалы прибора принимают участок шкалы между двумя соседними метками.

Получить точное значение измеряемой величины невозможно. Причин этому несколько. Одной из них является цена деления шкалы измерительного прибора: чем она меньше, тем точнее выполнено измерение. Ещё одним фактором является несовершенство конструкции измерительных приборов. На точность измерения влияет и используемый для этого метод, а также соблюдение экспериментатором правил пользования измерительными приборами.

Таким образом, в процессе измерения получают значение физической величины  $a$ , которое отличается от истинного значения на некоторую величину  $\Delta a$ , называемую **абсолютной погрешностью измерения**.

Погрешности прямых измерений делят на четыре группы: систематические, случайные, приборные и промахи.

К *систематическим* погрешностям относят такие, которые повторяются от эксперимента к эксперименту. Одной из причин систематических погрешностей может являться неисправность измерительного прибора (например, начальное положение стрелочного прибора находится не на нулевой отметке, пружина динамометра имеет остаточную деформацию и т. п.). Другая причина систематических погрешностей связана с несовершенством используемого метода измерения. Поскольку обычно при выполнении эксперимента выбирают метод, вносящий наименьшую погрешность в измерение, и пользуются исправными приборами, то систематическую погрешность можно не учитывать.

*Случайные* погрешности возникают в процессе измерения в результате неконтролируемых факторов. Такая погрешность существует, например, при измерении диаметра сечения проволоки при определении её сопротивления, поскольку диаметр не является строго одинаковым на всей длине проволоки. Для учёта случайной погрешности используют метод среднего арифметического. Для этого измеряют диаметр проволоки в нескольких местах и находят среднее арифметическое:

$$a_{\text{ср}} = \frac{a_1 + a_2 + \dots + a_n}{n},$$

где  $n$  — число измерений.

Затем вычисляют отклонение каждого результата от среднего арифметического и среднее отклонение:

$$\Delta a_1 = |a_{\text{cp}} - a_1|; \Delta a_2 = |a_{\text{cp}} - a_2|; \Delta a_n = |a_{\text{cp}} - a_n|;$$

$$\Delta a_{\text{cp}} = \frac{\Delta a_1 + \Delta a_2 + \dots + \Delta a_n}{n}.$$

Это и будет случайная погрешность, или погрешность среднего арифметического.

*Приборная* погрешность обусловлена заложенной при изготовлении прибора точностью его показаний. Различают два вида приборных погрешностей. Одна из них связана с классом точности прибора, который обычно указывается в его паспорте. Если класс точности прибора составляет, например, 1,2, то это означает, что абсолютная погрешность измерений составляет 1,2% от верхнего предела шкалы прибора, и её можно вычислить. Если класс точности прибора не указан, то абсолютную погрешность принимают равной половине цены деления шкалы прибора:

$$\Delta a_{\text{пр}} = \frac{C}{2}.$$

Вторая приборная погрешность, называемая *погрешностью отсчёта*, связана с дискретностью шкалы прибора. Очень часто стрелка прибора останавливается не на метке шкалы, а между метками. В этом случае за измеренное значение величины принимают то значение, ближе к которому остановилась стрелка, а погрешность отсчёта считают равной половине цены деления:

$$\Delta a_o = \frac{C}{2}.$$

Если показания приборов изменяются скачкообразно, например механического секундомера, то погрешность отсчёта принимают равной цене деления:  $\Delta a_o = C$ .

При использовании электронных приборов (электронный секундомер) погрешность отсчёта равна последнему разряду высвечиваемого на индикаторе числа. Если, например, показание электронного секундомера равно 2,5 с, то погрешность отсчёта составляет  $\Delta a_o = 0,1$  с.

*Промахами* называют ошибки, возникающие из-за несоблюдения экспериментатором правил использования приборов. Причинами промахов являются такие ошибки экспериментатора, как не-

правильное расположение приборов, положение глаз при снятии показаний, определение цены деления шкалы прибора и др.

Обычно при выполнении фронтальных лабораторных работ при условии работы с исправными приборами *учитывают приборную погрешность, связанную с погрешностью отсчёта, и погрешность среднего арифметического.*

### *Абсолютная и относительная погрешности измерений*

Точность измерения физической величины характеризуют абсолютной и относительной погрешностями.

При прямом измерении *абсолютная погрешность* равна в зависимости от того, какую величину измеряют, либо погрешности отсчёта, либо сумме погрешности отсчёта и погрешности среднего арифметического:

$$\Delta a = \Delta a_o \text{ или } \Delta a = \Delta a_o + \Delta a_{\text{ср}}.$$

Результат измерения с учётом абсолютной погрешности записывается так:

$$a = a_{\text{изм}} \pm \Delta a.$$

Абсолютная погрешность определяет значение интервала, в котором лежит истинное значение измеренной величины.

Например, если измеренное значение силы тяжести, действующей на тело, равно 2 Н, а цена деления шкалы динамометра 0,5 Н, то абсолютная погрешность измерения составляет 0,25 Н. Результат измерения следует записать так:

$$F_{\text{тяж}} = (2,00 \pm 0,25) \text{ Н}.$$

Это означает, что истинное значение силы тяжести лежит в интервале от 1,75 до 2,25 Н.

Зная абсолютную погрешность, сложно оценить, насколько точно выполнено измерение. Для этого вычисляют относительную погрешность.

**Относительная погрешность** равна отношению абсолютной погрешности к измеренному значению величины. Она обозначается буквой  $\delta$  и вычисляется по формуле:

$$\delta a = \frac{\Delta a}{a_{\text{изм}}} \cdot 100\%.$$

В рассмотренном выше примере относительная погрешность измерения силы тяжести равна:

$$\delta F_{\text{тяж}} = \frac{0,25}{2} \cdot 100\% = 12,5\%.$$

Относительная погрешность характеризует точность измерения: чем она меньше, тем точность измерения выше.

### *Метод вычисления погрешности прямых измерений*

Выполняя прямые измерения величин, для расчёта погрешности необходимо придерживаться следующей последовательности действий.

1. Определите приборную погрешность измерения величины, соотнося её с ценой деления шкалы прибора  $\Delta a_{\text{пр}}$ .

2. Измерьте физическую величину  $a_{\text{изм}}$ .

3. В случае наличия случайной погрешности и возможности её учёта выполните несколько измерений величины, определите погрешность среднего арифметического  $\Delta a_{\text{ср}}$  и вычислите абсолютную погрешность измерения:

$$\Delta a = \Delta a_{\text{пр}} + \Delta a_{\text{ср}}.$$

4. Запишите результат измерения с учётом абсолютной погрешности измерения:

$$a = a_{\text{изм}} \pm \Delta a.$$

5. Вычислите относительную погрешность измерения:

$$\delta a = \frac{\Delta a}{a_{\text{изм}}} \cdot 100\%.$$

Для уменьшения погрешности измерения необходимо прежде всего соблюдать правила пользования приборами.

При измерении малых величин, например диаметра горошины, массы или объёма капли воды, используют приём, позволяющий уменьшить погрешность измерения. Он заключается в том, что измеряют диаметр нескольких горошин, объём или массу нескольких капель, а затем полученное значение делят на число горошин или капель. При этом погрешность измерения уменьшается в число раз, равное числу горошин или капель.

Например, если нужно измерить диаметр горошины, то в ряд укладывают  $n = 20$  горошин и с помощью линейки с миллиметровыми делениями измеряют длину ряда. Предположим, длина ряда равна 86 мм. Результат измерения записывают следующим об-

разом:  $l = (86,0 \pm 0,5)$  мм. Диаметр одной горошины равен  $d = \frac{l}{n}$ .

Разделив на число горошин длину ряда и погрешность измерения, получим  $d = (4,300 \pm 0,025)$  мм. Относительная погрешность в данном эксперименте равна:

$$\delta d = \frac{0,025}{4,3} \cdot 100\% = 0,6\%.$$

Если бы с помощью линейки измеряли диаметр одной горошины, то относительная погрешность оказалась бы равной

$$\delta d = \frac{0,5}{4,3} \cdot 100\% = 12\%.$$

### *Методы вычисления погрешности косвенных измерений*

При косвенном измерении значение величины получают, используя формулу, связывающую искомую величину с другими величинами. В неё входят величины, значения которых получают в результате прямых измерений, а также могут входить постоянные величины, в том числе фундаментальные физические константы, значения которых приведены в справочных таблицах. Поскольку прямые измерения выполняются с некоторой погрешностью, то и косвенное измерение тоже имеет погрешность. Значения справочных величин и фундаментальных физических постоянных приведены с большой точностью, поэтому погрешностью их измерения можно пренебречь.

Существует несколько методов вычисления погрешности косвенных измерений. Рассмотрим два наиболее часто используемых метода: метод границ и метод оценки.

*Метод границ.* Как уже говорилось, значение измеренной величины находится в некоторой области, границы которой определяются абсолютной погрешностью. Предположим, что в лабораторной работе измеряют сопротивление резистора с помощью амперметра и вольтметра. Значение сопротивления определяют по

формуле  $R = \frac{U}{I}$ . Напряжение на резисторе равно  $U = (1,6 \pm 0,1)$  В, а сила тока  $I = (0,80 \pm 0,05)$  А. Измеренное сопротивление резистора  $R = \frac{1,6 \text{ В}}{0,8 \text{ А}} = 2 \text{ Ом}$ .

Для вычисления погрешности измерения сопротивления определяют нижние и верхние границы значений силы тока, напряжения и сопротивления. Верхняя граница величины равна сумме её измеренного значения и абсолютной погрешности измерения;



нижняя граница равна разности измеренного значения и абсолютной погрешности измерения (табл. 39).

**Таблица 39**

<i>Величина</i>	<i>Верхняя граница</i>	<i>Нижняя граница</i>
Сила тока $I$ , А	0,85	0,75
Напряжение $U$ , В	1,7	1,5
Сопротивление $R$ , Ом	2,27	1,76

Верхнюю границу значения сопротивления находим, разделив верхнюю границу значения напряжения на нижнюю границу значения силы тока, а нижнюю границу значения сопротивления — разделив нижнюю границу значения напряжения на верхнюю границу значения силы тока.

Значение сопротивления получаем как полусумму верхней и нижней его границ:

$$R = \frac{2,27 \text{ Ом} + 1,76 \text{ Ом}}{2} = 2,02 \text{ Ом.}$$

Абсолютная погрешность измерения равна полуразности верхней и нижней границ значений сопротивления:

$$\Delta R = \frac{2,27 \text{ Ом} - 1,76 \text{ Ом}}{2} = 0,26 \text{ Ом.}$$

Таким образом, результат измерения сопротивления таков:

$$R = (2,02 \pm 0,26) \text{ Ом.}$$

В таблице 40 приведены формулы для расчёта верхней и нижней границ результатов косвенных измерений.

**Таблица 40**

<i>Расчётная формула</i>	<i>Верхняя граница</i>	<i>Нижняя граница</i>
$a = x + y$	$a_{\text{вГ}} = x_{\text{вГ}} + y_{\text{вГ}}$	$a_{\text{нГ}} = x_{\text{нГ}} + y_{\text{нГ}}$
$a = x - y$	$a_{\text{вГ}} = x_{\text{вГ}} - y_{\text{вГ}}$	$a_{\text{нГ}} = x_{\text{нГ}} - y_{\text{нГ}}$
$a = xy$	$a_{\text{вГ}} = x_{\text{вГ}} y_{\text{вГ}}$	$a_{\text{нГ}} = x_{\text{нГ}} y_{\text{нГ}}$
$a = \frac{x}{y}$	$a_{\text{вГ}} = \frac{x_{\text{вГ}}}{y_{\text{нГ}}}$	$a_{\text{нГ}} = \frac{x_{\text{нГ}}}{y_{\text{вГ}}}$
$a = \sqrt[n]{x}$	$a_{\text{вГ}} = \sqrt[n]{x_{\text{вГ}}}$	$a_{\text{нГ}} = \sqrt[n]{x_{\text{нГ}}}$

*Метод оценки.* При использовании метода оценки вычисляют сначала относительную погрешность измерения, а затем — абсолютную. При вычислении относительной погрешности используют формулы, которые получены с применением высшей математики. Они приведены в таблице 41 для разных соотношений между физическими величинами  $a$  и  $b$ .

**Таблица 41**

<i>Расчётная формула</i>	<i>Абсолютная погрешность</i>	<i>Относительная погрешность</i>
$a \pm b$	$\Delta a + \Delta b$	$\frac{\Delta a + \Delta b}{a \pm b}$
$ab$	$a\Delta b + b\Delta a$	$\frac{\Delta a}{a} + \frac{\Delta b}{b}$
$\frac{a}{b}$	$\frac{a\Delta b + b\Delta a}{b^2}$	$\frac{\Delta a}{a} + \frac{\Delta b}{b}$
$a^n$	$na^{n-1}\Delta a$	$\frac{n\Delta a}{a}$
$\sqrt[n]{a}$	$\frac{\Delta a}{n\sqrt[n]{a^{n-1}}}$	$\frac{\Delta a}{na}$

Выполняя косвенные измерения величин, для расчёта погрешности необходимо придерживаться следующей последовательности действий.

1. Определите абсолютные погрешности прямых измерений величин, входящих в формулу.

2. Измерьте физические величины и вычислите значение искомой величины по формуле  $a_{\text{изм}}$ .

3. Вычислите относительную погрешность косвенного измерения величины, пользуясь соответствующими формулами (см. табл. 41).

4. Вычислите абсолютную погрешность косвенного измерения величины:

$$\Delta a = a_{\text{изм}} \cdot \delta a.$$

5. Запишите результат косвенного измерения с учётом абсолютной погрешности измерения:

$$a = a_{\text{изм}} \pm \Delta a.$$

Рассмотрим пример вычисления погрешности косвенного измерения ускорения свободного падения с помощью математического маятника. Из формулы периода колебаний математического

маятника  $T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$  получаем:

$$g = \frac{4\pi^2 l}{T^2}.$$

Период колебаний математического маятника определяют, измерив время  $t$  нескольких ( $n$ ) его полных колебаний:

$$T = \frac{t}{n}.$$

Результаты измерений приведены в таблице 42.

**Таблица 42**

<i>Длина нити <math>l</math>, м</i>	<i>Число колебаний <math>n</math></i>	<i>Время колебаний <math>t</math>, с</i>	<i>Период колебаний <math>T</math>, с</i>	<i>Измеренное значение ускорения свободного падения <math>g</math>, м/с<sup>2</sup></i>
$0,500 \pm 0,005$	10	$14,0 \pm 0,1$	$1,40 \pm 0,01$	10,06

Относительная погрешность измерения ускорения свободного падения:

$$\delta g = \frac{\Delta g}{g} = \frac{\Delta l}{l} + 2 \frac{\Delta T}{T};$$

$$\delta g = \frac{0,005}{0,5} + 2 \frac{0,01}{1,4} = 0,01 + 0,014 = 0,024.$$

Абсолютная погрешность измерения ускорения свободного падения:

$$\Delta g = g \cdot \delta g = 10,06 \text{ м/с}^2 \cdot 0,024 = 0,24 \text{ м/с}^2.$$

Результат измерения ускорения свободного падения:

$$g = (10,06 \pm 0,24) \text{ м/с}^2.$$

## «Исследование движения тела под действием постоянной силы»

*Цель работы:* доказать гипотезу, что под действием постоянной силы тело движется с постоянным ускорением.

*Приборы и материалы:* жёлоб дугообразный; шарик; штатив с муфтой и лапкой; линейка; лист белой бумаги; лист копировальной бумаги.

*Описание установки и методики выполнения работы*

Экспериментальная установка для проведения работы показана на рисунке 175.

В качестве исследуемого тела используют шарик, который скатывается по дугообразному жёлобу. После того как шарик оторвётся от жёлоба, на него будет действовать только сила тяжести. Она направлена вертикально вниз и остаётся во время движения неизменной. Напомним, что тело под действием постоянной силы должно двигаться с постоянным ускорением, т. е. равноускоренно. Это утверждение и проверяется в данном исследовании.

Идея опыта состоит в следующем. Предположив, что тело движется по вертикали равноускоренно, получить аналитически соотношение между перемещениями в вертикальном и горизонтальном направлениях, а затем экспериментально проверить, выполняется ли это соотношение.

Аналитический вид зависимости дальности полёта шарика  $s$  от начальной высоты  $H$  можно получить из уравнений его движения

в проекциях на горизонтальную и вертикальную оси координат. Начало отсчёта системы координат совмещают с концом жёлоба, ось  $x$  направляют вдоль направления начальной скорости (горизонтально), а ось  $y$  — вертикально вниз. Проекция на ось  $x$  скорости шарика не изменяется и равна  $v_0$ , координата  $x$  шарика равна:

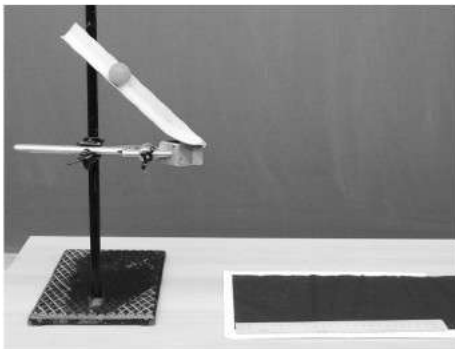


Рис. 175

$$x = v_0 t. \quad (1)$$

Проекция его скорости на ось  $y$  изменяется, поскольку ускорение свободного падения направлено вертикально вниз, и координата  $y$  тела равна:

$$y = \frac{gt^2}{2}. \quad (2)$$

Искомую зависимость получают, выразив время из уравнения (2):

$t = \sqrt{\frac{2y}{g}}$  и подставив полученное выражение в уравнение (1):

$$x = v_0 \sqrt{\frac{2y}{g}}.$$

Так как в точке падения  $x = s$ , а  $y = H$ , то

$$s = v_0 \sqrt{\frac{2H}{g}}.$$

Если шарик пускать горизонтально с разных высот при одной и той же начальной скорости, то полученную зависимость можно представить так:

$$s = C\sqrt{H}, \text{ откуда } \frac{s}{\sqrt{H}} = C,$$

где  $C = v_0 \sqrt{\frac{2}{g}} = \text{const.}$

Постоянство этого отношения и следует доказать экспериментально.

*Подготовка к работе*

1. Ответьте на вопросы.

• Как изменится дальность полёта шарика, если высоту пуска увеличить в 4 раза ?

• Как определить скорость шарика после отрыва от жёлоба по дальности его полёта и высоте нижнего края жёлоба ?

2. Подготовьте таблицу для записи результатов измерений и вычислений (табл. 43).

Таблица 43

№ опыта	$s$ , мм	$s_{\text{ср}}$ , мм	$H$ , мм	$\sqrt{H}$ , мм <sup>1/2</sup>	$\frac{s_{\text{ср}}}{\sqrt{H}}$ , мм <sup>1/2</sup>
1					
2					
3					

Порядок выполнения работы

**1.** Закрепите дугообразный жёлоб в лапке штатива на высоте 10—12 см от поверхности стола так, чтобы его отогнутый конец располагался горизонтально (см. рис. 175).

**2.** Нанесите на поверхности жёлоба метку, от которой будет производиться пуск шарика. Его необходимо пускать с одного и того же места, чтобы обеспечить шарiku одинаковое значение начальной скорости.

**3.** Положите лист бумаги на то место стола, где ожидается падение шарика, приклейте его скотчем и накройте листом копировальной бумаги. После падения шарика на бумаге останется чёткая метка.

**4.** Произведите пуск шарика от метки, нанесённой на жёлобе.

**5.** Измерьте линейкой высоту нижнего края жёлоба  $H$  и дальность полёта шарика  $s$ . Результаты всех измерений и вычислений записывайте в таблицу.

**6.** Повторите пуск шарика 5—7 раз и найдите среднее значение расстояния  $s_{\text{ср}}$ .

**7.** Проведите 2—3 серии по 5—7 пусков, увеличивая высоту жёлоба на 5 см в каждой серии, и найдите  $s_{\text{ср}}$ .

**8.** Вычислите для каждой серии пусков  $\sqrt{H}$  и отношение  $C = \frac{s_{\text{ср}}}{\sqrt{H}}$ .

**9.** Сравните значения отношений  $\frac{s_{\text{ср}}}{\sqrt{H}}$ , полученные для каждой серии пусков. Сделайте вывод.

### «Изучение движения тела по окружности под действием сил тяжести и упругости»

*Цель работы:* исследовать связь между равнодействующей всех сил, действующих на тело, и ускорением, которое тело получает в результате их действия.

*Приборы и материалы:* весы учебные; секундомер; динамометр; груз из набора грузов по механике; штатив с муфтой и лапкой; нить; измерительная лента; лист бумаги.

#### Описание установки и методики выполнения работы

Экспериментальная установка для выполнения работы показана на рисунке 176.

На верхнем конце стержня штатива закрепляют лапку так, чтобы её конец с губками оказался возможно дальше от стержня. На один конец нити подвешивают груз, а другой зажимают лапкой, следя за тем, чтобы груз оказался подвешенным на высоте не более 5—10 мм от поверхности стола. Под груз подкладывают лист бумаги, на котором начерчена окружность диаметром 15—20 см и отмечен её центр. Центр неподвижно висящего груза должен находиться точно над центром окружности. Груз отводят в сторону до линии окружности и лёгким толчком по касательной приводят во вращение.

На вращающийся груз действуют сила тяжести и сила упругости нити, направленные под углом друг к другу. Равнодействующая этих сил направлена к центру описываемой грузом окружности. В результате действия этих сил груз получит ускорение, направленное к центру окружности, определить которое можно, зная скорость движения груза  $v$  и радиус окружности  $R$ :

$$a_{ц.с} = \frac{v^2}{R}.$$

Значение равнодействующей  $\vec{F}$  сил тяжести и упругости нити измеряют по-



Рис. 176

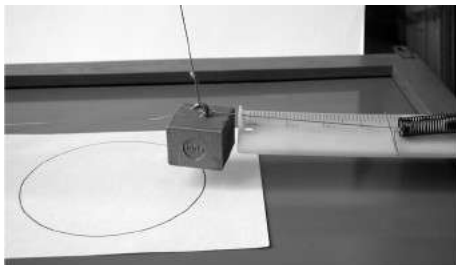


Рис. 177

сле того, как груз будет остановлен. К грузу прицепляют динамометр и, удерживая прибор в руке, медленно отводят в сторону, пока угол отклонения нити не станет снова таким, каким он был при движении груза по окружности (рис. 177).

По второму закону Ньютона должно выполняться равенство

$$F = ma_{ц.с} = \frac{mv^2}{R}.$$

Скорость вращения груза можно определить, если измерить радиус окружности  $R$  и время  $t$ , за которое он совершит несколько оборотов  $n$  над этой окружностью:

$$v = \frac{2\pi Rn}{t}.$$

После подстановки этой формулы в выражение для силы получим:

$$F = \frac{4\pi^2 n^2 m R}{t^2}.$$

Справедливость этого равенства и проверяется в работе.

#### Подготовка к работе

1. Ответьте на вопросы.

- Почему подвес груза должен иметь большую длину?
- Почему радиус окружности, по которой будет вращаться груз, не следует делать слишком большим?
- Почему число оборотов груза ограничивают до 10—15?

2. Подготовьте таблицу для записи результатов измерений и вычислений (табл. 44).

Таблица 44

$t$ , с	$\Delta t$ , с	$R$ , м	$\Delta R$ , м	$m$ , кг	$\Delta m$ , кг	$F_{изм}$ , Н	$\Delta F_{изм}$ , Н	$F$ , Н	$\Delta F$ , Н



1. Измерьте массу груза  $m$ . Результаты всех измерений и вычислений записывайте в таблицу.
2. Соберите экспериментальную установку (см. рис. 176).
3. Отклоните груз до линии окружности и слегка толкните вдоль касательной к окружности. Проведите несколько пробных пусков и определите силу и направление толчка, после которого центр груза двигался бы точно над окружностью.
4. Измерьте время  $t$ , за которое груз совершит 10—15 полных оборотов.
5. Измерьте радиус окружности  $R$ .
6. Измерьте динамометром значение  $F_{\text{изм}}$  суммы сил тяжести и упругости нити, действовавших на груз при его вращении.
7. Определите и запишите в таблицу абсолютные погрешности измерения времени вращения  $\Delta t$ , радиуса окружности  $\Delta R$ , массы груза  $\Delta m$  и суммы сил  $\Delta F_{\text{изм}}$ .
8. Вычислите значение суммы сил тяжести и упругости.
9. Вычислите относительную погрешность  $\delta F$  измерения суммы сил:

$$\delta F = \frac{\Delta F}{F} = \frac{\Delta m}{m} + \frac{\Delta R}{R} + 2 \frac{\Delta t}{t}.$$

10. Вычислите абсолютную погрешность  $\Delta F$  измерения суммы сил:

$$\Delta F = F \cdot \delta F.$$

11. Запишите значение суммы сил тяжести и упругости  $F_{\text{изм}}$  с учётом абсолютной погрешности измерения:

$$F_{\text{изм}} \pm \Delta F_{\text{изм}}.$$

12. Запишите значение суммы сил тяжести и упругости  $F$  с учётом абсолютной погрешности измерения:

$$F \pm \Delta F.$$

13. Сравните значения  $F_{\text{изм}}$  и  $F$ . Установите, перекрываются ли интервалы возможных значений суммы сил, измеренных разными способами. Сделайте вывод.

### «Сравнение работы силы с изменением механической энергии тела»

*Цель работы:* определить соотношение между запасом механической энергии системы тел и значением механической работы, совершённой телами системы за счёт этой энергии.

*Приборы и материалы:* трибометр; динамометр; весы; набор грузов; линейка; нить.

*Описание установки и методики выполнения работы*

Экспериментальная установка для выполнения работы показана на рисунке 178.

В работе исследуют превращение механической энергии двух тел: бруска трибометра и динамометра, сцепленного с ним нитью (см. рис. 178). Динамометр удерживают одной рукой, а другой оттягивают брусок в горизонтальном направлении на некоторое расстояние. В этом положении полная механическая энергия системы «пружина — брусок» будет определяться потенциальной энергией растянутой пружины динамометра:

$$E = \frac{kx^2}{2}, \quad (1)$$

где  $k$  — жёсткость пружины, а  $x$  — её удлинение.

Отпущенный брусок будет двигаться до тех пор, пока энергия системы не израсходуется на работу против силы трения:

$$\frac{kx^2}{2} = F_{\text{тр}}s. \quad (2)$$

Это равенство и подлежит экспериментальной проверке.

*Подготовка к работе*

1. Ответьте на вопросы.

- Как изменится путь бруска при увеличении растяжения пружины в 2 раза?

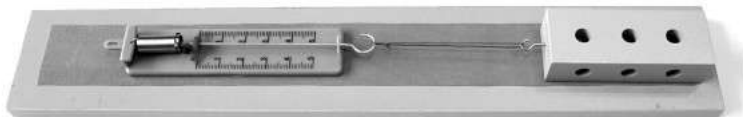


Рис. 178

• Как изменится путь бруска при увеличении массы бруска в 2 раза?

2. Подготовьте таблицу для записи результатов измерений и вычислений (табл. 45).

Таблица 45

$x_1$ , м	$x_2$ , м	$x$ , м	$kx^2/2$ , Дж	$F_{\text{тр}}$ , Н	$x_{\text{обр}}$ , м	$x_{\text{бр}}$ , м	$s$ , м	$F_{\text{тр}}s$ , Дж

Порядок выполнения работы

1. Определите жёсткость пружины динамометра  $k$ . Для этого, удерживая динамометр рукой, подвесьте к нему 3—4 груза и измерьте линейкой удлинение пружины  $x$  под действием этих грузов. Вычислите жёсткость пружины по формуле  $k = mg/x$ , где  $m$  — масса грузов,  $g$  — ускорение свободного падения.

2. Определите силу трения бруска о рейку трибометра  $F_{\text{тр}}$ . Для этого поставьте брусок на рейку и прикрепите к нему динамометр. Потянув за динамометр, приведите брусок в равномерное скольжение вдоль рейки и зарегистрируйте показание прибора.

3. Запишите значение силы трения бруска с учётом абсолютной погрешности измерения.

4. Соедините брусок и динамометр нитью, как показано на рисунке 178.

5. Положите вдоль рейки линейку.

6. Отметьте положение указателя динамометра относительно шкалы линейки  $x_1$ .

7. Удерживая динамометр одной рукой, второй оттяните брусок так, чтобы пружина динамометра удлинилась примерно на 5—7 см. Новое положение указателя  $x_2$  и координату места пуска бруска  $x_{\text{обр}}$  также отметьте.

8. Отпустите брусок и определите координату того места, где он остановится ( $x_{\text{бр}}$ ).

9. Вычислите удлинение  $x$  пружины  $x = x_1 - x_2$  и абсолютную погрешность измерения этой величины  $\Delta x = \Delta x_1 + \Delta x_2$ .

10. Вычислите перемещение  $s$  бруска  $s = x_{\text{бр}} - x_{\text{обр}}$  и абсолютную погрешность измерения этой величины  $\Delta s = \Delta x_{\text{бр}} + \Delta x_{\text{обр}}$ .

11. Вычислите значения энергии растянутой пружины  $\frac{kx^2}{2}$ .

12. Вычислите относительную погрешность измерения жёсткости пружины:

$$\frac{\Delta k}{k} = \frac{\Delta m}{m} + \frac{\Delta x}{x}.$$

13. Вычислите относительную погрешность измерения энергии  $E$ :

$$\delta E = \frac{\Delta E}{E} = \frac{\Delta k}{k} + 2 \frac{\Delta x}{x}$$

и абсолютную погрешность измерения этой величины:

$$\Delta E = E \cdot \delta E.$$

14. Вычислите значение работы  $A$ , совершённой против силы трения  $A = F_{\text{тр}} s$ .

15. Вычислите относительную погрешность измерения работы  $A$ :

$$\delta A = \frac{\Delta A}{A} = \frac{\Delta F_{\text{тр}}}{F_{\text{тр}}} + \frac{\Delta s}{s}$$

и абсолютную погрешность измерения этой величины:

$$\Delta A = A \cdot \delta A.$$

16. Запишите значения энергии системы и работы, совершённой против силы трения, с учётом абсолютных погрешностей измерения этих величин.

17. Определите, перекрываются ли интервалы возможных значений энергии и работы. Сделайте вывод.

#### Лабораторная работа № 4

##### **«Изучение закона сохранения механической энергии при действии на тело сил тяжести и упругости»**

*Цель работы:* сравнить изменение потенциальной энергии пружины при её растяжении с изменением потенциальной энергии груза, который вызвал это растяжение.

*Приборы и материалы:* спиральная пружина жёсткостью 20—30 Н/м; груз массой 100 г (2 шт.); штатив с двумя муфтами и лапками; линейка; указатель.

Изменение потенциальной энергии упруго деформированной пружины  $\Delta E_{\text{п}}$  при её растяжении, если в исходном состоянии пружина не была растянута, равно её энергии в растянутом состоянии  $E_2$ :

$$\Delta E_{\text{п}} = E_2 - 0 = \frac{kx_{\text{max}}^2}{2}, \quad (1)$$

где  $k$  — жёсткость пружины,  $x_{\text{max}}$  — удлинение пружины в конечном состоянии.

Если растяжение пружины происходит под действием подвешенного к ней груза, то по мере увеличения её длины высота груза относительно стола будет уменьшаться.

Изменение потенциальной энергии груза  $\Delta E_{\text{г}}$  по отношению к какой-то поверхности определяется изменением его высоты относительно этой поверхности:

$$\Delta E_{\text{г}} = mgh_2 - mgh_1 = mg\Delta h \text{ или, так как } \Delta h = x_{\text{max}},$$

$$\Delta E_{\text{г}} = mgx_{\text{max}}.$$

На основании закона сохранения механической энергии должно выполняться равенство:

$$\Delta E_{\text{п}} = \Delta E_{\text{г}} \text{ или } \frac{kx_{\text{max}}}{2} = mgx_{\text{max}}.$$

Это соотношение между изменениями потенциальной энергии упруго деформированной пружины и потенциальной энергии груза и проверяется при выполнении работы.

Экспериментальная установка для проведения работы показана на рисунке 179.

Пружину закрепляют в лапке штатива вертикально. Рядом с пружиной закрепляют линейку, шкала которой обращена в сторону пружины. Расстояние между линейкой и пружиной не должно превышать 1 см. В качестве груза используют два груза массой по 100 г, сцепленных вместе. Для повышения точности измерения удлинения пружины к её нижней части прикрепляют



Рис. 179

самодельный указатель. Указатель представляет собой круг, вырезанный из плотной бумаги, диаметр которого примерно на 5 мм больше диаметра витков пружины. В центре круга прокалывают отверстие, размер которого равен толщине проволоки, и делают радиальный разрез. Закрепляют круг на пружине капелькой клея.

*Подготовка к работе*

1. Ответьте на вопросы.

• Как свести к минимуму погрешность измерения координаты указателя?

• Почему в экспериментальной установке используются два груза? Как масса груза влияет на точность результатов измерений?

2. Подготовьте таблицу для записи результатов измерений и вычислений (табл. 46).

**Таблица 46**

$k, \text{ Н/м}$	$\Delta k, \text{ Н/м}$	$x_{\text{max}}, \text{ м}$	$\Delta x_{\text{max}}, \text{ м}$	$\frac{kx_{\text{max}}^2}{2}$	$\Delta \left( \frac{kx_{\text{max}}^2}{2} \right)$	$m, \text{ кг}$	$\Delta m, \text{ кг}$	$mgx_{\text{max}}, \text{ кг}$	$\Delta(mgx_{\text{max}}), \text{ кг}$

*Порядок выполнения работы*

1. Соберите экспериментальную установку (см. рис. 179).

2. Измерьте по шкале линейки координату  $x_0$  указателя пружины при отсутствии на ней груза.

3. Подвесьте к пружине два груза. Масса каждого груза равна 100 г с точностью  $\pm 2$  г. Измерьте координату  $x_1$  указателя после того, как будут подвешены грузы и они перестанут колебаться.

4. Вычислите удлинение пружины  $x$  под действием груза.

5. Вычислите силу тяжести, действующую на груз.

6. Вычислите жёсткость пружины.

7. Результаты всех вычислений и измерений записывайте в таблицу.

8. Вычислите относительную погрешность измерения жёсткости пружины:

$$\delta k = \frac{\Delta m}{m} + \frac{\Delta x}{x}.$$

9. Вычислите абсолютную погрешность измерения жёсткости пружины:

$$\Delta k = k \cdot \delta k.$$

10. Медленно поднимите рукой верхний груз, пока пружина вновь не окажется в нерастянутом состоянии. Отпустите груз и заметьте координату  $x_{\max}$  указателя при максимальном растяжении пружины. Чтобы избежать случайных ошибок, опыт повторите 5—7 раз и вычислите среднее значение  $x_{\max \text{ ср}}$ .

11. Вычислите максимальное удлинение  $x_{\max}$  пружины  $x_{\max} = x_{\max \text{ ср}} - x_0$  и абсолютную погрешность измерения этой величины  $\Delta x_{\max}$ .

12. Вычислите потенциальную энергию упруго деформированной пружины при её максимальном растяжении:

$$E_{\text{п}} = \frac{kx_{\max}^2}{2}.$$

13. Рассчитайте относительную погрешность измерения  $E_{\text{п}}$ :

$$\delta E_{\text{п}} = \frac{\Delta E_{\text{п}}}{E_{\text{п}}} = \frac{\Delta k}{k} + 2 \frac{\Delta x_{\max}}{x_{\max}}$$

и абсолютную погрешность измерения этой величины  $\Delta \left( \frac{kx_{\max}^2}{2} \right)$ .

14. Вычислите изменение потенциальной энергии груза:

$$E_{\text{г}} = mgx_{\max}.$$

15. Рассчитайте относительную погрешность измерения  $E_{\text{г}}$ :

$$\delta E_{\text{г}} = \frac{\Delta E_{\text{г}}}{E_{\text{г}}} = \frac{\Delta m}{m} + \frac{\Delta x_{\max}}{x_{\max}}$$

и абсолютную погрешность измерения этой величины  $\Delta(mgx_{\max})$ .

16. Запишите значения потенциальной энергии упруго деформированной пружины и изменения потенциальной энергии груза с учётом абсолютной погрешности измерения этих величин.

17. Определите, перекрываются ли интервалы возможных значений потенциальной энергии растянутой пружины и изменения потенциальной энергии груза. Сделайте вывод.

## «Измерение удельной теплоты плавления льда»

**Цель работы:** изучить способ измерения удельной теплоты плавления вещества, основанный на применении уравнения теплового баланса.

**Приборы и материалы:** калориметр; термометр; весы; мерный цилиндр на 100 мл; штатив; сосуд с тёплой водой (35—40 °С); сосуд с кусочками тающего льда.

*Описание установки и методики выполнения работы*

Для опыта используют калориметр, заполненный тёплой водой, масса и температура которой известны.

В сосуд добавляют кусочки тающего льда и наблюдают за их плавлением. Как только лёд расплавится, измеряют температуру смеси. Лёд добавляют до тех пор, пока температура воды в калориметре не опустится ниже комнатной.

Пренебрегая потерями энергии, можно утверждать, что количество теплоты, отданное тёплой водой, идёт на плавление льда и нагревание образованной при этом воды до температуры смеси.

Запишем уравнение теплового баланса:

$$Q_{\text{л}} + Q_{\text{в-л}} - Q_{\text{в}} = 0,$$

где  $Q_{\text{в}} = cm_{\text{в}}(T_{\text{в}} - T_{\text{см}})$  — количество теплоты, отданное тёплой водой;  $Q_{\text{л}} = \lambda m_{\text{л}}$  — количество теплоты, которое пошло на плавление льда;  $Q_{\text{в-л}} = cm_{\text{в-л}}(T_{\text{см}} - T_0)$  — количество теплоты, полученное водой, образовавшейся из льда.

В приведённых формулах обозначено:  $c$  — удельная теплоёмкость воды,  $m_{\text{в}}$  — масса тёплой воды,  $T_{\text{в}}$  — её начальная температура,  $T_{\text{см}}$  — температура смеси после таяния льда,  $\lambda$  — удельная температура плавления льда,  $m_{\text{в-л}}$  — масса воды, образованной из льда,  $T_0$  — температура плавления льда.

После подстановки приведённых выше формул уравнение теплового баланса примет вид:

$$\lambda m_{\text{л}} + cm_{\text{в-л}}(T_{\text{см}} - T_0) - cm_{\text{в}}(T_{\text{в}} - T_{\text{см}}) = 0.$$

Получим формулу для определения удельной теплоты плавления льда:

$$\lambda = \frac{cm_{\text{в-л}}(T_{\text{см}} - T_0)}{m_{\text{л}}} + \frac{cm_{\text{в}}(T_{\text{см}} - T_{\text{в}})}{m_{\text{л}}}.$$



Учитывая, что  $m_{\text{в-л}} = m_{\text{л}}$  и  $T_0 = 0 \text{ }^\circ\text{C}$ :

$$\lambda = \frac{cT_{\text{см}} + cm_{\text{в}}(T_{\text{см}} - T_{\text{в}})}{m_{\text{л}}}. \quad (1)$$

Полученное по формуле (1) значение удельной теплоты плавления льда следует сравнить с табличным значением.

*Подготовка к работе*

1. Ответьте на вопросы.

- Как уменьшить потери энергии в ходе опыта?
- Влияет ли начальная температура воды в калориметре на погрешность результата опыта?

2. Подготовьте таблицу для записи измерений и вычислений (табл. 47).

**Таблица 47**

$m_{\text{ст}}$ , г	$m_{\text{ст-в}}$ , г	$m_{\text{в}}$ , г	$m_{\text{ст-в-л}}$ , г	$m_{\text{л}}$ , г	$T_{\text{в}}$ , $^\circ\text{C}$	$T_{\text{см}}$ , $^\circ\text{C}$	$\lambda$ , Дж/кг

*Порядок выполнения работы*

1. Измерьте массу стакана калориметра  $m_{\text{ст}}$ .
2. Отмерьте мерным цилиндром 150 мл воды и налейте её в калориметр.
3. Измерьте массу стакана калориметра с водой  $m_{\text{ст-в}}$  и вычислите массу воды в стакане  $m_{\text{в}} = m_{\text{ст-в}} - m_{\text{ст}}$ .
4. Измерьте температуру воды  $T_{\text{в}}$ .
5. Поместите в калориметр кусочки тающего льда и наблюдайте за их плавлением.
6. Измерьте температуру воды  $T_{\text{см}}$  сразу после того, как лёд расплавится.
7. Измерьте массу стакана с водой после плавления льда  $m_{\text{ст-в-л}}$  и вычислите массу льда  $m_{\text{л}} = m_{\text{ст-в-л}} - m_{\text{ст-в}}$ .
8. Вычислите по формуле (1) значение удельной теплоты плавления льда.
9. Вычислите абсолютную погрешность измерения  $\lambda$ :

$$\Delta\lambda = \frac{c\Delta T_{\text{см}} + c\Delta m_{\text{в}}(T_{\text{см}} - T_{\text{в}})}{m_{\text{л}}} + \frac{cm_{\text{в}}\Delta m_{\text{л}}(T_{\text{см}} - T_{\text{в}})}{m_{\text{л}}^2} + \frac{2cm_{\text{в}}\Delta T}{m_{\text{л}}}.$$

10. Запишите значение удельной теплоты плавления льда с учётом абсолютной погрешности измерения этой величины.

11. Определите, попадает ли табличное значение  $\lambda$  в интервал возможных значений величины, полученной вами.

## «Изучение уравнения состояния идеального газа»

**Цель работы:** исследовать связь параметров газа в двух состояниях при неизменной массе и химическом составе.

**Приборы и материалы:** трубка с кранами на концах из набора «Газовые законы»; термометр; калориметр; измерительная лента; барометр-анероид; штатив с двумя лапками.

## Описание установки и методики выполнения работы

Основной частью набора «Газовые законы» является прозрачная эластичная трубка с кранами на концах. Исследуемым газом является воздух, находящийся внутри этой прозрачной трубки. Измерения объёма и температуры воздуха внутри трубки проводят в следующем порядке.

Трубку плотно, виток к витку, укладывают внутрь стакана калориметра. Кран, который расположится при этом вблизи дна, предварительно закрывают. Верхний кран оставляют открытым. Затем в стакан калориметра наливают нагретую до  $55\text{—}60\text{ }^\circ\text{C}$  воду так, чтобы открытый кран оказался бы погружённым в неё не более чем на  $5\text{—}10\text{ мм}$ .

Воздух в трубке при нагревании начнёт расширяться, и из открытого крана будут выходить пузырьки воздуха. В момент, когда температура воздуха сравняется с температурой тёплой воды, выделение пузырьков прекратится. Состояние воздуха в трубке в этот момент принимают за начальное и определяют его параметры — температуру и объём. Температура воздуха в начальном состоянии  $T_1$  равна температуре воды, которую измеряют термометром. Его объём  $V_1$  равен объёму внутренней полости трубки. Давление равно атмосферному (давление водяного столба высотой несколько миллиметров не учитывать).

Объём в этом эксперименте удобно выражать в условных единицах. Поскольку внутренняя полость трубки имеет форму цилиндра и её объём  $V = Sl$ , а площадь поперечного сечения  $S$  одинакова по всей длине, то за условную единицу объёма принимают единицу длины воздушного столба. Таким образом, объём воздуха в первом состоянии определяют по длине  $l_1$  воздушного столба в трубке (рис. 180) с помощью измерительной ленты.

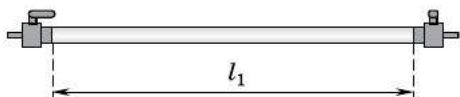


Рис. 180

После измерения температуры тёплой воды воздух переводят в другое состояние. Для этого закрывают кран, тёплую воду сливают и заполняют стакан водой комнатной температуры, следя за тем, чтобы её уровень над верхним краном оказался таким же, как в первом случае. После этого кран опять открывают. При охлаждении объём воздуха в трубке уменьшится, и через открытый кран в неё поступит некоторое количество воды. Когда температура воды и воздуха в трубке опять станет одинаковой (через 1—2 мин), измеряют параметры газа во втором состоянии.



Рис. 181

Температуру воздуха  $T_2$  вновь определяют по температуре воды. Чтобы измерить его объём после охлаждения, закрывают верхний кран, трубку извлекают из стакана калориметра и, удерживая вертикально, резко встряхивают несколько раз. Конец трубки с водой закрепляют вертикально лапками штатива, но так, чтобы внутренний канал трубки не пережимался (рис. 181). При этом капли воды, попавшие внутрь, сольются и образуют неразрывный столбик длиной  $\Delta l$  (рис. 182). Объём воздуха во втором состоянии  $V_2$  равен длине воздушного столба  $l_2 = l_1 - \Delta l$ .

Давление воздуха в трубке во втором состоянии равно сумме атмосферного давления и давления столба воды над открытым краном. Завершив эксперимент, сравнивают соотношения  $\frac{pV}{T}$  в первом и втором состояниях.

В соответствии с уравнением Клапейрона

$$\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2}, \quad (1)$$

где  $p_1$  и  $p_2$  — давления воздуха,  $V_1$  и  $V_2$  — объёмы, занимаемые воздухом в двух равновесных состояниях, а  $T_1$  и  $T_2$  — его температуры.

Справедливость равенства

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

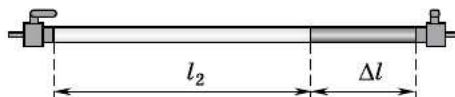


Рис. 182

и проверяют экспериментально.

1. Повторите формулу для расчёта давления в жидкости и значение плотности воды.

2. Обоснуйте возможность измерения объёма воздуха внутри трубки по длине части трубки, которую он занимает.

3. Ответьте на вопросы.

- Почему при охлаждении газа используют воду комнатной температуры, а не более холодную?

- Почему перед тем, как извлечь трубку из холодной воды, необходимо выждать 1—2 мин?

- Как и почему значение температуры горячей воды влияет на погрешности измерения параметров воздуха?

4. Подготовьте таблицу для записи результатов измерений и вычислений (табл. 48).

**Таблица 48**

$V_1$ , усл. ед.	$T_1$ , К	$p_1$ , Па	$T_2$ , К	$p_2$ , Па	$\Delta V$ , усл. ед.	$V_2$ , усл. ед.	$\frac{p_1 V_1}{T_1}$	$\frac{p_2 V_2}{T_2}$

*Порядок выполнения работы*

1. Измерьте длину  $l_1$  воздушного столба в трубке (объём воздуха  $V_1$  в усл. ед.). Результаты всех измерений и вычислений записывайте в таблицу.

2. Закройте один кран и уложите трубку виток к витку в стакан калориметра. Кран на верхнем конце оставьте открытым.

3. Заполните стакан тёплой водой и поместите в него термометр.

4. Наблюдайте за выделением пузырьков воздуха из открытого крана. Как только оно прекратится, определите показание термометра и запишите в таблицу значение температуры  $T_1$  в кельвинах.

5. Измерьте барометром-анероидом атмосферное давление  $p_1$ .

6. Закройте кран, слейте тёплую воду, заполните стакан водой комнатной температуры до прежнего уровня и снова откройте кран.

7. Через 1—2 мин определите температуру  $T_2$ .

8. Закройте кран, слейте воду, извлеките трубку из стакана, встряхните её и измерьте длину  $\Delta l$  столба воды, вошедшей в трубку (объём воды  $\Delta V$  в усл. ед.).

9. Вычислите давление воды  $p_B = \rho g \Delta l$ .

10. Вычислите давление воздуха в трубке после сжатия  $p_2 = p_1 + p_B$ .

11. Вычислите длину  $l_2$  воздушного столба в трубке после охлаждения (объём воздуха  $V_2$  в усл. ед.).

12. Вычислите соотношения  $\frac{p_1 V_1}{T_1}$  и  $\frac{p_2 V_2}{T_2}$ . Сравните соотношения

между собой и сделайте вывод о выполнении уравнения Клапейрона.

## Лабораторная работа № 7

### «Измерение относительной влажности воздуха»

*Цель работы:* освоить экспериментальные методы измерения относительной влажности воздуха двумя методами (с использованием таблиц «Зависимость давления насыщенного водяного пара от температуры» и «Психрометрическая таблица»).

*Приборы и материалы:* термометр; стакан химический; сосуд с водой комнатной температуры; сосуд с кусочками льда; кусочек ткани; нить.

#### Описание установки и методики выполнения работы

Один из наиболее простых методов измерения относительной влажности воздуха основан на том факте, что отношение плотности водяного пара, присутствующего в помещении, к плотности насыщенного водяного пара в этом же помещении при той же температуре равно отношению давления пара, который содержится в данный момент в воздухе, к парциальному давлению насыщенного пара при той же температуре. В соответствии с этим утверждением относительная влажность воздуха

$$\varphi = \frac{P}{P_0} \cdot 100\%,$$

где  $p$  — парциальное давление водяного пара, а  $p_0$  — парциальное давление насыщенного водяного пара при той же температуре.

Давление насыщенного водяного пара  $p_0$  при разных температурах определяют по таблице.

Давление водяного пара  $p$ , присутствующего в момент измерений в воздухе, определяют, измеряя температуру, до которой его надо охладить, чтобы пар стал насыщенным и началась конденсация (образование росы). Давление насыщенного пара  $p_{0p}$  при этой температуре  $t_p$  (при точке росы) определяют по той же таблице. Так как давление водяного пара в воздухе  $p$  при этом не изменилось, то  $p_{0p} = p$ . Зная  $p$  и  $p_0$ , вычисляют относительную влажность  $\phi$ .

Второй метод измерения относительной влажности воздуха основан на явлении охлаждения жидкости при её испарении. Для этого используют психрометр. Его основными частями являются два термометра. Один измеряет температуру воздуха в комнате, резервуар другого обёрнут куском ткани, опущенным в воду.

Благодаря испарению воды с поверхности ткани она охлаждается. Причём чем меньше относительная влажность воздуха, тем интенсивнее идёт испарение и тем меньшую температуру показывает термометр с влажной тканью. С повышением влажности воздуха различие показаний обоих термометров уменьшается. Оба термометра покажут одинаковую температуру, если относительная влажность воздуха достигнет 100%. Таким образом, по показаниям сухого и влажного термометров с помощью психрометрической таблицы определяют относительную влажность воздуха.

#### *Подготовка к работе*

1. Ответьте на вопросы.
  - Может ли в ходе опытов температура сухого и влажного термометров оказаться одинаковой?
  - Может ли температура влажного термометра оказаться выше, чем сухого?
  - Каким может быть предельное значение относительной влажности воздуха?
2. Подготовьте таблицы для записи результатов измерений и вычислений (табл. 49, 50).

**Таблица 49**

№ опыта	$t, ^\circ\text{C}$	$p_0, \text{кПа}$	$t_p, ^\circ\text{C}$	$p, \text{кПа}$	$\varphi, \%$	$\varphi_{\text{ср}}, \%$	$\Delta\varphi, \%$	$\Delta\varphi_{\text{ср}}, \%$	$(\varphi \pm \Delta\varphi), \%$
1									
2									
3									

**Таблица 50**

№ опыта	$t, ^\circ\text{C}$	$t_{\text{вл}}, ^\circ\text{C}$	$\Delta t, ^\circ\text{C}$	$\varphi, \%$	$\varphi_{\text{ср}}, \%$

*Порядок выполнения работы*

**Метод 1.** Измерение относительной влажности воздуха с помощью модели конденсационного гигрометра.

**1.** Рассмотрите таблицу 22 «Зависимость давления насыщенного водяного пара от температуры». Отметьте, с каким интервалом приведены в таблице значения температуры пара, в каких единицах приведены в ней значения давления насыщенного пара.

**2.** Измерьте температуру  $t$  воздуха в помещении класса. Результаты всех измерений и вычислений записывайте в таблицу 49.

**3.** По таблице 22 определите значение давления насыщенного пара  $p_0$  при этой температуре.

**4.** Поставьте перед собой стакан, наполовину заполненный водой комнатной температуры, так, чтобы на его стенке был хорошо заметен блик света. В стакан поместите термометр и несколько кусочков льда.

**5.** Наблюдайте за бликом на поверхности стакана, стараясь не дышать в его сторону. По потускнению блика отметьте момент появления конденсата. Измерьте в этот момент температуру  $t_p$  воды в стакане.

6. По таблице 22 определите значение давления насыщенного пара  $p_{0p} = p$ , которое соответствует этой температуре.

7. Вычислите относительную влажность воздуха.

8. Повторите опыт 2 раза и определите среднее значение относительной влажности воздуха  $\varphi_{\text{ср}}$ .

9. Определите абсолютную погрешность каждого измерения:

$$\Delta\varphi = |\varphi - \varphi_{\text{ср}}|.$$

10. Вычислите среднюю абсолютную погрешность  $\Delta\varphi_{\text{ср}}$ .

11. Запишите в таблицу 49 результат каждого измерения с учётом абсолютной погрешности измерений.

*Метод 2.* Измерение относительной влажности воздуха с помощью модели психрометра.

1. Рассмотрите психрометрическую таблицу на рисунке 105 (с. 187) и укажите в ней колонку, где приведены значения температуры воздуха. Обратите внимание на то, каков интервал значений температуры. Укажите интервал приведённых в таблице значений разности температур сухого и влажного термометров. Каково предельное значение этой разницы?

2. Измерьте температуру  $t$  воздуха в классе. Результаты всех измерений и вычислений записывайте в таблицу 50.

3. Опустите термометр в воду и убедитесь, что она имеет комнатную температуру.

4. Оберните резервуар термометра кусочком ткани и закрепите его ниткой.

5. Намочите ткань и наблюдайте за изменениями показаний термометра. Запишите его показание  $t_{\text{вл}}$  в тот момент, когда столбик спирта перестанет опускаться.

6. Вычислите разность показаний сухого и влажного термометров.

7. Определите относительную влажность воздуха  $\varphi$  в классе с помощью психрометрической таблицы.

8. При наличии в классе психрометра определите относительную влажность воздуха по его показаниям ( $\varphi_{\text{пс}}$ ) и сравните с ней значение относительной влажности, полученное в лабораторной работе.

9. Сравните результаты, полученные при использовании методов 1 и 2. Сделайте вывод.



## «Наблюдение образования кристаллов»

**Цель работы:** наблюдать процесс образования и роста кристаллов в расплавленном кристаллическом веществе при механическом воздействии на расплав, а также при внесении в него кристаллов-затравок.

**Приборы и материалы:** пакетик с солью и пробирка из набора «Кристаллизация»; плоская кювета; собирающая короткофокусная линза; стакан с горячей водой.

### *Описание установки и методики выполнения работы*

В ходе работы наблюдают кристаллизацию расплавленной соли из набора «Кристаллизация». Чтобы получить её расплав, соль пересыпают из пакетика в пробирку и погружают в горячую воду. После того как вся соль расплавится, а расплав прогреется до температуры 60—65 °С, пробирку извлекают из воды, зажимают в лапке штатива и охлаждают до температуры 35—40 °С. При этом расплав становится переохлаждённой жидкостью. Чтобы не началась её преждевременная кристаллизация, пробирку при охлаждении следует оберегать от случайных толчков.

Кристаллизация происходит быстрее, если в жидкости присутствуют твёрдые частицы, например пылинки, которые становятся центрами кристаллизации. Такими центрами могут стать и края царапин на стенках сосуда, в котором находится жидкость. Центрами кристаллизации могут стать и случайные скопления частиц самой жидкости, соединившихся друг с другом. Однако возникновение таких скоплений в самой жидкости затрудняется тепловыми движениями её частиц. Поэтому образование центров кристаллизации в самой жидкости облегчается с понижением её температуры.

### *Порядок выполнения работы*

1. Перелейте расплавленную соль в плоскую кювету.
2. Слегка покачивая кювету, дождитесь, пока жидкость остынет и в ней появятся первые кристаллики.
3. Поместите в кювету кристаллики, отобранные до начала опыта.
4. Обратите внимание на то, сколько новых кристаллов образуется вокруг каждого кристаллика-затравки.
5. Ощупайте дно кюветы и убедитесь в том, что процесс кристаллизации проходит с выделением количества теплоты.

6. Рассмотрите через собирающую линзу, используя её как лупу, форму отдельных кристалликов.
7. Оцените соотношение между количеством наиболее крупных кристаллов, образовавшихся в кювете, и количеством мелких. Дайте объяснение, от чего зависит это соотношение.
8. Укажите, как изменить условия проведения опыта, чтобы увеличить число крупных кристаллов.

## Лабораторная работа № 9

### «Измерение поверхностного натяжения жидкости»

*Цель работы:* изучить способ определения поверхностного натяжения жидкости с помощью капилляра.

*Приборы и материалы:* набор капилляров; штатив с муфтой и лапкой; весы учебные; цилиндр измерительный; стакан объёмом 50 мл; сосуд с водой комнатной температуры; линейка; салфетка.

*Описание установки и методики выполнения работы*

Метод измерения поверхностного натяжения в данной работе основан на использовании капиллярной трубки.

Высота подъёма жидкости в капилляре определяется соотношением

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

где  $\sigma$  — поверхностное натяжение,  $\rho$  — плотность жидкости,  $r$  — радиус капилляра,  $g$  — ускорение свободного падения.

Отсюда поверхностное натяжение

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

Следовательно, для измерения поверхностного натяжения с использованием капилляра необходимо знать плотность жидкости, ускорение свободного падения, высоту столба жидкости в капилляре и его радиус.

Один из способов измерения радиуса капилляра с отверстием круглой формы основан на измерении массы жидкости, вошедшей в капилляр, и длины её столба в капиллярной трубке. Для этого капилляр опускают в воду на возможно большую глубину, закрывают пальцем верхнее отверстие, извлекают из воды, не отпуская пальца, обтирают салфеткой и измеряют длину столба воды в труб-

ке  $l_1$ . Затем всю воду из капилляра сливают в стакан, массу которого  $m_1$  предварительно измерили. Для повышения точности результата эти операции повторяют 10—12 раз. Измеряют массу стакана с водой  $m_2$  и вычисляют массу воды, перелитой в стакан:

$$m = m_2 - m_1.$$

Зная массу  $m$  и плотность воды  $\rho$ , вычисляют её объём:

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

Площадь поперечного сечения отверстия капилляра

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

где  $l$  — сумма длин столбиков воды, слитых в стакан.

Поскольку канал капиллярной трубки имеет форму круга, его площадь  $S = \pi r^2$ , то радиус капилляра  $r = \sqrt{\frac{S}{\pi}}$ .

Набор капилляров (рис. 183), используемый для опыта, включает три капиллярные трубки с разными диаметрами отверстий, держатель и салфетку. На трубках нанесены отличительные метки. Опыт проводят с капилляром с двумя метками.

*Подготовка к работе*

1. Ответьте на вопросы.

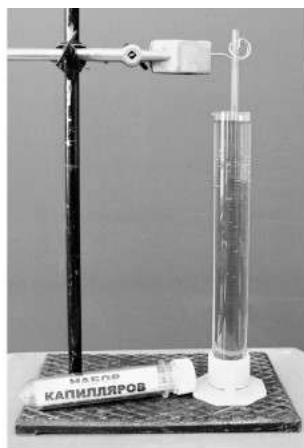
- Как, сравнивая высоту уровней двух жидкостей в капиллярных трубках одинакового радиуса, определить, у которой из них больше поверхностное натяжение?

- Зависит ли поверхностное натяжение жидкости от радиуса капилляра?

2. Подготовьте таблицу для записи результатов измерений и вычислений (табл. 51).

**Таблица 51**

$m_1, 10^{-3}$ кг	$m_2, 10^{-3}$ кг	$m, 10^{-3}$ кг	$l, 10^{-3}$ м	$r, 10^{-3}$ м



*Рис. 183*

3. Подготовьте вспомогательную таблицу для определения радиуса капилляра (табл. 52).

Таблица 52

№ измерения	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$l_i, 10^{-3} \text{ м}$												

Порядок выполнения работы

1. Измерьте массу стакана  $m_1$ . Результаты всех измерений и вычислений записывайте в таблицу 51.
2. Заполните измерительный цилиндр доверху водой при комнатной температуре.
3. Погрузите конец капиллярной трубки в измерительный цилиндр на возможно большую глубину. Зажмите пальцем верхнее отверстие, извлеките трубку из воды и, не отпуская пальца, оботрите салфеткой. Измерьте линейкой длину столба воды в трубке  $l_1$ . Слейте всю воду из капилляра в стакан. Занесите значение  $l_1$  в таблицу 52. Повторите заполнение капилляра водой 10—12 раз.
4. Измерьте массу стакана с водой  $m_2$ .
5. Вычислите массу воды в стакане.
6. Вычислите объём воды в стакане.
7. Вычислите сумму длин столбиков воды, слитых в стакан из капилляра.
8. Вычислите площадь поперечного сечения отверстия капилляра.
9. Вычислите радиус капилляра.
10. Закрепите капилляр держателем в лапке штатива, погрузите его конец в воду (см. рис. 183) и измерьте высоту столба воды  $h$  в капилляре.
11. Вычислите поверхностное натяжение воды:

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

12. Сравните полученное значение  $\sigma$  с табличным и сделайте вывод о причинах погрешности измерений.

## «Измерение электрической ёмкости конденсатора»

*Цель работы:* экспериментально доказать справедливость формулы для расчёта электрической ёмкости плоского конденсатора.

*Приборы и материалы:* мультиметр с функцией измерения ёмкости, например DT890B; алюминиевая фольга; линейка; листы офисной бумаги (плотностью 80 г/м<sup>2</sup> и толщиной 0,1 мм).

### Описание установки и методики выполнения работы

Плоский конденсатор состоит из двух металлических пластин, расположенных параллельно друг другу и разделённых слоем диэлектрика. Ёмкость плоского конденсатора  $C$  зависит от площади пластин  $S$ , расстояния между ними  $d$  и диэлектрической проницаемости  $\epsilon$  диэлектрика, находящегося между пластинами конденсатора:

$$C = \frac{\epsilon\epsilon_0 S}{d}, \quad (1)$$

где  $\epsilon_0$  — электрическая постоянная.

Простейшую модель такого устройства можно изготовить из двух кусков алюминиевой фольги (например, фольги, которая используется в кулинарии), между которыми прокладывают лист бумаги. Куски берут одинаковых размеров и прямоугольной формы.

Для определения ёмкости такого конденсатора линейкой измеряют длину  $l$  и ширину  $b$  кусков фольги и вычисляют их площадь  $S$ . Расстояние между пластинами  $d$  равно толщине бумажного листа. Её определяют как отношение толщины стопки из нескольких десятков листов к числу листов в стопке. Затем вычисляют по формуле (1) ёмкость конденсатора.

Для проверки значения электрической ёмкости, рассчитанного по формуле, используют мультиметр. Современные портативные мультиметры могут измерять ёмкость с точностью до 1 пФ. Однако следует иметь в виду, что провода щупов, которыми прибор подключается к цепи, также имеют собственную электрическую ёмкость. Поэтому на индикаторе мультиметра, подготовленного для измерения электрической ёмкости, но не подключённого к конденсатору, высвечивается значение электрической ёмкости в несколько пикофарад.

1. Изучите руководство по эксплуатации мультиметра в части его использования для измерения электрической ёмкости.

2. Ответьте на вопросы.

• В каких единицах измеряют электрическую ёмкость в СИ? Каково соотношение между  $\Phi$ ; мкФ; пФ?

• Какую размерность должны иметь значения площади пластин  $S$  и расстояния между ними  $d$  при подстановке в формулу (1)?

3. Подготовьте таблицу для записи измерений и вычислений (табл. 53).

Таблица 53

$l, 10^{-3} \text{ м}$	$b, 10^{-3} \text{ м}$	$S, 10^{-6} \text{ м}^2$	$d, 10^{-3} \text{ м}$	$C, 10^{-12} \text{ Ф}$	$C_{\text{изм}}, 10^{-12} \text{ Ф}$

Порядок выполнения работы

1. Соберите модель плоского конденсатора (рис. 184). Для этого отделите от рулона фольги два куска (размером примерно  $200 \times 300$  мм каждый).

2. Измерьте линейкой длину  $l$  и ширину  $b$  каждого куска фольги и вычислите площадь  $S$  пластин.

3. Измерьте толщину  $d$  листа бумаги, который будет служить диэлектриком.

4. Сложите куски фольги стопкой, проложив между ними лист бумаги. Прижмите куски фольги друг к другу, положив на них на некоторое время какой-нибудь предмет с большой площадью поверхности, например книгу.

5. Коснитесь щупами мультиметра, подготовленного к измерению электрической ёмкости, кусков фольги (см. рис. 184) и измерьте ёмкость  $C_{\text{изм}}$  собранного конденсатора.

6. Вычислите ёмкость конденсатора по формуле (1), принимая для бумаги  $\varepsilon = 1$ .

7. Сравните результаты измерения и расчёта и сделайте вывод о соотношении  $C$  и  $C_{\text{изм}}$  и справедливости

формулы  $C = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 S}{d}$ .



Рис. 184

## Ответы к упражнениям

Упражнение 2. 1. 3 м; 2 м. 2. 7 м; 10 м. 3. 0. 4. 500 м. 5. 10 м.

Упражнение 3. 1. 35 м. 3. 3,14 м/с; 2 м/с. 4. 50 км/ч. 5. Антилопа гну; примерно в 2 раза.

Упражнение 4. 1.  $x = 5 + 2t^2$  (м). 2. 25 м. 3.  $\approx 230$  м/с;  $\approx 16,5$  м/с<sup>2</sup>. 4. 0,5 м/с<sup>2</sup>; 1 м. 5. 4 м/с; -0,5 м/с<sup>2</sup>; 12 м.

Упражнение 5. 1. Вода в бассейне. 2. 100 Н. 3. 2 см. 4. 50 м/с.

Упражнение 6. 1. 225 земных суток. 2.  $\approx 780$  млн км.

Упражнение 7. 1. 4 мм. 2. 1,6 м/с<sup>2</sup>. 3. Уменьшится в 9 раз. 4. 50 Н; 0,1.

Упражнение 8. 1. 0,96 Н. 2. 3,7 м/с<sup>2</sup>. 3. 280 Н. 4\*. 10 Н.

Упражнение 9. 1. 2 м/с. 2. 0,3 м/с. 3.  $\approx 10$  м/с. 4\*. 73 м/с.

Упражнение 10. 1. 20 Дж. 2. -50 Дж. 3.  $\sqrt{2gh}$ . 4. 28,3 м/с. 5. 1500 Дж.

Упражнение 11. 1. 7,6 км/с; 96 мин. 2. 24 км/с. 3. Примерно в 3 раза.

Упражнение 12. 1. 60 м. 2. 40 м. 3. 4500 м. 4. 1130 км/ч. 5.  $\approx 7,3$  км/с.

Упражнение 14. 2.  $v_{Al}/v_{Fe} \approx 2$ . 3.  $0,7 \cdot 10^{24}$ . 4.  $3,5 \cdot 10^{20}$ . 5.  $m_{Pb} \approx 3m_{Cu}$ ;

$V_{Pb} \approx 2,4V_{Cu}$ . 6.  $6,022 \cdot 10^{23}$  моль<sup>-1</sup>.

Упражнение 18. 2. 351 К. 3. 927 °С. 4. 391 К. 5. 1850 м/с; 462 м/с; 493 м/с.

Упражнение 19. 1. 40 г. 2. 18 кг. 3.  $\approx 57$  кДж/К. 4.  $\approx 8$  кДж.

Упражнение 20. 1.  $6 \cdot 10^2$  Дж. 2.  $2 \cdot 10^6$  Дж. 5.  $10^5$  Па.

Упражнение 21. 4. 3 Дж. 5. 5,4 кДж.

Упражнение 22. 1.  $p_N > p_H$ . 2.  $4,6 \cdot 10^5$  Па. 3.  $5 \cdot 10^{20}$ . 4.  $\approx 0,3 \cdot 10^{-2}$  м<sup>3</sup>.

Упражнение 23. 1. 270 К. 2. 0,76 м<sup>3</sup>. 3. 2,06 кг/м<sup>3</sup>. 4. 1,35 л.

Упражнение 24. 1.  $10^5$  Па. 2. 0,27 кг/м<sup>3</sup>. 3. Процесс 1. 4.  $\approx 6,9$  л. 5. 200 см<sup>3</sup>; 300 см<sup>3</sup>. 6.  $p_1 > p_2$ . 7.  $\approx 64,6$  кг. 8.  $V_1 > V_2$ .

Упражнение 26. 2.  $\approx 1,4$  кПа. 3. 51%;  $\approx 1,19$  кПа.

Упражнение 27. 1. 667 кДж. 2. 160 К.

Упражнение 30. 4.  $5 \cdot 10^6$  Па. 5.  $2 \cdot 10^5$  МПа.

Упражнение 31. 2. 0,05 г. 3. 31,8 мН/м. 4.  $1,13 \cdot 10^{-4}$  Дж.

Упражнение 32. 1. 2,9 см; 0,8 см. 2. 35,7 мм. 3.  $2,1 \cdot 10^{-2}$  Н/м. 4. 9 мг.

Упражнение 33. 5.  $-8 \cdot 10^{-14}$  Кл.

Упражнение 34. 3. 1,5q. 4.  $-2,4 \cdot 10^{-11}$  Кл;  $1,5 \cdot 10^8$ .

Упражнение 35. 1. 8,1 мкН. 2.  $2,7 \cdot 10^{-7}$  Н. 3.  $V \approx 2,3 \cdot 10^{39}$  раз.

Упражнение 36. 3. 64 мН. 4.  $4 \cdot 10^{-9}$  Кл. 5\*. 6,75  $\cdot 10^6$  Н/Кл.

Упражнение 37. 3.  $2 \cdot 10^{-8}$  Кл. 4. 2,1.

Упражнение 38. 2.  $10^{-4}$  Дж.

Упражнение 39. 2. 10 мДж. 3.  $4 \cdot 10^{-5}$  Кл.

Упражнение 40. 1.  $2,5 \cdot 10^{-5}$  Ф. 3. 1,6 мкКл.

Упражнение 41. 2.  $0,4 \cdot 10^{-4}$  Дж. 3.  $9 \cdot 10^4$  В.

# Предметно-именной указатель

- А**бсолютно твёрдое тело 42  
— упругое тело 42  
Абсолютный нуль температуры 138  
Адамс Дж. 88  
Аморфное состояние 228  
Анизотропия свойств 212  
Аристотель 19  
Армстронг Н. 96
- Б**аллистика 89  
Ближний порядок 236  
Бойль Р. 170  
Борн М. 105  
Браге Т. 45  
Броун Р. 113  
Броуновское движение 114
- В**лажность абсолютная 184  
— относительная 186  
Внутренняя энергия 140  
— — идеального газа 167  
Вольта А. 277  
Время 22
- Г**агарин Ю. А. 96  
Галилей Г. 43  
Гей-Люссак Ж. 171  
Гельмгольц Г. 134  
Гелиоцентрическая система мира 20  
Геоцентрическая система мира 20  
Герц Г. 249  
Гигрометр 184
- Гидростатический парадокс 76  
Графен 232  
Гюйгенс Х. 21
- Д**авление 74  
— гидродинамическое 79  
— гидростатическое 75  
— статическое 79  
Дальтон Д. 106  
Двигатель внутреннего сгорания 196  
Движение равномерное 26  
— равноускоренное 26  
— реактивное 93  
Декарт Р. 132  
Демокрит 106  
Дефекты кристаллов 223  
Деформация 214  
Джоуль Дж. 133  
Динамика 36  
Диффузия 112  
Диэлектрическая проницаемость 273
- Ж**идкие кристаллы 225
- З**акон Бернулли 79  
— Бойля — Мариотта 170  
— всемирного тяготения 56  
— Гей-Люссака 171  
— Кеплера 46, 86  
— Гука 219  
— Кулона 258  
— Ньютона первый 53, 60



— — второй 54  
— — третий 55  
— Паскаля 74  
— сохранения импульса 64  
— — полной механической энергии 73  
— — электрического заряда 255  
— термодинамического равновесия 135  
— Шарля 174  
Запас прочности 222

### Идеальный газ 162

— кристалл 209  
Импульс силы 38  
— тела 38  
Инерции закон 53  
— принцип 45

### Кавендиш Г. 56

Капиллярные явления 242  
Капица П. Л. 190  
Карно С. 134  
Кеплер И. 20  
Кинематика 25  
Кластеры 232  
Клаузиус Р. 156  
Количество вещества 109  
— теплоты 143  
Композиты 231  
Конденсатор 281  
Концентрация молекул 109  
Коперник Н. 20  
Королёв С. П. 96  
Коэффициент полезного действия  
— теплового двигателя 193  
— — — идеального 194  
Кристаллическая решётка 210  
Критическая температура 179

Критическое состояние вещества  
179

Кулон Ш. 258

### Лауэ М. 210

Лебедев П. Н. 249  
Леверье У. 88  
Левкипп 106  
Лейбниц Г. 133  
Леонов А. А. 96  
Линии напряжённости электростатического поля 264  
Ломоносов М. В. 106

### Майер Р. 133

Макроскопическая система 103  
Макроскопические параметры состояния 103  
Максвелл Дж. 119  
Мариотт Э. 170  
Масса 36  
— молярная 109  
— относительная молекулярная 108  
Материальная точка 40  
Материя 3  
Механическая работа 66  
— энергия 70  
Механическое движение 18  
— напряжение 219  
Модели (идеализированные объекты) 39  
Модуль Юнга 220  
Молекулярная физика 103  
Момент силы 68  
Монокристаллы 212

### Нанокompозиты 233

Наноматериалы 233  
Наноструктуры 232

Напряжённость поля точечного заряда 262  
— электростатического поля 262  
Насыщенный пар 181  
Необратимый процесс 155  
Ньютон И. 52

Основное уравнение МКТ идеального газа 164

Относительное удлинение 220

Паровые турбины 196

Перемещение 25

Период обращения 34

Перрен Ж. 114

Пластичность 215

Плечо силы 67

Поверхностная энергия 239

Поверхностное натяжение 238

Поле электростатическое 261

— электрическое 261

— — однородное 265

Поликристаллы 212

Полимеры 230

Полиморфизм 211

Поляризация диэлектрика 272

Постоянная Авогадро 110

— Больцмана 165

— гравитационная 56

— Ломшмидта 110

— универсальная газовая 166

— электрическая 283

Потенциал электростатического поля 277

Потенциальная энергия электростатического поля 276

Предел прочности 221

Принцип независимости действия (суперпозиции) сил 58

— относительности Галилея 61

— суперпозиции полей 263

Пространство 22

Прочность 221

Процесс адиабатный 176

— изобарный 171

— изотермический 169

— изохорный 173

— круговой 192

Психрометр 186

Птолемей К. 20

Путь 25

Разность потенциалов 278

Реактивные двигатели 199

Реальный кристалл 223

Сила 36

— гравитационная 56

— поверхностного натяжения 238

— потенциальная 72

— равнодействующая 59

Система отсчёта 23

— — инерциальная 53

— термодинамическая 135

— — теплоизолированная 135

Скорость 28

— гиперболическая 86

— космическая вторая 92

— — первая 92

— круговая 85

— линейная 34

— мгновенная 30

— наиболее вероятная 118

— параболическая 86

— средняя 29

— — квадратичная 120

— — путевая 29

Смачивание 240

Смолуховский М. 114

Статистический метод 104

**Твёрдость** 222  
**Текущность** 237  
**Тело отсчёта** 23  
**Температура** 136  
**Температурный коэффициент**  
  объёмного расширения газа  
  172  
— — давления газа 174  
**Теорема об изменении кинетиче-**  
  ской энергии 71  
**Тепловой двигатель** 190  
— — идеальный 193  
**Теплопередача** 143  
**Термодинамики закон нулевой**  
  136  
— — первый 152  
— — второй 156  
**Термодинамическая температур-**  
  ная шкала 138  
**Термодинамический метод** 104  
**Термодинамическое равновесие**  
  135  
**Точка росы** 183  
**Углеродные нанотрубки** 232  
**Удельная теплоёмкость** 143  
— теплота парообразования 146  
— — плавления 147  
**Упругость** 214  
**Уравнение движения** 27  
— Клапейрона 167  
— Менделеева — Клапейрона 167  
— состояния идеального газа 166  
**Ускорение** 32  
— свободного падения 56

— центростремительное 34  
**Условие равновесия твёрдого тела**  
  69

**Фалес Милетский** 249  
**Фарадей М.** 180  
**Физическая картина мира** 15  
— теория 14  
**Физический закон** 12  
**Френкель Я. И.** 236

**Холодильная машина** 200  
**Холодильник** 192  
**Хрупкость** 222

**Цикл Карно** 9193**Циолковский К.**  
  Э. 95

**Шарль Ж.** 174  
**Штерн О.** 117  
**Штерна опыт** 117

**Эйнштейн А.** 114  
**Электризация** 253  
**Электрическая ёмкость конденса-**  
  тора 282  
— — проводника 281  
**Электрический заряд** 251  
— — элементарный 252  
**Электростатика** 250  
**Электростатическая индукция**  
  268  
**Энергия электростатического**  
  поля 285

**Юнг Т.** 133

## Памятка № 1. План рассказа о физической величине

1. Определение физической величины.
2. Векторная или скалярная.
3. Относительная или инвариантная.
4. Что характеризует.
5. Условное обозначение.
6. Единица в СИ.
7. Связь с другими величинами.
8. Способ измерения.

## Памятка № 2. Этапы поиска путей решения проблемы

1. Выявление проблемы (противоречия между старым и новым знанием, конфликта точек зрения, ситуации неопределённости).
2. Выдвижение гипотезы решения проблемы.
3. Проверка гипотезы: выбор методов, отбор источников информации, получение и интерпретация результатов.
4. Подтверждение или опровержение гипотезы. При опровержении — выдвижение новой гипотезы.

## Памятка № 3. Этапы работы над проектом.

Цель проектной деятельности — создание нового материального или нематериального продукта

1. Выбор темы.
2. Определение задач, которые необходимо решить для создания продукта.
3. Планирование деятельности по решению задач.
4. Работа над проектом.
5. Оформление результатов работы.
6. Презентация проекта.

## Памятка № 4. Этапы проведения исследования.

Цель исследовательской деятельности — создание нового знания

1. Выбор темы.
2. Определение задач, которые необходимо решить.
3. Выдвижение гипотезы, позволяющей решить поставленные задачи.

4. Проверка гипотезы: выбор методов, отбор источников информации, получение и интерпретация результатов.
5. Оформление результатов работы.
6. Защита работы.

## **Информационные ресурсы**

<http://gotourl.ru/8080>  
<http://gotourl.ru/8076>  
<http://gotourl.ru/8082>  
<http://gotourl.ru/8083>  
<http://gotourl.ru/8084>  
<http://gotourl.ru/8086>  
<http://gotourl.ru/8087>

# Оглавление

## Введение

§ 1. Что и как изучает физика . . . . .	3
<b>За страницами учебника.</b> Физика и культура. Естественно-научная и гуманитарная культура. . . . .	8
§ 2. Физические законы и теории . . . . .	11
§ 3. Физическая картина мира . . . . .	15

## Классическая механика

### Глава 1. Основание классической механики

§ 4. Из истории становления классической механики . . . . .	19
§ 5. Основные понятия классической механики . . . . .	22
§ 6. Путь и перемещение . . . . .	24
§ 7. Скорость . . . . .	28
§ 8. Ускорение . . . . .	32
§ 9. Динамические характеристики движения . . . . .	35
§ 10. Идеализированные объекты . . . . .	39
§ 11. Основание классической механики . . . . .	43
Основное в главе 1 . . . . .	48

### Глава 2. Ядро классической механики

§ 12. «Математические начала натуральной философии» Ньютона . . . . .	52
§ 13. Принципы классической механики . . . . .	58
§ 14. Закон сохранения импульса . . . . .	61
§ 15. Закон сохранения механической энергии . . . . .	65
§ 16. Закон сохранения энергии в динамике жидкости и газа . . . . .	74
Основное в главе 2 . . . . .	81

### Глава 3. Следствия классической механики

§ 17. Небесная механика . . . . .	84
§ 18. Баллистика . . . . .	89
§ 19. Освоение космоса . . . . .	93
Основное в главе 3 . . . . .	98
Итоги раздела . . . . .	99

# Молекулярная физика

## Глава 4. Основы молекулярно-кинетической теории строения вещества

§ 20. Макроскопическая система и характеристики её состояния . . . . .	103
§ 21. Атомы и молекулы, их характеристики . . . . .	106
§ 22. Движение молекул . . . . .	112
§ 23. Опытное определение скоростей движения молекул . . . . .	117
<b>За страницами учебника.</b> Распределение Больцмана . . . . .	122
§ 24. Взаимодействие молекул и атомов . . . . .	125
<b>За страницами учебника.</b> Потенциальная энергия взаимодействия молекул . . . . .	128
Основное в главе 4 . . . . .	130

## Глава 5. Основные понятия и законы термодинамики

§ 25. История развития и становления термодинамики . . . . .	132
§ 26. Тепловое равновесие. Температура . . . . .	135
§ 27. Внутренняя энергия макроскопической системы . . . . .	140
<b>За страницами учебника.</b> Изменение агрегатных состояний вещества . . . . .	144
§ 28. Работа в термодинамике . . . . .	149
§ 29. Первый закон термодинамики . . . . .	151
§ 30. Второй закон термодинамики . . . . .	154
<b>За страницами учебника.</b> Статистическое объяснение необратимости . . . . .	157
Основное в главе 5 . . . . .	159

## Глава 6. Свойства газов

§ 31. Давление идеального газа . . . . .	161
§ 32. Уравнение состояния идеального газа . . . . .	165
§ 33. Газовые законы . . . . .	169
§ 34. Критическое состояние вещества . . . . .	178
§ 35. Насыщенный пар . . . . .	181
§ 36. Влажность воздуха . . . . .	183

§ 37. Применение газов . . . . .	188
§ 38. Принципы работы тепловых двигателей . . . . .	190
§ 39. Тепловые двигатели . . . . .	196
§ 40. Работа холодильной машины . . . . .	200
Основное в главе 6 . . . . .	203

## Глава 7. Свойства твёрдых тел и жидкостей

§ 41. Идеальный кристалл . . . . .	209
§ 42. Анизотропия свойств кристаллических тел . . . . .	212
§ 43. Деформация твёрдого тела. Виды деформации . . . . .	214
§ 44. Механические свойства твёрдых тел . . . . .	219
<b>За страницами учебника.</b> Реальный кристалл . . . . .	223
Жидкие кристаллы . . . . .	225
§ 45. Аморфное состояние твёрдого тела . . . . .	228
<b>За страницами учебника.</b> Наноматериалы и нанотехнология . . . . .	232
§ 46. Свойства поверхностного слоя жидкости . . . . .	235
<b>За страницами учебника.</b> Поверхностная энергия. . . . .	239
§ 47. Смачивание. Капиллярность . . . . .	240
Основное в главе 7 . . . . .	244
Итоги раздела . . . . .	246

## Электродинамика

### Глава 8. Электростатика

§ 48. Электрический заряд . . . . .	250
§ 49. Электризация тел . . . . .	253
§ 50. Закон Кулона . . . . .	257
§ 51. Электрическое поле . . . . .	261
§ 52. Линии напряжённости электростатического поля . . . . .	264
§ 53. Проводники в электростатическом поле . . . . .	267
§ 54. Диэлектрики в электростатическом поле . . . . .	271



§ 55. Работа электростатического поля . . . . .	274
§ 56. Потенциал электростатического поля . . . . .	277
§ 57. Электрическая ёмкость . . . . .	280
§ 58. Энергия электростатического поля заряженного конденсатора . . . . .	284
Основное в главе 8 . . . . .	286

## Лабораторные работы

Вычисление погрешностей измерений в лабораторных работах . . . . .	289
1. Исследование движения тела под действием постоянной силы. . . . .	298
2. Изучение движения тела по окружности под действием сил тяжести и упругости . . . . .	301
3. Сравнение работы силы с изменением механической энергии тела . . . . .	304
4. Изучение закона сохранения механической энергии при действии на тело сил тяжести и упругости . . . . .	306
5. Измерение удельной теплоты плавления льда . . . . .	310
6. Изучение уравнения состояния идеального газа . . . . .	312
7. Измерение относительной влажности воздуха . . . . .	315
8. Наблюдение образования кристаллов . . . . .	319
9. Измерение поверхностного натяжения жидкости . . . . .	320
10. Измерение электрической ёмкости конденсатора . . . . .	323
Ответы к упражнениям . . . . .	325
Предметно-именной указатель . . . . .	326
Приложения . . . . .	330