

В. Г. СЫТИН

МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА В ЖИЗНИ, ТЕХНИКЕ И ПРИРОДЕ

УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ
Издание второе, стереотипное



ЛАНЬ

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ • МОСКВА • КРАСНОДАР
2024

УДК 539.1
ББК 22.36я73

С 95 **Сытин В. Г.** Молекулярная физика в жизни, технике и природе : учебное пособие для вузов / В. Г. Сытин. — 2-е изд., стер. — Санкт-Петербург : Лань, 2024. — 624 с. — Текст : непосредственный.

ISBN 978-5-507-49299-2

Назначение пособия — быть книгой для чтения в помощь учебным занятиям по молекулярной физике в педагогическом вузе. Рассмотрены исторические и прикладные вопросы молекулярной физики. Указаны явления молекулярной физики, возникающие из обыденных наблюдений в жизни и природе, а также применяемые в технике и науке.

Для студентов-физиков, обучающихся по направлению «Педагогическое образование».

УДК 539.1
ББК 22.36я73

Издается в авторской редакции

Рецензенты:

В. В. АЛЕКСЕЕВ — кандидат физико-математических наук, доцент, первый проректор, проректор по учебной работе ЧПУ им. И. Я. Яковлева;

А. И. КИТАЕВ — кандидат физико-математических наук, доцент, зав. кафедрой общей и теоретической физики ЧПУ им. И. Я. Яковлева;

А. С. САБИРОВ — кандидат физико-математических наук, доцент, зав. кафедрой теоретической механики им. С. Ф. Сайкина, зам. начальника учебно-методического управления ЧГУ им. И. Н. Ульянова.

Василий Григорьевич СЫТИН

МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА В ЖИЗНИ, ТЕХНИКЕ И ПРИРОДЕ

*Учебное пособие
Издание второе, стереотипное*

Зав. редакцией
литературы по информационным технологиям
и системам связи *О. Е. Гайнутдинова*

ЛР № 065466 от 21.10.97
Гигиенический сертификат 78.01.10.953.П.1028
от 14.04.2016 г., выдан ЦГСЭН в СПб

Издательство «ЛАНЬ»
lan@lanbook.ru; www.lanbook.com;
196105, Санкт-Петербург, пр. Юрия Гагарина, 1, лит. А.
Тел.: (812) 412-92-72, 336-25-09.
Бесплатный звонок по России: 8-800-700-40-71

Подписано в печать 26.01.24.
Бумага офсетная. Гарнитура Школьная. Формат 84×108^{1/32}.
Печать офсетная/цифровая. Усл. п. л. 32,76. Тираж 30 экз.
Заказ № 103-24.

Отпечатано в полном соответствии
с качеством предоставленного оригинал-макета
в АО «Т8 Издательские Технологии».
109316, г. Москва, Волгоградский пр., д. 42, к. 5.

Обложка
Е. А. ВЛАСОВА

© Издательство «Лань», 2024
© В. Г. Сытин, 2024
© Издательство «Лань»,
художественное оформление, 2024

ПРЕДИСЛОВИЕ

Физика — это огромная наука, имеющая более чем двухтысячелетнюю историю развития. Естественно, что при ограниченном количестве учебных часов, выделяемых на изучение основ физики в вузе, невозможно охватить все ее многообразие. Поэтому в вузовские учебные программы по курсу общей физики включаются в основном основополагающие (фундаментальные) вопросы, оставляя «за бортом» многие исторические и прикладные, а с методической точки зрения — «самые интересные» аспекты физики.

Конечно, преподаватель в начале изучения определенного раздела курса общей физики обязан рекомендовать литературу и для самостоятельного изучения, в том числе — по прикладным и историческим вопросам. Однако повсеместно наблюдаемая в последние годы общая тенденция снижения у молодежи интереса к чтению книг и отсутствие необходимого опыта самостоятельной работы у студентов младших курсов приводит к необходимости формирования у них в первую очередь «интереса к физике». Не секрет, что даже изучив курс физики и пройдя лабораторный практикум, многие успевающие студенты остаются в твердой уверенности, что физика — это теоретическая, а потому — «скучная» наука, у которой очень мало точек соприкосновения с реальной жизнью. При этом они остаются вне понимания того, что физика — наука по сути экспериментальная и только опыт (лучше всего — собственный) является критерием истины. Никакая компьютерная имитация, интенсивно (иногда — совершенно бездумно) внедряемая в настоящий момент в учебный процесс, не может заменить «реального ощущения природы» при проведении натуральных опытов собственными руками и, желательно, собственными средствами и методиками.

Одним из способов повышения интереса к физике является изучение «эффектных» явлений, которые могут оставить заметный след в сознании молодого человека. Эффектные проявления природы часто возникают из самых обыденных наблюдений, вскрывая внутреннюю красоту и величие физики. Как правило, эти опыты можно легко повторить самостоятельно. Не меньший интерес представляют и историко-личностные «нюансы» какого-либо физического открытия, обычно не освещаемые в учебной литературе. И здесь особую ценность приобретает так называемая «научно-популярная литература».

Главное назначение этого пособия — быть книгой для чтения в помощь учебным занятиям по молекулярной физике и по сути оно является научно-популярным изданием, т. е. призвано решать проблемы, обозначенные выше. Пособие состоит из отдельных статей, логически связанных друг с другом. Автор-составитель постарался расположить материал так, чтобы он до определенной степени сопрягался с программой курса молекулярной физики для студентов-физиков направления «Педагогическое образование» своего вуза.

Статьи неодинаковы по трудности содержания и по стилю. Они не являются оригинальными — их источниками явились научно-популярные издания по физике, в большинстве своем опубликованные в разные годы в бывшем Советском Союзе известными физиками-популяризаторами науки; кроме того, имеются и современные издания, а также иностранные (переводные) источники. В основном эти книги предназначены для школьников и студентов, но встречаются и вполне «взрослые» издания. Немало информации было найдено и на просторах Интернета. Список использованных источников приведен в конце пособия. Найденный материал существенным образом был переработан и адаптирован для физиков-первокурсников — будущих педагогов.

В процессе издания материал пособия многократно проверялся, и здесь необходимо отметить неоценимую помощь редакционно-издательского отдела вуза, за что составитель выражает им глубочайшую признательность. Однако он вполне допускает, что в пособии могли остаться фактические, методические или иные неточности, за что составитель заранее приносит свои глубочайшие извинения.

МОЛЕКУЛЯРНО-КИНЕТИЧЕСКАЯ ТЕОРИЯ И ГАЗЫ

1.1. ЗАРОЖДЕНИЕ АТОМИСТИЧЕСКИХ ПРЕДСТАВЛЕНИЙ

Первые материалистические воззрения на природу в систематической форме начали вырабатываться в Древней Греции в период с VI до IV в. до н.э. Можно сказать, что физика как наука начала формироваться именно в это время. Греческие ученые были первыми, которые стремились понять основы мироздания и происходящие в мире изменения средствами разума, не прибегая к фантастическим и религиозным домыслам, причем — во всеобщей связи наблюдаемых природных явлений.

Фалес (около 624–547 гг. до н.э.) искал единство мира в идее, что все в мире произошло из воды и превращается в воду. **Анаксимандр** (610 — ок. 546 гг. до н.э.) материальной основой природы считал ненаблюдаемую сущность **апейрон**, из которого возникают и развиваются миры. У **Анаксимена** (585–525 гг. до н.э.) такой первоосновой является воздух, а у **Гераклита** (530–470 гг. до н.э.) — огонь. Как видно, ученые искали одну единственную первооснову, что затрудняло возможность логичного объяснения многообразия природы, не привлекая дополнительных сущностей. С другой стороны, полагая в основе природы единую материю, эти греки впервые высказали принцип сохранения (материи), который послужил основой всех последующих научно-материалистических взглядов на природу.

Более поздние греческие ученые объяснение мира стали искать в допущении нескольких первичных начал, сочетание и разъединение которых порождает наблюдающиеся изменения. **Анаксагор** (500–428 гг. до н. э.) в качестве таких начал принимал первичные частицы **гомеомерии**, каждой из которых присущи разнообразные свойства. По его представлениям, гомеомерии были запущены в движение некоторой естественной силой, которую Анаксагор называл «нус», т. е. «разум», и разделением и смешением гомеомерий происходит все существующее. **Эмпедокл** (490–430 гг. до н. э.) в качестве первоосновы принимал **огонь, воздух, воду и землю**, сочетанием и разделением которых обусловлено происхождение всех существующих вещей; источником же движения у него являются движущие начала: любовь и вражда.

Однако наивысшим достижением античной науки стала **атомистика**, которая в настоящее время является основой физики и химии. Одним из основателей этого учения был великий греческий философ **Демокрит** (ок. 460–370 гг. до н. э.). Демокрит исходил из положения о вечности материи: ничто не создается из ничего и все, что существует, не может быть уничтожено. Всякое изменение — это только разъединение или соединение частей. Эти соединения и разъединения закономерны, поэтому все происходящее в мире не случайно, а имеет причину и следствие. В основу всего сущего Демокрит положил неизменные и неделимые **атомы** (в переводе с греч. — *неделимый, неразрезаемый*), движущиеся в пустом пространстве. Атомы отличаются друг от друга формой и величиной. При движении в пространстве большие атомы движутся быстрее малых и, настигая последние, они ударяют в них и производят боковые движения, дающие начало вихревым движениям. Эти вихри и боковые движения приводят к образованию и исчезновению бесчисленных миров. Человек, как и все существующее, состоит из атомов, его душа состоит из самых мелких, круглых и подвижных атомов, движения которых порождают жизненные явления.

Воззрения Демокрита были развиты **Эпикуром** (341–270 гг. до н. э.) (в более поздний период представления Эпикура были изложены в философской поэме «О природе вещей»

римским поэтом-философом **Лукрецием Каром** (ок. 99–55 гг. до н. э.)). По Эпикуру, у атомов нет никаких чувственно осязаемых свойств (вроде цвета, запаха и т. д.), кроме формы, веса и величины (у Демокрита атомы отличались только формой и величиной). Кроме того, Эпикур считал, что все атомы движутся прямолинейно с одинаковыми скоростями, но могут самопроизвольно очень незначительно отклоняться от прямолинейных путей. Эти спонтанные боковые отклонения и порождают столкновения и вихревые движения атомов, приводящие к образованию вещей. Таким образом, Эпикур наряду с закономерностью допускал существование случайностей.

Атомисты использовали свою концепцию для объяснения всех явлений мира, в том числе и явлений общественной жизни. При всей их фантастичности (для нас), это все же были попытки естественного объяснения явлений природы, опирающиеся на наблюдения, и в этом их огромное историческое значение. При этом они высказывали ряд гениальных догадок, к числу которых, например, относится идея эволюции земли и миров, картина развития человеческого общества вместе с развитием труда, и многое другое. Физические явления (свет, теплоту, магнетизм) атомисты объясняли как испускание телами очень маленьких атомов. Следует также отметить их тонкую наблюдательность. Так, возможность существования атомов они обосновывали фактом сушки мокрого белья на солнце и увлажнением платья на берегу моря, стиранием поверхности медной статуи у городских ворот, к которой прикладываются входящие в город, стиранием камней мостовой и т. д.

О ясном и удивительно современном характере мышления древних греков можно судить по описанию опытов с воздухом, которые проводил древнегреческий физик **Страто** (III в. до н. э.), сохранившегося в произведениях жившего позднее древнегреческого механика **Герона Александрийского** (I в. до н. э.): «Необходимо четко понять, что сосуды, которые обычно считают пустыми, на самом деле не пустые, а наполнены воздухом. Согласно современным теориям, **воздух состоит из мельчайших частиц материи**, которая зачастую невидима для нас. Соответственно, если налить воды в явно пустой

сосуд, объем вытесненного воздуха будет равен объему налитой воды. Чтобы это доказать, сделайте следующий опыт. Возьмите кажущийся пустым сосуд. Переверните его вверх дном, стараясь держать в вертикальном положении, и погрузите в миску с водой. Даже если вы будете давить на него до тех пор, пока он не скроется под водой, ни капли воды не проникнет вовнутрь. Это доказывает, что воздух является материальным веществом, которое не позволяет воде проникнуть в сосуд».

К сожалению, в процессе исторического развития идеи греческих атомистов были надолго забыты. Их возрождение (на новом качественном уровне) началось лишь в конце XVIII в. (см. ст. 2.4 на с. 102).

В современной науке атомизм окружающего нас мира оформлен в трех основных положениях:

- 1) все тела состоят из мельчайших частиц, называемых атомами и молекулами;
- 2) все атомы и молекулы в телах находятся в беспорядочном хаотическом движении, не имеющего преимущественного направления;
- 3) атомы и молекулы взаимодействуют между собой.

Эти положения в настоящее время считаются абсолютно достоверными, подтвержденными большим количеством экспериментальных фактов, и, по сути, являются фундаментом современной науки [50, 67, 126, 136, 158, 168].

1.2. СТРОЕНИЕ АТОМОВ И ИХ СРАВНИТЕЛЬНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА

Согласно современным представлениям, **атом** представляет собой устойчивую динамическую систему, в центре которой находится массивное положительно заряженное **ядро**, вокруг которого вращаются легкие отрицательные **электроны**. Силой, удерживающей положительно заряженное ядро и отрицательно заряженные электроны как одно целое, является электрическое взаимодействие. С другой стороны, если бы не вращательное движение электронов, то под действием силы электрического притяжения электрон упал бы на ядро. Необходи-

мо отметить, что вышесказанное — всего лишь утрированное описание, на самом деле происходящие в атоме явления можно описать только с помощью аппарата квантовой физики.

Ядра атомов состоят из положительных протонов и нейтральных нейтронов. Суммарный заряд электронов по величине равен заряду ядра, так что в целом атом электрически нейтрален. Так как заряд протона по величине равен заряду электрона, то количество вращающихся вокруг ядра электронов равно количеству протонов в ядре. В принципе, протоны в ядре должны были бы разлететься из-за электростатического отталкивания, однако их (а заодно и нейтроны) удерживают в ядре так называемые **ядерные силы**, которые по величине намного превосходят электромагнитные. Однако в отличие от электромагнитных сил ядерные силы являются короткодействующими и их «сфера влияния» ограничена размерами ядра.

Порядковый номер химического элемента в периодической таблице Менделеева совпадает с количеством протонов в ядре и, соответственно, определяет заряд ядра (а также количество вращающихся вокруг ядра электронов). Поэтому другое название порядкового номера элемента — **зарядовое число**.

Атомы могут соединяться в **молекулы**, образуя новые вещества с новыми свойствами. Механизмы и закономерности превращения одних молекул в другие изучает **химия**. Все невообразимое разнообразие окружающего нас мира является результатом сочетаний всего-то около сотни разных сортов атомов, упорядоченных в периодической таблице Менделеева. Просто диву даешься тому, как близко смогли подойти древнегреческие философы к разгадке строения мира более чем 2000 лет тому назад (см. предыдущую статью).

Размеры атомов настолько малы, что даже в малых объемах содержится огромное их количество. Можно привести следующие сравнения:

- при воображаемом линейном увеличении размеров всех окружающих нас тел в 1 000 000 раз вершина Эйфелевой башни была бы в соседстве с орбитой Луны, рост человека был бы 1 700 км, мыши достигали бы 100 км в длину, тело мухи простиралось бы на 7 км, каждый волос был бы толщиной 100 м, красные тельца нашей крови имели бы

в поперечнике 7 м, а молекулы были бы величиной всего лишь с типографскую точку этой книги. При этом в 1 см^3 воздуха было бы около 28 таких точек;

- размеры атомов в металлах (например, в вольфраме) во столько раз меньше длины спичечного коробка, во сколько раз толщина человеческого волоса меньше расстояния 20 км;
- молекула воды во столько раз меньше крупного яблока, во сколько раз яблоко меньше земного шара;
- если бы каждая из молекул, составляющих 2 г водорода, превратилась в песчинку, то их было бы достаточно, чтобы покрыть Землю слоем в 1 м;
- в 1 см^3 атмосферного воздуха при обычных условиях содержится около $2,9 \cdot 10^{19}$ (т.е. 29 000 000 000 000 000 000) молекул (азота, кислорода, углекислого газа и пр.). Если взять абсолютно пустой сосуд объемом 1 см^3 и пробить в нем тончайшее отверстие, такое, чтобы через него в 1 с могло проникать внутрь сосуда по 100 млн молекул воздуха, то для того, чтобы наполнить сосуд до нормального количества молекул, нужно будет ждать около 9 000 лет;
- если 1 л спирта вылить в Мировой океан и после равномерного его распределения зачерпнуть 1 л воды, то в этом литре окажется приблизительно 7 000 молекул спирта;
- в комнате средних размеров (например, в вашей аудитории для занятий) содержится примерно 100 м^3 воздуха. В этом объеме находятся где-то $3 \cdot 10^{27}$ молекул, что составляет почти 5 000 молей. Общая масса такого количества воздуха — свыше 140 кг;
- при обычных условиях среднее расстояние между молекулами газов примерно в 150 раз превышает собственные размеры молекул;
- размеры атомов имеют порядок 10^{-10} м, а размеры ядер в них — 10^{-15} м. Если бы радиус ядра атома удалось увеличить до 1 см, то электроны вокруг него вращались бы на расстоянии нескольких сот метров — настолько «пусты» атомы внутри [9, 22, 95, 98, 126, 136, 142, 147, 168].

1.3. ДВИЖУЩИЕ СИЛЫ ПРИРОДЫ

Итак, все что окружает нас, состоит из сравнительно небольшого количества (порядка сотни) сортов атомов и их бесконечно большого количества соединений — молекул. Таким образом, догадка древнегреческих ученых об атомизме (дискретности) нашего мира (см. ст. 1.1) в наше время блестяще подтвердилась. Более того, современная наука доказала, что атомы и молекулы, в свою очередь, состоят из еще более мелких частиц: протонов, нейтронов, электронов и других **элементарных частиц** (см. предыдущую статью). Поэтому, после выяснения вопроса о «кирпичиках мироздания», возникает естественный **второй вопрос**: что заставляет эти «кирпичики» двигаться, образуя бесконечное разнообразие физических процессов, происходящих в нашем мире?

Этим вопросом также задавались древнегреческие философы, которые кроме первоосновы мира искали и движущую силу природы (см. ст. 1.1). Например, философ Анаксагор считал, что все движется естественной силой «нус» (т.е. «разум»); Эмпедокл же источником движения считал любовь и вражду. Более поздние атомисты (Демокрит, Эпикур) считали, что атомы движутся в пустоте вечно, поэтому им никакой движущей силы не нужно, а все многообразие тел и наблюдаемых явлений обеспечивается непрерывными процессами соединений и разъединений атомов и изменениями характера их движения.

Можно только удивляться прозорливости древнегреческих ученых: они и в этом случае «копали» в правильном направлении. Действительно, современная наука доказывает, что «сценой» для «разыгрывания» физических процессов элементарным частицам (в том числе — атомам и молекулам) служит пустота — **вакуум**. До недавнего прошлого (до середины XX в.) считалось, что вакуум действительно ничего в себе не содержит (абсолютная пустота). Однако по современным представлениям, вакуум — скорее всего «бульон» из постоянно рождающихся и исчезающих **виртуальных частиц**, существующих очень короткий промежуток времени. Но самое главное, между всеми элементарными частицами в вакууме

существуют **взаимодействия на расстоянии**. Их всего четыре: **гравитационное, электромагнитное, сильное и слабое**. Именно они являются теми движущими силами, которые порождают наблюдаемые в природе явления: горение, движение небесных тел, свет и, в конце концов, делают возможной саму жизнь.

Проявляются взаимодействия в виде действующих на частицы **сил**, которые изменяют их состояние, т. е. характер движения частиц. А так как любое движение происходит в пространстве и во времени, то утверждается, что взаимодействия изменяют свойства пространства-времени. Это означает, что даже в отсутствие частиц данная точка пространства, подверженная силам взаимодействия, остается измененной. Это, в свою очередь, означает, что взаимодействия являются объективной реальностью нашей природы (это не наша с вами фантазия!), т. е. наряду с веществом их можно отнести к **материи**.

Взаимодействия распространяются в вакууме с максимальной для нашей природы скоростью, называемой **скоростью света**: ($c \approx 300\,000$ км/с). Согласно современным представлениям, каждое из взаимодействий возникает в результате обмена частицами, называемыми **переносчиками** (или **квантами**) **данного взаимодействия**, так что скорость распространения взаимодействия — это фактически скорость движения переносчиков взаимодействия в вакууме. Все наблюдаемые нами в природе силы (тяжести, упругости, трения и др.) являются проявлениями вышеназванных взаимодействий или их комбинаций.

Гравитационное взаимодействие (гравитация) является наиболее всеобъемлющим: ему подвержены все материальные объекты без исключения. Оно является длиннодействующим, т. е. соответствующие силы могут проявляться на очень значительных расстояниях. Приближенной теорией этого взаимодействия (в случае медленного движения тел и не слишком большой интенсивности взаимодействия) является теория тяготения **И. Ньютона** (1643–1727). Согласно этой теории (закону всемирного тяготения, открытому в 1687 г.), все тела притягиваются друг к другу с силой, пропорциональной

их массам и обратно пропорциональной квадрату расстояния между ними:

$$F_{\text{гр}} = \gamma \frac{m_1 m_2}{r^2},$$

где $\gamma = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ Н} \cdot \text{м}^2 / \text{кг}^2$ — гравитационная постоянная. Более точной является общая теория относительности, созданная в 1916 г. немецким физиком **А. Эйнштейном** (1879–1955).

Гравитационное взаимодействие между частицами осуществляется посредством обмена **гравитонами** — это не имеющие массы частицы, которые не способны находиться в покое и всегда распространяются с максимально возможной скоростью — скоростью света в вакууме. Гравитоны пока экспериментально не зафиксированы, так как при обычных плотностях материи, типичных для земных условий, гравитационное взаимодействие чрезвычайно слабое, и от эксперимента требуется ювелирная точность, которая еще не достигнута.

Гравитация управляет наиболее глобальными процессами во Вселенной, в частности обеспечивая строение и стабильность нашей Солнечной системы. Однако для явлений в масштабе микромира (куда входят атомы и молекулы) ее роль несущественна из-за малости масс элементарных частиц.

Электромагнитное взаимодействие, как и гравитационное, по своей природе длиннодействующее. Вообще говоря, электромагнитное взаимодействие состоит из двух составляющих: электрического и магнитного. Однако, как доказал английский физик **Д. К. Максвелл** (1831–1879), электрическое и магнитное взаимодействия являются разными проявлениями одного и того же электромагнитного взаимодействия. В частности, свет (с помощью которого мы видим), рентгеновское излучение, радиоволны, инфракрасное (тепловое) излучение, γ -излучение и др. тоже являются проявлениями этого взаимодействия. Оно же приводит в действие всю электрическую и электронную аппаратуру.

Существование электромагнитного взаимодействия обусловлено наличием у некоторых частиц особого свойства — **электрического заряда**. Эти заряды могут быть двух типов — положительные и отрицательные. Из-за этого электромагнит-

ные силы способны быть как силами притяжения, так и силами отталкивания (в отличие от тяготения, у которого силы всегда имеют характер притяжения). Наименьшим в природе является (отрицательный) заряд электрона: $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл; протон обладает таким же зарядом, но положительного знака. Как установил в 1785 г. французский физик **Ш. О. Кулон** (1736–1806), сила взаимодействия двух неподвижных зарядов прямо пропорциональна этим зарядам и убывает обратно пропорционально квадрату расстояния между ними:

$$F_{\text{эл}} = k \frac{q_1 q_2}{r^2},$$

где $k = 9 \cdot 10^9$ Н·м²/Кл² — коэффициент пропорциональности.

Взаимодействия между ядрами атомов и вращающимися вокруг них электронами, а также между атомами в молекулах являются электромагнитными, так что от этого взаимодействия зависит их структура и физико-химические свойства (см. предыдущую статью). Силы упругости и сухого трения, с которыми мы сталкиваемся повседневно, тоже имеют электромагнитную природу. Можно сказать, что именно электромагнитное взаимодействие делает окружающий мир таким, каким мы его видим.

Переносчиками электромагнитного взаимодействия являются **фотоны**. Это — частицы, не имеющие массы, которые в вакууме движутся со скоростью света c . В результате обмена этими частицами и возникает электромагнитное взаимодействие между заряженными телами.

Сильное взаимодействие — самое мощное из всех остальных (чем и объясняется его название). Силы, удерживающие вместе протоны и нейтроны в атомном ядре, — проявления именно этого взаимодействия, поэтому его другое название — **ядерное взаимодействие**; в ядре оно примерно в 100 раз сильнее электромагнитного. В отличие от последнего (а также гравитационного) сильное взаимодействие короткодействующее — оно очень быстро убывает по мере увеличения расстояния между частицами; радиус его действия порядка 10^{-15} м. Переносчиками сильного взаимодействия являются

глюоны — частицы, не имеющие массы и находящиеся в постоянном движении со скоростью света c .

Слабое взаимодействие менее известно за пределами узкого круга физиков и астрономов, но это нисколько не умаляет его значения. Достаточно сказать, что если бы его не было, то погасли бы Солнце и другие звезды, ибо в термоядерных реакциях, обеспечивающих их свечение, слабое взаимодействие играет очень важную роль. Слабое взаимодействие относится к короткодействующим: его радиус примерно в 1 000 раз меньше, чем у ядерных сил. Его переносчиками являются **промежуточные бозоны**; в отличие от гравитонов, фотонов и глюонов промежуточные бозоны обладают массой [21, 112, 168].

1.4. ИЗМЕРЕНИЕ КОЛИЧЕСТВА ВЕЩЕСТВА

В быту под количеством вещества мы обычно понимаем его объем или массу. Однако мало кто задумывается, что применение этих понятий для сравнения количеств разных веществ непригодно. Действительно, два разных вещества могут иметь одинаковые массы, но разные объемы, и наоборот. Переводным коэффициентом между массой и объемом вещества является его плотность ($m = \rho V$), которая, как известно, даже для одного вещества в разных агрегатных состояниях разная. И если в быту мы на основе договоренностей с этим положением вещей как-то миримся, то в науке такой произвол недопустим.

Можно было бы, конечно, в качестве количества вещества использовать только массу. И, действительно, в науке вплоть до начала XIX в. так оно и было. Все изменилось с началом распространения атомистической теории вещества.

В 1811 г. итальянский физик и химик **Амедео Авогадро** (1776–1856) высказал гипотезу, согласно которой молекулы простых газов состоят из одного или нескольких атомов. На ее основе он сформулировал один из основных законов идеальных газов, получивший название **закона Авогадро**: «В равных объемах любых газов при одинаковых условиях содержится одинаковое число молекул». Под одинаковыми условиями в

законе Авогадро имелись в виду одинаковость температур и давлений.

Закон Авогадро послужил одной из основ, на которой в дальнейшем стало развиваться атомно-молекулярное учение. В частности, стало понятно, что в качестве количества вещества выгодно использовать их количество в прямом (поштучном) смысле. Действительно, можно составить таблицу масс молекул для разных веществ и тогда, если известно количество молекул, всегда можно вычислить их общую массу. На практике же это положение использовалось в обратном направлении: зная общую массу молекул и их количество, вычисляли массу одной молекулы. Для этого масса молекулы какого-либо вещества принималась за единицу и через нее выражались массы молекул остальных веществ. В современной науке такой единицей (эталоном) является $1/12$ массы атома углерода, которая называется **атомной единицей массы**: $1 \text{ а.е.м.} = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$. Масса молекулы, выраженная через количество содержащихся в ней атомных единиц массы, называется **относительной атомной массой** и приводится в периодической таблице Менделеева.

Количество молекул даже в самом маленьком объеме вещества огромно, что при расчетах приводит к необходимости оперировать большими неудобными числами. Поэтому вполне естественной является идея ввести в оборот масштабирующую физическую величину, т.е. считать, что какое-то определенное количество молекул равно одной единице новой величины (здесь полная аналогия с денежными единицами, например, 100 копеек равны 1 рублю). Эту новую величину назвали **молем** (от лат. *moles* — масса; кстати, слово «молекула» тоже от лат. *moles* — масса и *kula* — уменьшительный суффикс). Если вы, однако, думаете, что в качестве количества молекул, содержащегося в одном моле, удобнее брать какое-нибудь «круглое» число, то будете правы только отчасти. На самом деле никто (!) не может непосредственно подсчитать количество молекул поштучно — его приходится определять из опыта, приняв количество молекул какого-либо вещества определенной массы за эталон. В качестве эталона вначале бралось количество атомов в 1 г водорода при условии, что

они не объединены в молекулы. Тогда ясно, что 2 г молекулярного водорода H_2 тоже будет содержать такое же количество молекул. Дальше по аналогии: так как атом углерода ^{12}C тяжелее атома водорода в 12 раз, то и 12 г углерода содержат такое же количество атомов; точно так же 16 г атомарного кислорода ^{16}O содержат это количество атомов, и т. д. В современной науке после введения системы физических единиц СИ (Системы Интернациональной) молем называют **количество данного вещества, содержащее столько же частиц (атомов и молекул), сколько содержится атомов в 12 г углерода ^{12}C** . Это количество получило название **числа Авогадро** и оно разными независимыми экспериментами определено с большой точностью: $N_A = 6,02 \cdot 10^{23}$ моль $^{-1}$. Имя Авогадро названию числа присвоено вполне заслуженно, т.к. с использованием понятия моля закон Авогадро можно сформулировать так: «Моль любого вещества содержит одно и то же число молекул», и это справедливо не только для газов, но и для жидкостей и твердых тел.

Число Авогадро определяют различными методами, некоторые из них основаны на изучении броуновского движения (см. ст. 1.7). Знание числа Авогадро дает представление о масштабах микромира и размерах молекул (см. ст. 1.2) [89, 125, 126, 128, 136, 167].

1.5. НИЖНИЙ ПРЕДЕЛ МОЛЯ

В одном моле, как известно, содержится авогадрово число молекул: $6,02 \cdot 10^{23}$ штук. Одна тысячная моля — это миллимоль. Пошли дальше:

10^{-6} моля — микромоль;

10^{-9} моля — наномоль;

10^{-12} моля — пикомоль;

10^{-15} моля — фемтомоль;

10^{-18} моля — аттомоль;

10^{-21} моля — зептомоль;

10^{-24} моля — куакомоль (или, другое название, йоктомоль)...

Стоп, стоп... Ведь 1 куакомоль составляет 0,6 молекулы... Дальше некуда [56, 191].

1.6. ОТКРЫТИЕ ПЕРИОДИЧЕСКОЙ ТАБЛИЦЫ ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ

Открытие **Д. И. Менделеевым** (1834–1907) периодического закона химических элементов датируется 17 февралем 1869 г., когда он составил таблицу, озаглавленную «Опыт системы элементов, основанной на их атомном весе и химическом сходстве». С тех пор закон получил всеобщее признание как один из основных законов естествознания. Это был результат долголетних поисков — закон был разработан на основе обобщения большого количества химических сведений о свойствах элементов и их соединений (этим предложением мы опровергаем миф, согласно которому этот закон Менделееву приснился во сне).

Существенная особенность периодического закона заключается в том, что в отличие от многих других основных законов природы он не имеет количественного выражения, т. е. не может быть записан в виде какого-либо математического уравнения или формулы. Он нашел наглядное отражение лишь в виде таблиц или различных геометрических построений. За 100 с лишним лет существования учения о периодичности разными авторами предлагалось более 500 вариантов графического изображения периодической системы. Сам Д. И. Менделеев в 1871 г. дал следующую классическую словесную формулировку периодическому закону: «Свойства элементов, а потому и свойства образуемых ими простых и сложных тел стоят в периодической зависимости от их атомного веса». Эта формулировка соответствует **химическому этапу** в развитии менделеевского учения о периодичности. Позже, после того как было доказано, что заряд ядра атома Z численно равен порядковому номеру соответствующего элемента в периодической таблице, на смену пришел **этап физический** и его формулировка стала звучать так: «Свойства элементов, простых веществ и их соединений находятся в периодической зависимости от величины Z ».

Химические элементы вплоть до номера $Z = 92$ (урана) встречаются в природе. Начиная с номера 93 идут искусственные элементы, созданные в лабораториях. Пока самый большой заявленный учеными номер — 118.

Надо отметить, что у Менделеева были предшественники. В 1862 г. итальянский химик **С. Канниццаро** (1826–1910) выступил с докладом о роли атомных весов элементов как важнейшем химическом инструменте. В том же 1862 г. французский геолог **А. де Шантуркуа**, а затем английский химик **Д. Ньюлендс** установили, что элементы можно разместить в порядке возрастания атомных весов в специальной таблице, причем в вертикальные столбцы попадают элементы со сходными свойствами. Практически одновременно с Менделеевым предложил свой вариант таблицы элементов немецкий ученый **Л. Мейер** (1830–1895).

Однако признание получила именно таблица Менделеева, который не только проявил смелость и умение при доказательстве своих взглядов, но и развил их дальше своих коллег. Во-первых, периодическая таблица Менделеева (названная так за периодическое чередование элементов со сходными химическими свойствами) имела более полный вид, чем аналогичные таблицы его вышеупомянутых коллег, и более сходную форму с той, которая повсеместно принята в наше время. Во-вторых, когда свойства того или иного элемента заставляли Менделеева помещать элемент вне принятой последовательности атомных весов, он смело шел на изменение формального порядка, исходя из определяющей роли химических свойств, а не атомного веса. И всякий раз он оказывался абсолютно прав. И в-третьих, самое важное: там, где в таблице не хватало элементов для заполнения ячеек, Менделеев оставил свободные места, дерзко предвосхитив будущие открытия новых элементов. Основываясь на свойствах соседей по периодической таблице, он даже довольно точно описал три элемента, которым еще только предстояло занять свободные ячейки. Здесь ему сопутствовала явная удача: все три элемента (галлий, скандий и германий) были открыты еще при жизни Менделеева, и он дожил до триумфа своей периодической системы.

Кстати, в представлении большинства людей Менделеев — великий химик. Однако из всего количества его трудов собственно химии посвящено лишь 9%. С гораздо большим основанием Менделеева можно было бы назвать физико-химиком, физиком или технологом, ибо каждой из этих областей он посвятил примерно 20% своих работ. Немалая доля его исследований приходится на геофизику (5%) и экономику (8%). Менделеев был также автором фундаментальных трудов по метрологии, метеорологии, сельскому хозяйству и воздухоплаванию. Уделял он также большое внимание педагогической и общественной деятельности [62, 100, 136, 167, 168].

1.7. БРОУНОВСКОЕ ДВИЖЕНИЕ

Броуновское (или брауновское) движение — это беспорядочное движение малых частиц, взвешенных в жидкости или газе, происходящее под действием ударов молекул окружающей среды.

Впервые такое движение исследовал и описал в 1827 г. английский ботаник **Р. Браун** (1773–1858) при изучении под микроскопом взвешенной в воде цветочной пыльцы. Он обнаружил, что частички пыльцы находятся в непрерывном беспорядочном движении, как бы исполняя дикий фантастический танец. Он писал: «Это движение, как я убежден, обусловлено не потоками жидкости, не постепенным ее испарением, а принадлежит самим частицам». Наблюдаемые (броуновские) частицы размером ~ 1 мкм и менее совершают неупорядоченные независимые движения, описывая сложные зигзагообразные траектории (рис. 1.1).

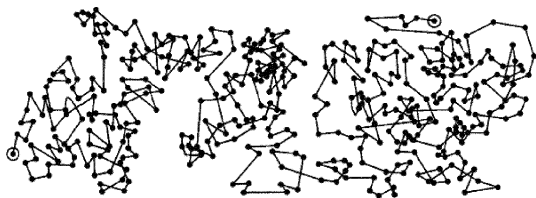


Рис. 1.1

Подобный опыт можно проделать, пользуясь краской или тушью, предварительно растертой до таких мельчайших крупинок, которые видны лишь в микроскоп. Можно увидеть, что крупинки краски непрерывно движутся. Самые мелкие из них беспорядочно перемещаются с одного места в другое, более крупные лишь беспорядочно колеблются.

Броуновское движение можно наблюдать и в газе. Например, в воздухе его совершают взвешенные там частицы пыли или дыма.

Броуновское движение никогда не прекращается! В капле воды (если не давать ей высохнуть) движение крупинок можно наблюдать в течение многих дней, месяцев, лет. Оно не прекращается ни летом, ни зимой, ни днем, ни ночью. В кусках кварца, пролежавших в земле тысячи лет, попадают иногда капельки воды, замурованные в нем. В этих капельках тоже наблюдали броуновское движение плавающих в воде частиц.

Интенсивность броуновского движения не зависит от химической природы частиц и времени наблюдения и увеличивается с повышением температуры, уменьшением вязкости среды, уменьшением размера частиц.

Броуновское движение служит доказательством существования еще более мелких частиц — молекул жидкости, невидимых даже в самые сильные оптические микроскопы, и объясняется следующим образом. Благодаря случайной неодинаковости чисел ударов молекул жидкости о частицу с разных направлений возникает равнодействующая сила определенного направления. Поскольку подобные флуктуации (**флуктуация** — случайное отклонение физической величины от ее среднего значения) очень кратковременны, то в следующий миг направление равнодействующей поменяется и, следовательно, изменится направление перемещения частицы. Отсюда наблюдающаяся хаотичность броуновского движения, которая отражает хаотичность молекулярного движения.

Открытие броуновского движения имело большое значение для изучения строения вещества. Оно показало, что тела действительно состоят из отдельных частиц — молекул — и что молекулы находятся в непрерывном беспорядочном движении.

Полная теория броуновского движения была дана в 1905–1906 гг. **А. Эйнштейном** (1879–1955) и **М. Смолуховским** (1872–1917) и экспериментально подтверждена **Ж. Перреном** (1870–1942). Выводы теории показали, что среднее значение квадрата смещения $(\Delta s)^2$ броуновской частицы от первоначального положения за определенный промежуток времени Δt пропорционально этому промежутку времени и температуре: $(\Delta s)^2 \sim T \Delta t$. Эксперименты Ж. Перрена, в которых он определял положение одной определенной частицы через каждые 30 с, подтвердили выводы теории. Перрен проводил также опыты по проверке зависимости концентрации молекул газа от высоты и барометрической формулы — зависимости атмосферного давления от высоты. Он предположил, что броуновские частицы, являясь своего рода большими молекулами, должны подчиняться тем же законам, что и молекулы атмосферы, а следовательно, их концентрация с высотой должна падать. Его эксперименты полностью подтвердили теорию и позволили ему определить постоянную Авогадро, значение которой совпало с уже известным.

Таким образом, броуновское движение является самым ярким подтверждением теплового движения молекул — одного из положений молекулярно-кинетической теории [9, 47, 55, 61, 108, 136, 167].

1.8. ДЫМ, ПЫЛЬ, ТУМАН

В газах в броуновском движении могут участвовать как твердые, так и жидкие частички вещества. Соответственно, по агрегатному состоянию и размерам частиц, взвешенных в газе (например, в воздухе), их можно разделить на дым, пыль и туман. Если частицы вещества твердые — мы имеем пыль или дым, если жидкие — имеем туман.

Пыль от дыма отличается размерами частиц. Частицы пыли крупнее: их поперечник от 1 до 0,1 мм. Частицы же дыма бывают поперечником до 0,00001 мм. Такой малости достигают, например, частицы табачного дыма, поперечник которых, следовательно, всего-то в 10 раз крупнее поперечника атома водорода (а объем — в 1 000 раз). Другое отличие дыма от

пыли, вытекающее из указанной неодинаковости размеров частиц, состоит в том, что пылинки оседают на поверхности с ускорением, между тем как частицы дыма или оседают с постоянной скоростью (если диаметр их не меньше 0,001 мм) или же вовсе не оседают (если диаметр их меньше 0,001 мм). В последнем случае скорость броуновского движения этих частиц больше скорости их оседания и, в принципе, их можно считать большими молекулами особого сорта газов.

Пыль — неизменный спутник человека на Земле (см., например, ст. 3.10 на с. 291). К тому же она обладает примечательными теплотехническими свойствами (см. ст. 2.8 на с. 112).

Тем не менее, пыли больше всего в космосе! Последние гипотезы связывают появление космической пыли со взрывом звезд и утверждают, что эта пыль была первым твердым веществом во Вселенной. Химический анализ показал, что в космической пыли очень много углерода (5–10%), и поэтому она действительно могла стать необходимым источником возникновения органической жизни на Земле, построенной на основе углерода. Действительно, даже в настоящее время каждый день на 1 м² нашей планеты в среднем опускается одна космическая пылинка, что в сумме составляет около 100 т в день [11, 95].

1.9. ТЕРМОФОРЕЗ

Если нагретое тело поместить в среду, заполненную каким-либо аэрозолем (взвешенными мелкими частицами), например, дымом или туманом, то вокруг этого тела возникнет слой, свободный от аэрозоля — так называемая **темная зона**. Горячее тело как бы отталкивает от себя частицы аэрозоля. Толщина темной зоны зависит от разности температур тела и среды.

Описанное явление обусловлено так называемыми **термофорезными силами**, возникающими вследствие того, что газовые молекулы у более нагретой стороны частицы сильнее бомбардируют ее, чем у менее нагретой стороны. В результате частице сообщается импульс в направлении убывания

температуры. Величина термофорезных сил пропорциональна квадрату радиуса частицы, скорость же движения частицы под действием этих сил не зависит от ее размера вследствие соответствующего возрастания силы сопротивления среды [49].

1.10. ГАЗ И ГАЗОВЫЕ ЗАКОНЫ

Еще на заре науки было известно, что многие вещества в зависимости от температуры могут существовать в виде газа, жидкости или в твердом состоянии. Наиболее известный пример — вода: достаточно ее охладить и она замерзает, а если подогреть, то превращается в **газ**.

Термин «газ» был введен в науку голландским естествоиспытателем **Я. Б. Гельмонтом** (1579–1644) и в переводе с греческого означает «хаос». Кстати, в России для обозначения газов **М. В. Ломоносов** (1711–1765) употреблял термин «упругие жидкости», но он не прижился.

К первой половине XIX в. были установлены основные опытные закономерности, которым подчиняются газы. К ним относятся:

1) **закон Бойля—Мариотта**: для данной массы газа при постоянной температуре объем его обратно пропорционален давлению:

$$pV = \text{const.}$$

Этот закон был установлен в 1662 г. английским физиком **Р. Бойлем** (1627–1691) и независимо от него в 1676 г. французским физиком **Э. Мариоттом** (1620–1684);

2) **закон Гей-Люссака**: объем данной массы газа при постоянном давлении линейно меняется с температурой:

$$V = \text{const} \cdot T.$$

Закон был сформулирован в 1802 г. французским ученым **Ж. Л. Гей-Люссаком** (1778–1850), хотя сам он считал, что закон был открыт в 1787 г. другим французским ученым **Ж. Шарлем** (1746–1823) (но работа Шарля не была опубликована);

3) **закон Шарля**: давление данной массы газа при постоянном объеме линейно меняется с температурой:

$$p = \text{const} \cdot T.$$

Этот закон был найден французским ученым **Ж. Шарлем** в 1787 г. (но, как уже указывалось, работа не была опубликована), а затем в 1802 г. уточнен **Ж. Л. Гей-Люссаком** (поэтому этот закон иногда называют **вторым законом Гей-Люссака**);

4) **закон Авогадро**: в равных объемах любых газов при одинаковых температурах и давлениях содержится одинаковое число молекул. Закон был сформулирован в 1811 г. итальянским физиком **А. Авогадро** (1776–1856) (см. ст. 1.4). Из закона Авогадро следует, что при одинаковых условиях 1 моль любого газа занимает одинаковый объем. В частности, при нормальных условиях ($T_0 = 273 \text{ К}$, $p_0 = 10^5 \text{ Па}$) молярный объем любого газа равен $V_0 = 22,41 \text{ л}$;

5) **закон Дальтона**: давление смеси газов равно сумме парциальных давлений отдельных газов, составляющих смесь, т. е. тех давлений, которые производил бы каждый газ в отдельности, если бы он был взят при той же температуре в объеме смеси:

$$p_{\text{см}} = p_1 + p_2 + \dots$$

Закон был обнаружен в 1801 г. английским ученым **Д. Дальтоном** (1766–1844).

Необходимо отметить, что вышеперечисленные законы справедливы только для **идеальных газов**, т. е. для газов, в которых можно пренебречь взаимодействиями между молекулами. К счастью для человечества, практически все газы при обычных условиях ведут себя как идеальные.

В 1834 г. французским физиком и инженером **Б. Клапейроном** (1799–1864) путем анализа газовых законов было установлено, что

$$\frac{pV}{T} = \text{const}.$$

Теперь это соотношение называется **уравнением Клапейрона**.

В 1874 г. уравнение Клапейрона было обобщено русским ученым **Д. И. Менделеевым** (1834–1907) для любого произвольного количества газа ν :

$$pV = \nu RT, \quad (1.1)$$

где коэффициент $R = 8,31 \text{ Дж}/(\text{моль} \cdot \text{К})$ — **универсальная газовая постоянная**. Соотношение (1.1) называется **уравнением Клапейрона—Менделеева** или **уравнением состояния идеального газа**.

С развитием молекулярно-кинетической теории стало ясно, что газ — это состояние вещества, характеризующееся очень слабыми связями между составляющими его частицами (молекулами, атомами или ионами), а также их большой подвижностью. Среднее расстояние между молекулами газа составляет сотни и тысячи собственных размеров молекул, поэтому они почти свободно движутся в промежутках между столкновениями друг с другом и со стенками сосуда. Свобода движения молекул позволяет газу заполнять весь предоставленный ему объем — это его главный агрегатный признак.

Во время столкновений скорости молекул меняются как по направлению, так и по величине абсолютно хаотически. Такая хаотичность означает, что у молекул нет выделенного направления движения — все направления являются **равновероятными**. Если бы это было не так, то суммарный импульс газа (складывающийся из импульсов составляющих его молекул), был бы не равен нулю. Это привело бы к тому, что объем газа начал бы самопроизвольно двигаться в направлении преимущественного движения молекул. Однако наш опыт показывает, что такое самопроизвольное движение никогда не наблюдается. Значит, у молекул нет преимущественного направления движения и их суммарный средний импульс равен нулю:

$$\left\langle \sum m_0 \vec{v}_i \right\rangle = \vec{0}. \quad (1.2)$$

Газообразное состояние — самое распространенное состояние вещества Вселенной (межзвездное вещество, туманности, звезды, атмосферы планет и т. д.).

По химическим свойствам газы и их смеси весьма разнообразны — от малоактивных инертных газов до взрывчатых газовых смесей. К газам иногда относят не только системы из атомов и молекул, но и системы из других частиц — фотонов, электронов, броуновских частиц, а также плазму [62, 89, 98, 126, 128, 167, 168, 191].

1.11. ТЕПЛО И ТЕМПЕРАТУРА

Что делает предмет горячим или холодным? В течение многих веков считалось, что тепло — это некая невесомая жидкость **теплород**, содержащаяся во всех предметах окружающего мира, и ее количество определяет степень нагретости предмета — **температуру** (от лат. *temperatura* — правильное смешение, нормальное соотношение). Полагали, что при соприкосновении предметов теплород проникает из горячего предмета в холодный и выравнивает их температуры, подобно жидкости в сообщающихся сосудах. Во многом появление этой теории было обусловлено незнанием атомарного строения вещества. Теория теплорода, объясняя многие наблюдаемые явления, в конце концов стала тормозом для развития науки и техники (см. ст. 2.4 на с. 102).

Лишь в середине XIX в. благодаря становлению молекулярно-кинетической теории вещества стало ясно, что **тепло есть энергия (кинетическая!) хаотического движения молекул и атомов**, а температура — мера этой энергии. При нагревании куска вещества все изменение состоит лишь в том, что его молекулы совершают более быстрые и беспорядочные движения. Отсюда другое название такого движения молекул и атомов — **тепловое**.

Заметьте, мы здесь говорим о кинетической энергии молекул, и именно с ней связано понятие температуры. Кроме кинетической, молекулы имеют еще и потенциальную энергию, так как они взаимодействуют друг с другом. Потенциальная энергия, как известно, зависит от расстояния, поэтому она влияет на взаимное расположение молекул и, в конечном счете, определяет агрегатное состояние вещества; с температурой потенциальная энергия молекул связана опосредованно.

Суммарная кинетическая и потенциальная энергии молекул образует **внутреннюю энергию** тела. В нее не входит кинетическая энергия движения тела как целого. Такое разграничение вполне законно: во внутренней энергии мы учитываем только ту часть движения молекул, суммарный импульс которых равен нулю (см. формулу (1.2) из ст. 1.10). Другая часть связана с одновременным упорядоченным движением молекул, суммарный импульс которого не равен нулю. Во внутреннюю энергию также не входит потенциальная энергия тела как целого во внешнем силовом поле. Опять же, это связано с тем, что внешнее поле сообщает молекулам одинаковое ускорение и заставляет двигаться упорядоченно; взаимодействие же только между молекулами данного тела приводит к хаотическому движению.

Какие же беспорядочные движения могут совершать атомы и молекулы? В твердых телах они колеблются вокруг предписанных им мест, совокупность которых образует упорядоченную структуру — **кристаллическую решетку**. При очень высокой температуре размах колебаний становится сравнимым с расстоянием между соседними атомами и их расположение перестает быть упорядоченным. Это происходит при нагреве твердых тел до температуры плавления. В газах же (например, в воздухе) тепловое движение молекул — это обычное прямолинейное движение, когда каждая молекула перемещается в пространстве хаотическим образом, сталкиваясь с другими молекулами и со стенками сосуда. Чем выше температура, тем быстрее движение.

Например, в холодный день (-18°C) средняя скорость молекул воздуха примерно равна 400 м/с (или 1 440 км/час), а в жаркий день (38°C) — приблизительно 440 м/с (или 1 600 км/час). Таким образом, разница между очень холодным и очень жарким днем дает различие скоростей, равное лишь 10%.

Мы можем заметить указанную выше разницу в скоростях молекул по изменению давления в автомобильных шинах. Действительно, давление воздуха обуславливается ударами его молекул о стенки сосуда. Импульс, который несет каждая молекула, пропорционален ее скорости ($p = mv$). Чис-

ло ударов молекул о стенку зависит от того, как быстро они соударяются, что опять-таки пропорционально их скорости. Так что передаваемый молекулами стенке импульс пропорционален квадрату скорости, а переданный за единицу времени импульс есть не что иное, как сила давления ($\Delta p / \Delta t = F$ по II закону Ньютона). Соответственно уменьшение скорости молекул на 10% вызывает уменьшение импульса на 20%, и поэтому при снижении температуры с $+38^\circ\text{C}$ до -18°C давление в шинах падает на 20%.

Тепловое движение в любом веществе полностью прекращается при -273°C или при 0 К по шкале Кельвина, называемом **абсолютным нулем температуры** (это по классическим представлениям; однако квантовая механика доказывает, что и при 0 К остаются так называемые **нулевые колебания** молекул). При этой температуре все беспорядочное движение молекул прекращается, и ясно, что она является наименьшей возможной температурой [22, 89, 98, 125, 167, 169].

1.12. МОЛЕКУЛЫ И ОХОТА

Из предыдущей статьи видно, что скорости теплового движения молекул в обычных условиях близки к скорости пули (порядка 500 м/с). Возникает следующий вопрос: если скорости молекул такие большие, то почему даже очень чуткое обоняние диких животных не улавливает запаха охотника, если он подкрадывается к ним против ветра?

Молекулы в воздухе, действительно, летают с очень большими скоростями, но из-за многочисленных столкновений между собой — на очень маленькие расстояния. Длина свободного пробега λ (т. е. среднее расстояние, проходимое между двумя столкновениями) молекул воздуха при нормальных условиях менее 0,1 мкм, а у больших органических молекул пахучих веществ (из которых состоят запахи человеческого тела) — еще меньше.

После каждого столкновения молекула меняет направление движения. Теоретически показано, что при таком движении молекула после N столкновений сместится в среднем на расстояние $L \sim \lambda\sqrt{N}$. Если молекула движется со скоростью

v , то за время Δt произойдет $N = v\Delta t/\lambda$ столкновений. Отсюда $L \sim \sqrt{v\lambda\Delta t}$.

Сделаем следующую оценку. Свободно летящая в вакууме молекула азота преодолет $L = 10$ м за время $\Delta t_1 \sim L/v \sim 0,02$ с, а хаотически движущаяся в воздухе молекула азота преодолет то же расстояние за время $\Delta t_2 \sim L^2/(v\lambda) \sim 2 \cdot 10^6$ с ~ 20 суток. Такое распространение молекул в пространстве называется **диффузией**.

В реальности, конечно, благодаря ветру и конвективному движению воздуха запахи распространяются быстрее, и быстрее именно в направлении ветра. Поэтому бывалые охотники подкрадываются к зверю против ветра [144, 167].

1.13. ВЗВЕШИВАНИЕ ГАЗА

Физика утверждает, что молекулы газа находятся в непрерывном хаотическом движении (см. ст. 1.10). Пространство, в котором движутся молекулы, — это пустота (вакуум). Почему же мы тогда уверены, что масса, получаемая при взвешивании газа в каком-нибудь сосуде, равна сумме масс всех его молекул (конечно, за вычетом массы сосуда)? Каким образом весы «чувствуют» молекулы, движущиеся в пустоте?

Тут необходимо вспомнить, что как бы хаотично не двигались молекулы, на них все время действует сила тяжести и сообщает им вертикальное ускорение. Поэтому можно представить, что движение молекул складывается из двух составляющих: хаотической (тепловой) и упорядоченной (вертикальной под действием силы тяжести). Хаотическая составляющая скоростей молекул обуславливает равное давление газа на стенки сосуда и не сообщает ему поступательного движения (см. формулу (1.2) из ст. 1.10). Ясно, что на вес газа могут влиять только те вертикальные составляющие скоростей молекул, которые ими приобретены в результате действия на них силы тяжести. Это дает нам право, рассматривая нашу задачу, отвлечься от хаотического движения молекул и считать его как бы несуществующим. Что же тогда у нас останется?

Тогда мы увидим поток молекул, падающих отвесно вниз под действием силы тяжести, подсакивающих после удара

о дно сосуда и обменивающихся своими скоростями (вернее, импульсами) при взаимных столкновениях. Так как молекулы одинаковые, то обмен скоростями при столкновении равнозначен прохождению одной молекулы сквозь другую. Поэтому мы можем считать, что все молекулы беспрепятственно достигают дна сосуда.

В этой упрощенной картине проследим за какой-нибудь одной молекулой. Достигнув дна, она отражается от него с такой же скоростью и поднимается на ту же высоту, с какой упала. С этой высоты она падает вторично, третий раз и т. д. Если продолжительность падения τ , то в течение произвольного промежутка времени Δt молекула ударится о дно $n = \Delta t / (2\tau)$ раз (2τ потому, что от удара до удара молекула должна сделать два пробега — один вверх, другой вниз, оба — одинаковой продолжительности). Величину τ определяем из формулы $h = g\tau^2/2$, где h — высота падения. Тогда

$$\tau = \sqrt{\frac{2h}{g}} \quad \text{и} \quad n = \frac{\Delta t}{2\tau} = \frac{\Delta t}{2} \sqrt{\frac{g}{2h}}.$$

Скорость, с какой молекула достигает дна сосуда, равна $v = \sqrt{2gh}$. Изменение импульса при каждом единичном ударе равно разности импульсов до и после удара:

$$\Delta(m_0 v) = m_0 v - (-m_0 v) = 2m_0 v,$$

а суммарное изменение импульса при всех n ударах равно

$$\begin{aligned} \sum \Delta(m_0 v) &= n \Delta(m_0 v) = 2m_0 v n = \\ &= 2m_0 \frac{\Delta t}{2} \sqrt{\frac{g}{2h}} \sqrt{2gh} = m_0 g \Delta t. \end{aligned}$$

Согласно второму закону Ньютона изменение импульса в единицу времени определяет силу, с которой молекула действует на дно:

$$F = \frac{\sum \Delta(m_0 v)}{\Delta t} = \frac{m_0 g \Delta t}{\Delta t} = m_0 g.$$

Следовательно, сила удара F молекулы о дно равна весу молекулы $m_0 g$. Ясно, что если каждая молекула ударяет с силой

своего веса и все заключающиеся в сосуде молекулы долетают до дна, то дну сосуда передается суммарный вес всех молекул газа.

Вопрос о передаче веса был нами поставлен для газов. Но в сущности его можно повторить также для тел твердых и жидких: все тела состоят из хаотически движущихся молекул, которые между собою не соприкасаются. Условия, как видим, принципиально те же, что и для газов [95].

1.14. ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЙ МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ

Как уже указывалось в ст. 1.11, температура является мерой средней кинетической энергии хаотического движения молекул. Однако такое правильное понимание температуры не указывает нам практических путей ее измерения, так как в реальности невозможно определить среднюю кинетическую энергию огромного числа молекул. Поэтому единственным способом измерения температуры остается ее определение через эмпирические (опытные) закономерности.

Опыт показывает, что если два тела, имеющие разную степень нагретости, привести в соприкосновение друг с другом, то горячее тело будет охлаждаться, а холодное — нагреваться за счет передачи тепловой энергии до тех пор, пока между ними не установится так называемое **тепловое равновесие**, при этом **температуры обоих тел считаются равными**. Понятие теплового равновесия лежит в основе построения прибора для измерения температуры — **термометра**. Из вышесказанного понятно, что для того, чтобы измерить температуру какого-нибудь тела, необходимо термометр привести в контакт с этим телом и подождать, пока не установится тепловое равновесие и, соответственно, у них не выровняются температуры. Индикатором же температуры у термометра может являться какое-либо его физическое свойство, т.к. практически все свойства тел зависят от температуры. Например, при нагревании тел их объемы увеличиваются; электрическое сопротивление у металлов возрастает, а у полупроводников — убывает, и т.д. Серьезным требованием к физической величине — индикатору

тору температуры — является требование линейной зависимости этой величины от температуры (иначе температурная шкала окажется нелинейной и, соответственно, неудобной). Другим серьезным требованием, но уже к самому термометру, при таком способе измерения является требование его малости, чтобы при установлении теплового равновесия он как можно меньше возмущал (т.е. изменял) температуру самого измеряемого тела.

Для градуировки шкалы термометра пользуются физическими явлениями, которые происходят всегда при одной и той же степени нагретости (т.е. температуре): плавление различных веществ, кипение жидкостей и т.д. Такие физические явления и условно приписанные им температуры называются **репёрными**. Тогда практические шаги для градуирования шкалы термометра будут выглядеть следующим образом.

Создаются условия, при которых будет осуществляться первое репёрное явление с условно приписанным значением температуры T_1 . Во время протекания этого явления термометр находится в тепловом контакте с телами, участвующими в этом явлении, следовательно, его температура будет соответствовать температуре протекания явления. На шкале термометра делают отметку A_1 по значению физической величины, служащей индикатором температуры (например, отмечают высоту столба жидкости в капилляре, если в качестве индикатора выбран объем некоторой жидкости). После этого осуществляется второе репёрное явление, которому приписана температура T_2 , а на шкале делается отметка A_2 . Если разность $T_2 - T_1$ равна N , то и расстояние на шкале между отметками A_1 и A_2 делится на N частей. Таким образом, одно деление образовавшейся шкалы будет эквивалентно единице измерения температуры — **градусу** (от лат. *gradus* — шаг). Для измерения температур, не входящих в интервал $[T_1; T_2]$, шкала экстраполируется за пределы $[A_1; A_2]$.

Приведенная выше методика использована во многих температурных шкалах, предложенных в истории физики в разное время (см. следующую статью).

Недостатком температурных шкал, построенных по рассмотренной выше методике, является то, что репёрные

явления, используемые для градуировки температурной шкалы, зависят не только от степени нагретости (т.е. от температуры), но и от других параметров. Например, замерзание и кипение воды зависят еще от давления, ее чистоты и т.д. На практике очень трудно соблюдать постоянство этих условий, поэтому это вносит определенную погрешность. Дело усугубляется еще тем, что берутся два реперных явления — каждое со своими погрешностями.

Чтобы свести к минимуму эти погрешности, можно отказаться от одного реперного явления и построить температурную шкалу с одним репером. В этом случае единственному реперному явлению присваивается некоторая фиксированная температура и условно считается, что при нуле градусов по этой шкале значение индикатора температуры тоже равно нулю.

Именно так обстоит дело в стандартизированной **абсолютной температурной шкале** или **шкале Кельвина** — в честь английского физика **лорда Кельвина (У. Томсона)**, предложившего в 1848 г. принцип построения такой шкалы на основе второго начала термодинамики (см. ст. 2.12 на с. 116). Единицей измерения абсолютной шкалы является **кельвин** (одна из основных единиц СИ). В качестве репера для этой шкалы выбрано явление, которое очень мало зависит от посторонних факторов и воспроизводится при данных условиях однозначно, — это **тройная точка воды**, которой присвоено значение 273,16 К. Величина температуры, выраженная по шкале Кельвина, имеет всегда положительные значения. Так как температура является мерой кинетической энергии движения молекул, то в факте положительности абсолютной температуры имеется глубокий **физический смысл** — кинетическая энергия не может быть отрицательной [89, 98, 125, 126].

1.15. ТЕМПЕРАТУРНЫЕ ШКАЛЫ

Изобретение первого термометра обычно приписывается итальянскому физiku, механику и астроному **Галилео Галилею** (1564–1642). Его термометр представлял собой обычную стеклянную колбу с длинной трубкой, опущенной этой труб-

кой вниз в воду. При повышении температуры воздух, находившийся в колбе, расширялся и заставлял воду в трубке опускаться вниз, а при охлаждении — наоборот, вода поднималась по трубке. Это был очень несовершенный термометр — на его показания влияло не только изменение температуры, но и атмосферное давление; кроме того, он не имел нулевого деления и градусы были совершенно произвольными, поэтому показания различных термометров были разные.

Первой термометрической шкалой, где использовался репёр, была шкала термометра бургомистра г. Магдебург **Отто фон Герике** (1602–1686). Этот термометр представлял собой U-образную трубку, в которую был налит спирт. На одном колене U-образной трубки был закреплен медный шар, а на поверхности спирта в другом колене плавал поплавочек. От поплавка шла нитка, перекинутая через блок. На другом конце нитки была подвешена фигурка ангела, державшего в руке палочку, которой указывалось деление шкалы, нарисованной на стене дома. За нуль шкалы (репёр) Герике выбрал температуру того осеннего дня 1660 г., когда был первый заморозок в г. Магдебург.

В 1742 г. шведским физиком и астрономом **А. Цельсием** (1701–1744) была предложена температурная шкала для термометров, в которой в качестве репёрных явлений использовались замерзание и кипение воды при нормальном давлении и которым были присвоены значения температуры 0 и 100 соответственно. (Изначально Цельсий за 100 принял температуру таяния льда, а за 0 — температуру кипения воды. И лишь позднее шведский естествоиспытатель и врач **К. Линней** (1707–1778) «перевернул» эту шкалу.) Согласно современному определению, градус Цельсия ($^{\circ}\text{C}$) по величине равен одному кельвину (K), а нуль шкалы Цельсия установлен таким образом, что температура тройной точки воды равна $0,01^{\circ}\text{C}$. В итоге шкалы Цельсия и Кельвина сдвинуты на 273,15 единиц:

$$t^{\circ}\text{C} = T - 273,15.$$

В силу простоты и легкости воспроизведения репёрных явлений в лабораторных условиях температурная шкала

Цельсия получила широкое распространение и не утратила своей практической ценности и в настоящее время.

В температурной шкале, предложенной в 1724 г. немецким ученым **Д. Г. Фаренгейтом** (1686–1736), точке замерзания воды соответствует температура 32°F , а точке ее кипения — 212°F . Такие «некруглые» значения у шкалы Фаренгейта из-за того, что репёрные явления Фаренгейтом были выбраны достаточно вольно.

За нуль температуры он выбрал степень холода зимы 1709 г. в Западной Европе, которая отличалась исключительной суровостью, — таких сильных и продолжительных морозов не было там почти целое столетие. Фаренгейт предполагал, что это крайняя степень холода в природе и, соответственно, при измерении с помощью его температурной шкалы отрицательных значений быть не должно. Для воспроизведения этой репёрной температуры он подобрал соответствующую охлаждающую смесь, состоящую из льда, поваренной соли и нашатыря в определенной пропорции.

В качестве второй репёрной точки Фаренгейт по примеру ряда своих предшественников (в том числе и Ньютона) избрал нормальную температуру человеческого тела. В ту эпоху было распространено убеждение, будто температура воздуха никогда не поднимается выше температуры крови человека, и такое нагревание воздуха считалось для человека смертельным (совершенно ошибочное мнение). Этому второму репёру Фаренгейт первоначально присвоил значение 24 (чтобы число градусов равнялось числу часов в сутках). Но когда практика показала, что такие градусы слишком крупны, Фаренгейт разделил их еще на четыре части и температура человеческого тела оказалась обозначенной числом $24 \cdot 4 = 96$. Этим определилась окончательно величина деления, соответствующая одному градусу Фаренгейта. Заметим, что градус Фаренгейта ($^{\circ}\text{F}$) по величине не равен кельвину (К) и, соответственно, градусу Цельсия ($^{\circ}\text{C}$). Для перевода температуры из шкалы Фаренгейта в шкалу Цельсия служит формула

$$t^{\circ}\text{C} = \frac{5}{9}(t^{\circ}\text{F} - 32).$$

Нулю градусов по шкале Фаренгейта соответствует $-17,8^{\circ}$ по шкале Цельсия.

Шкала Фаренгейта и поныне традиционно используется в некоторых странах, например, в Англии и США.

В России, Франции и Германии вплоть до 1930-х г. широкое распространение имела температурная шкала, предложенная в 1730 г. французским ученым **Р. А. Реомюром** (1683–1757). В шкале Реомюра точке замерзания воды, как и в шкале Цельсия, соответствует температура 0°R , а точке кипения воды — температура 80°R . Значение 80 для температуры кипения Реомюр выбрал из-за того, что между двумя рассматриваемыми реперными точками вода расширяется приблизительно на 80/1000 (т. е. на 8%) своего первоначального объема. Для перевода температуры из шкалы Реомюра в шкалу Цельсия служит формула

$$t^{\circ}\text{C} = 1,25t^{\circ}\text{R}.$$

Шкала Реомюра дольше всего сохранялась во Франции, на родине автора, но в настоящее время практически вышла из употребления.

Кстати, слово «термометр» (от греч. *терме* — теплота и *метреин* — измерять) в русскую речь был введен великим русским ученым **М. В. Ломоносовым** (1711–1765). Сам же он в своих исследованиях пользовался термометром, на шкале которого нулю соответствовала точка таяния льда, а 150° — точка кипения воды [9, 66, 89, 95, 98, 125, 126, 169, 185, 191].

1.16. ВОЗДУШНЫЙ ТЕРМОСКОП

Расширение газа при нагревании при неизменном давлении (закон Гей-Люссака) можно использовать для создания простейшего индикатора изменения температуры. Такие приборы называются **термоскопами**.

Возьмите полуторалитровую пластиковую бутылку из-под минеральной воды с достаточно жесткими стенками (можно использовать и стеклянную посуду с тонкими стенками, например, лабораторную колбу). Также нам понадобится тонкая

стеклянная трубка с длиной не меньшей, чем высота бутылки. В бутылочной пробке сделайте отверстие под диаметр трубки и закрепите в ней трубку так, чтобы после закручивания пробки трубка чуть-чуть не доходила до дна бутылки (рис. 1.2). Соединение трубки с пробкой необходимо загерметизировать (например, пластилином).



Рис. 1.2

Теперь налейте в бутылку на одну треть воды, капните немного красителя (например, чернила), а также бросьте туда немного льда (или снега). Когда лед начнет таять, то температура воды, а также воздуха в бутылке станет равной 0°C . В этот момент надо наглухо закрыть бутылку пробкой. Когда лед растает и воздух в бутылке нагреется до температуры окружающей среды, то за счет повышения давления он выдавит определенное количество воды из бутылки — подкрашенная вода поднимется по трубке. Термоскоп готов.

Если вы думаете, что такой термоскоп очень грубый, то зря: даже приближение руки к бутылке и небольшие колебания комнатной температуры оказывают влияние на высоту столбика воды. Чтобы не быть голословными, проведем прикидочный расчет.

Зависимость изменения объема газа от температуры при постоянном давлении определяется **законом Гей-Люссака** (см. ст. 1.10 на с. 24). Из этого закона следует, что

$$\frac{V_0}{T_0} = \frac{V}{T},$$

где V_0 , V — объемы газа при температурах T_0 и T соответственно. Если принять $T_0 = 273,15\text{ К}$ (т.е. 0°C по шкале Цельсия), то, выражая температуры в градусах Цельсия, получим

$$V = V_0 \left(1 + \frac{\Delta t}{273,15} \right) = V_0 (1 + \beta \Delta t), \quad (1.3)$$

где $\beta = 1/273,15\text{ град}^{-1}$ — коэффициент объемного расширения газа (одинаковый для всех газов, которые можно считать

идеальными)*. Из формулы (1.3) следует, что

$$\Delta t = \frac{V - V_0}{\beta V_0} = \frac{1}{\beta} \frac{\Delta V}{V_0}. \quad (1.4)$$

Объем воздуха в бутылке (за вычетом объема воды) равен $V_0 = 1 \text{ л} = 1000 \text{ см}^3 = 10^6 \text{ мм}^3$. Будем считать, что положение уровня воды в трубке можно определить с точностью до $\Delta h = 1 \text{ мм}$. Если принять, что радиус трубки равен $r = 1 \text{ мм}$, то площадь ее отверстия равна $S = \pi r^2 \approx 3 \text{ мм}^2$. Следовательно, мы можем обнаружить изменение объема воздуха в бутылке на $\Delta V = S \Delta h \approx 3 \text{ мм}^3$. Подставив эти значения в формулу (1.4), получим

$$\Delta t \approx 273,15 \cdot \frac{3}{10^6} \approx 8,2 \cdot 10^{-4} \text{ }^\circ\text{С}.$$

Другими словами, мы можем обнаружить изменение температуры на $8,2 \cdot 10^{-4} \text{ }^\circ\text{С}$. Где вы еще найдете термометр с такой чувствительностью и точностью?!

У некоторых может появиться соблазн сделать из него настоящий термометр — ведь для этого достаточно прикрепить к трубке шкалу и разметить ее (например, сравнив с показаниями промышленного термометра). Но если сделать это, окажется, что воздушный термометр даже при одной и той же температуре в разные дни будет давать разные показания. Дело в том, что высота водяного столба в трубке также чутко реагирует и на атмосферное давление, которое достаточно изменчиво. Так что полученный термоскоп годится только для индикации изменения температуры [51, 126, 135].

1.17. ТЕПЛОВОЕ ДВИЖЕНИЕ ПРИ СВЕРХНИЗКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ

При решении задач по молекулярной физике для перевода температуры из градусов Цельсия в градусы Кельвина студенты, как правило, пользуются упрощенной формулой $T = t \text{ }^\circ\text{С} + 273$, хотя точная формула должна иметь вид $T = t \text{ }^\circ\text{С} + 273,15$. Отсюда у них предвзятое представление, что

* Именно в таком виде и получил первоначально свой газовый закон Ж. Л. Гей-Люссак.

при -273°C (т.е., по их мнению, при абсолютном нуле) всякое движение молекул прекращается (см. ст. 1.11). Это мнение основывается на ошибочном допущении, что при таких низких температурах молекулы едва движутся, и разница в 0,15 градусов картины не меняет.

Однако такое представление по крайней мере ошибочно, и именно из-за разницы в 0,15 градусов — температура абсолютного нуля не -273 , а $-273,15^{\circ}\text{C}$. Дело в том, что скорости молекул убывают пропорционально корню квадратному из температуры по шкале Кельвина; например, для среднеквадратичной скорости

$$\langle v_{\text{кв}} \rangle = \sqrt{\frac{3RT}{\mu}}. \quad (1.5)$$

Поэтому даже при весьма низких температурах молекулы движутся еще довольно быстро.

Сделаем сравнительные расчеты с помощью формулы (1.5), например, для водорода. Для температуры 0°C (т.е. $273,15\text{ K}$) получаем среднеквадратичную скорость 1845 м/с , а для -270°C (т.е. $3,15\text{ K}$) расчет дает значение $198\text{ м/с} = 712\text{ км/ч}$. Оказывается, молекулы в столь холодном газе мчатся наравне с реактивными самолетами! Даже при температуре всего $0,25\text{ K}$ скорость движения молекул водорода еще довольно высока — около 56 м/с , т.е. более 200 км/ч . При температуре же -273°C , т.е. при $0,15\text{ K}$, скорость молекул равна 35 м/с , что составляет около 125 км/ч . Такую скорость никак нельзя считать ничтожной, близкой к состоянию покоя [95].

1.18. ТАКОЙ ГОРЯЧИЙ ХОЛОДНЫЙ КОСМОС

Говорят, что межпланетная среда, в которой находится наша Земля, имеет температуру около $1\,500\,000^{\circ}\text{C}$. Может ли такое быть — ведь именно в этой среде летают космические корабли, выходят «погулять» космонавты и, как известно, не сгорают? Как с этим согласуется утверждение о космическом холоде, о том, что в тени там царят стоградусные морозы? И еще: если в межпланетном пространстве действительно такая

высокая температура, то как ее измерить? Ведь от такой температуры не то что расплавится, а мгновенно испарится любой термометр.

Действительно, температура солнечной короны, которая простирается на расстояние в несколько десятков радиусов Солнца и в которую попадает Земля, 1 000 000–2 000 000 градусов (тут уж безразлично, по какой шкале — Цельсия или Кельвина, так как разница в 273 °С здесь несущественна, хотя правильнее измерять термодинамическую температуру в кельвинах). Эта корона состоит из высокоионизированной плазмы — «солнечного ветра», т. е. заряженных частиц, несущихся (на уровне орбиты Земли) со скоростями где-то около 400 км/с — намного быстрее, чем молекулы при комнатной температуре (порядка 400 м/с). Согласно молекулярно-кинетической теории температура прямо пропорциональна средней кинетической энергии частиц. При скоростях в несколько сотен километров в секунду значение температуры как раз и составляет 1 000 000–2 000 000 градусов.

При этом число этих частиц всего несколько десятков в 1 см³ (сравните со значением $2,9 \cdot 10^{19}$ для обычного воздуха). Из-за чрезвычайно малой концентрации частиц нагреть, а тем более расплавить или испарить космические корабли солнечная корона не может; не в состоянии она по той же причине и сколько-нибудь существенно поднять температуру тел в космосе. Луна, например, имеет на теневой стороне температуру всего –150 °С (на солнечной стороне Луна нагревается излучением).

Другое дело, температура внутри звезд — температура термоядерных реакций. Например, в недрах Солнца она достигает рекордного значения 50 000 000 градусов (тоже несущественно — Цельсия или Кельвина). Здесь плотность вещества и, соответственно, концентрация частиц настолько высока, что никакой материал этой температуры не выдержит. О том, что такое температура в 50 000 000 градусов, можно до некоторой степени судить из следующего сравнения: если бы такая температура поддерживалась в булавочной головке, то все живое на расстоянии 1 500 км было бы уничтожено.

А измеряют температуру межпланетной среды, конечно же, не термометрами, которые эта среда практически не нагреет опять-таки из-за ничтожной концентрации, а косвенными методами, например, по скорости движения частиц, которую можно измерить достаточно точно [43, 70, 103, 105, 137].

1.19. САМЫЕ НИЗКИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ

Самая низкая из природных температур, зарегистрированных на Земле за всю историю метеорологических наблюдений, — это $-82,9^{\circ}\text{C}$ на станции «Восток» в Антарктиде. Она была зафиксирована в 1983 г. Тем не менее **полюсом холода** нашей планеты считается район Верхоянска—Оймякона в Якутии, где в 1885 г. наблюдалась температура $-67,8^{\circ}\text{C}$ и в 1933 г. — температура $-67,7^{\circ}\text{C}$. Связано это с тем, что станция «Восток» в Антарктиде находится на высоте 3488 м над уровнем моря, а с увеличением высоты температура понижается в среднем на $6,5$ градусов на каждый километр (см. ст. 2.67 на с. 243). Таким образом, для чистоты сравнения от антарктической температуры необходимо отнять как минимум $22,5$ градусов, что делает температуру $-67,8^{\circ}\text{C}$ Верхоянска—Оймякона бесспорным лидером.

Самой низкой температурой в Солнечной системе является -235°C , измеренная в 1989 г. космическим аппаратом «Вояджер II» на поверхности Тритона (одного из двух спутников планеты Нептун).

В глубоком космосе (за пределами Солнечной системы) температура практически не опускается ниже -245°C . Единственное известное исключение составляет туманность Бумеранга, открытая австралийскими астрономами в 1979 г. В самом центре туманности находится умирающая звезда, масса которой в 3 раза превышает массу нашего Солнца. В последние 1500 лет туманность Бумеранга испускает газ со скоростью $500\,000$ км/ч, который в открытом космосе адиабатически (т. е. без теплообмена) расширяется и, соответственно, охлаждается до -271°C , что является самой низкой из официально зарегистрированных в природе естественных температур.

Еще более низкие температуры достигнуты в лабораторных условиях. Например, температуру жидкого гелия удалось довести почти до -273°C , что лишь на 0,15 градусов не достигает абсолютного нуля. А в 2000 г. группа ученых из Хельсинкского технологического университета охладила кусок родия до температуры, которая лишь на десять миллиардных градуса выше абсолютного нуля.

Исследования в области низких температур необычайно важны для изучения сверхпроводников — материалов, которые имеют нулевое электрическое сопротивление, но при этом (по крайней мере, до настоящего времени) работают лишь при очень низких температурах. Если бы человечество смогло обуздать сверхпроводники, они полностью изменили бы энергетику нашей цивилизации [5, 148].

1.20. ИСТЕЧЕНИЕ ГАЗА В ПУСТОТУ

В емкость, из которой откачан воздух, помещен закрытый баллон с газом, давление которого нормальное ($p_0 = 10^5 \text{ Па} = 1 \text{ атм}$). Температура окружающей среды тоже равна нормальной ($T_0 = 273 \text{ К}$). Как мы знаем из предыдущих статей, при таких условиях скорости молекул газов порядка 400 м/с. Если теперь кран баллона открыть, то газ устремится в окружающую пустоту тоже со скоростью 400 м/с. Отсюда вопрос: какова была бы скорость вытекания, если бы первоначальное давление газа в баллоне равнялось 4 атм?

Очевидный ответ состоит в том, что газ, сжатый вчетверо сильнее, должен вытекать заметно быстрее. Однако это неправильный ответ, и скорость истечения газа в пустоту почти не зависит от давления, под которым он находится. Этот физический парадокс объясняется тем, что плотность газа прямо пропорциональна давлению: $\rho = \mu p / (RT)$. Поэтому в случае сжатого газа более сильный его напор (т. е. давление) в точности компенсируется большей его плотностью. Другими словами, масса газа, приводимого в движение, возрастает с повышением давления во столько же раз, во сколько раз увеличивается напор. А из второго закона Ньютона известно, что ускорение, приобретаемое телом, прямо пропорционально силе и обратно

пропорционально массе: $a = F/m$. Поэтому ускорение (и обусловленная им скорость) вытекания газа не должно зависеть от его давления [95, 150].

1.21. ВЕС ВДОХА

Человек дышит с помощью легких. Воздух попадает в легкие через носовую полость, гортань, трахею и два бронха, подводящие воздух к правому и левому легкому. Каждый бронх может претерпевать 15 и более разветвлений, дробясь на более мелкие бронхи — бронхиолы, прежде чем закончиться микроскопическими мешочками — альвеолами, окруженными густой сетью кровеносных сосудов. Альвеолы, которых у взрослого человека насчитывается около 300 миллионов, представляют собой пузырьки, наполненные воздухом. Средний диаметр альвеол — примерно 0,1 мм, а толщина их стенок — 0,4 мкм. Общая поверхность альвеол в легких человека составляет около 90 м²! В каждый момент времени в кровеносных сосудах, оплетающих альвеолы, находится приблизительно 70 мл крови, из которой в альвеолы диффундирует углекислый газ, а в обратном направлении — кислород. Такая огромная поверхность альвеол дает возможность уменьшить толщину слоя крови, обменивающейся газами с внутриальвеолярным воздухом, до 1 мкм, что позволяет менее чем за 1 с насытить это количество крови кислородом и освободить ее от избытка углекислоты.

Следует отметить, что у человека в дыхании принимают участие не только легкие, но и вся поверхность тела — кожа от пяток до головы. Особенно усиленно дышит кожа на груди, спине и животе. Интересно, что по интенсивности дыхания эти участки кожи значительно превосходят легкие. Так, например, с единицы поверхности такой кожи может поглощаться на 28% больше кислорода, а выделяться на 54% больше углекислого газа, чем в легких. Однако доля участия кожи в дыхании у человека ничтожна по сравнению с легкими: ведь общая поверхность тела составляет у него менее 2 м² и не превышает 3% суммарной поверхности легочных альвеол.

Воздух сам по себе, конечно, не будет втягиваться прямо в легкие. Для того, чтобы воздух втянулся, легкие должны расшириться. При этом образуется разрежение, в которое и устремляется наружный воздух. Для того, чтобы легкие расширились, необходимо, чтобы начала двигаться и растянулась диафрагма — мышечная перегородка между брюшной и грудной полостью. Диафрагма, хоть и не является составной частью дыхательной системы, в процессе дыхания играет одну из важнейших ролей. Как любая мышца, она имеет способность сокращаться и растягиваться. Расширяясь и растягиваясь, диафрагма приводит в движение грудную клетку, которая в свою очередь растягивает легкие, и в них начинает поступать воздух. Затем диафрагма сокращается, грудная клетка и легкие также уменьшают свои размеры — воздух вытесняется наружу. Так происходит вдох и выдох.

Так как альвеолы — наиболее эластичная часть легкого, практически все изменения объема легких при вдохе и выдохе происходят за счет соответствующих изменений объема альвеол. При вдохе альвеолы расширяются, а при выдохе сжимаются. Около 15 000 раз в день мы растягиваем альвеолы наших легких, совершая при этом механическую работу, составляющую от 2 до 25% всех наших энергетических затрат.

При каждом вдохе взрослый человек вводит в свои легкие примерно 0,5 л воздуха. В среднем в минуту мы делаем 18 вдохов. Значит, за одну минуту в нашем теле успевает побывать 9 л воздуха. Это составляет в час 540 л. Округлив это значение до 500 л, т. е. до $0,5 \text{ м}^3$, получаем, что за сутки человек вдыхает не менее 12 м^3 воздуха. Такой объем воздуха при средней его плотности $1,2 \text{ г/см}^3$ весит где-то 14 кг. Таким образом, за одни сутки человек перерабатывает гораздо больше воздуха, чем пищи: никто в сутки не съедает и 3 кг еды [12, 97, 105, 106, 114].

1.22. КАК ОТКРЫВАЛИ АТМОСФЕРУ

Еще великий древнегреческий философ **Аристотель** (384–322 до н. э.) подозревал, что воздух есть тело «весомое». Желая проверить это, ученый взвешивал бурдюки — пустой и

заполненный воздухом. Из-за низкой точности измерений он не смог определить разницу в весе и Аристотель посчитал, что бурдюки весят одинаково. И на тысячи лет воздух было принято считать невесомым.

После Аристотеля первое упоминание о весе и давлении воздуха датируется 1630 годом (хотя наверняка были и другие исследования, оставшиеся «за бортом» истории). В том году французский врач **Жан Рей** (1583–1645) опубликовал статью, где было сказано: «Наполните воздухом баллон при большом давлении ... и вы увидите, что он будет весить больше, чем пустой». Другим человеком, кто выступил в том же году (в письме к Галилео Галилею) с утверждением о существовании атмосферного давления, был итальянский ученый **Д. Бальяни** (1582–1666).

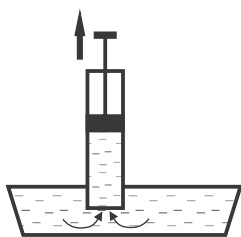


Рис. 1.3

В 1640 г. великий герцог Тосканский (Италия) задумал на террасе своего дворца устроить фонтан и приказал провести для этого воду из соседнего озера при помощи всасывающего насоса. Но флорентийские мастера, которым поручили это дело, убедились, что поднять воду всасывающим насосом выше, чем на 9,75 м, невозможно. Всасывание воды в то время

приписывали «страху» природы перед пустотой: чтобы не возникало пустоты, вода и следует вверх за поршнем в насосе (рис. 1.3). Но почему же природа боится пустоты лишь до высоты 9,75 м, а затем уже нет?

Возмущенный герцог обратился к известному, но уже престарелому 76-летнему **Галилео Галилею** (1564–1642). Галилей осмотрел насосы и убедился, что они превосходны. Тогда Галилей (вслед за Д. Б. Бальяни) и подумал о давлении воздуха, но закончить исследования не успел.

Окончательно решил вопрос о давлении атмосферы ученик Галилея — итальянец **Э. Торричелли** (1608–1647). В 1643 г. по поручению Торричелли его ученик **В. Вивiani** (1622–1703) провел следующий опыт. Стекланную трубку длиной около 1 м, запаянную с одного конца, наполняли ртутью.

Затем, плотно закрыв незапаянный конец трубки, ее переворачивали, опускали в чашу с ртутью и вновь открывали незапаянный конец (рис. 1.4). Часть ртути при этом выливалась в чашку, но в трубке оставался столб ртути высотой около 760 мм. В трубке же над ртутью было безвоздушное пространство. Чтобы доказать, что пространство над ртутью остается пустым, Торричелли впускал в него воду, которая врывалась в это пространство «со страшным напором» и целиком его заполняла. Таким образом, Торричелли отверг господствовавшее до того времени объяснение, согласно которому вода заполняет всасывающий трубопровод насосной установки, потому что «природа боится пустоты». Безвоздушное пространство над свободной поверхностью жидкости в закрытом сверху резервуаре называют с тех пор **торричеллиевой пустотой**.

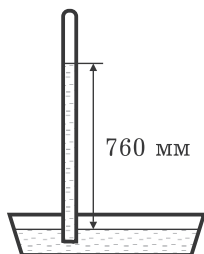


Рис. 1.4

Торричелли объяснил этот опыт так. Атмосфера давит на поверхность ртути в чашке, при этом ртуть находится в равновесии. Значит, по закону Паскаля давление в трубке на уровне ртути в чашке тоже равно атмосферному давлению. Но в верхней части трубки воздуха нет, поэтому давление в трубке на том же уровне и создается только весом столба ртути в трубке. Отсюда следует, что атмосферное давление равно давлению столба ртути в трубке. Измерив высоту h столба ртути в опыте Торричелли, можно рассчитать давление, которое он производит, — оно и будет равно атмосферному давлению: $p_{\text{атм}} = \rho gh$, где ρ — плотность ртути.

Чем больше атмосферное давление, тем выше столб ртути в опыте Торричелли, поэтому на практике часто измеряют атмосферное давление высотой ртутного столба в миллиметрах или сантиметрах. Если, например, давление атмосферы равно 760 мм рт.ст., то значит, что воздух производит такое же давление, какое производит вертикальный столб ртути высотой 760 мм.

Наблюдая день за днем за высотой ртутного столба в трубке, Торричелли обнаружил, что эта высота меняется: то

увеличивается, то уменьшается. Отсюда он заключил, что атмосферное давление не постоянно. Торричелли заметил также, что изменения атмосферного давления связаны с изменением погоды. Прикрепив к трубке со ртутью вертикальную шкалу, Торричелли получил простейший **ртутный барометр** (от греч. *барос* — тяжесть и *метрео* — измеряю) для измерения атмосферного давления.

В 1646 г. французский ученый **Блез Паскаль** (1623–1662) повторил опыт Торричелли, но уже с очень высокой трубкой, опущенной в емкость с водой. Трубка была высотой 14 м, а вода остановилась на высоте 9,75 м. Таким образом, Паскаль доказал, что столб воздуха атмосферы весит примерно столько же, сколько 10 м воды. Поэтому никакой всасывающий насос воду выше этой отметки поднять не сможет (нужны другие насосы — например, нагнетающего действия).

В 1654 г. бургомистр города Магдебурга **Отто фон Герике** (1602–1686) провел опыт со знаменитыми **магдебургскими полушариями**. При соединении эти полушария образовывали сферу диаметром 65 см, из которой насосом выкачивался воздух. Внешнее атмосферное давление так сжимало полушария, что их не могли растащить даже восемь пар лошадей.

Первым, кто понял, что воздух является смесью газов, был французский химик **Антуан Лоран Лавуазье** (1743–1794). В 1770-х гг. он, экспериментируя со ртутью, обнаружил, что 78% воздуха превращается в какой-то газ, количество которого при дальнейшем нагревании остается неизменным. Свеча в этом газе не горела, мышь погибала. Тогда Лавуазье решил, что воздух состоит из двух газов. Той части воздуха (78%), которая не поддерживает горение, он дал название «азот», что в переводе с греческого означает «нет жизни». Ту часть воздуха (21%), которая вступает в реакцию с ртутью и обеспечивает жизнь и горение, он назвал кислородом. Примечательно, что оба газа были уже открыты в предыдущее десятилетие: азот — в 1772 г. шотландским химиком **Даниелем Резерфордом** (1749–1819), кислород — в 1774 г. английским священником **Джозефом Пристли** (1733–1804).

Такими состав атмосферного воздуха и давление были не всегда — известно, что содержание кислорода в атмосфере

миллионы лет назад составляло 28% (вместо нынешнего 21%), а атмосферное давление превышало современное в 8–9 раз. Это удалось установить путем анализа маленьких пузырьков воздуха, запертых в кусочках янтаря во время его геологического формирования.

Кстати, распространено мнение, что третьей составляющей воздуха по количественному содержанию после азота и кислорода идет углекислый газ. Между тем это не так — по содержанию за азотом и кислородом должен идти один из благородных газов — аргон. Объемное содержание углекислого газа в воздухе составляет всего лишь 0,03%, а аргона — 0,94%.

Такова история открытия атмосферы. Сейчас уже каждый знает, что нормальное атмосферное давление на поверхности Земли равно примерно 101,3 кПа. Атмосфера удерживается земным тяготением и с высотой плотность воздуха уменьшается, поэтому верхняя граница атмосферы размыта (см. ст. 1.24) [5, 39, 43, 62, 63, 67, 74, 95, 98, 118, 167, 168].

1.23. ИСПОРЧЕННЫЙ РТУТНЫЙ БАРОМЕТР

Для нормального ртутного барометра считается, что в «торричеллиевой пустоте» воздуха нет (см. предыдущую статью). Но это всего лишь упрощение — на самом деле в ней обязательно будут насыщенные пары ртути. Однако при обычных условиях давление паров ртути пренебрежимо мало, поэтому его не принимают во внимание. Иное дело, если в «торричеллиеву пустоту» попадает воздух — давление воздуха над ртутью уже нельзя не учитывать. Тем не менее, это вовсе не значит, что такой барометр не пригоден для измерения атмосферного давления. Достаточно один раз измерить высоту столба ртути в нем при известном атмосферном давлении и температуре, чтобы раз и навсегда получить формулу для определения истинного атмосферного давления по его показаниям.

Действительно, пусть при некотором известном атмосферном давлении $p_{\text{атм}}^0$ и температуре T_0 высота ртутного столба равна H_0 . Это означает, что атмосферному давлению $p_{\text{атм}}^0$

противостоит сумма давлений воздуха в трубке над ртутью p_0 и столба ртути высотой H_0 . Если измерять давление воздуха, как и гидростатическое давление, прямо в мм рт. ст., то

$$p_{\text{атм}}^0 = p_0 + H_0. \quad (1.6)$$

Точно такое же соотношение можно написать и для другого (неизвестного) атмосферного давления $p_{\text{атм}}$ при другой температуре T в случае, когда показание испорченного барометра равно H :

$$p_{\text{атм}} = p + H, \quad (1.7)$$

где p — давление воздуха в трубке над ртутным столбом высотой H . Теперь, считая воздух в трубке идеальным газом, можно воспользоваться уравнением его состояния для двух случаев:

$$p_0 V_0 = \nu R T_0, \quad p V = \nu R T.$$

Так как количество ν попавшего в трубку воздуха не меняется, а сечение трубки одинаково по всей ее длине, то

$$\frac{p_0(L - H_0)}{T_0} = \frac{p(L - H)}{T},$$

где L — длина трубки. Подставляя в это уравнение значение p_0 из (1.6), для давления воздуха над ртутью получим

$$p = (p_{\text{атм}}^0 - H_0) \frac{L - H_0}{L - H} \frac{T}{T_0}.$$

Тогда из (1.7) следует, что истинное атмосферное давление, вычисляемое по показанию H неисправного барометра, равно

$$p_{\text{атм}} = (p_{\text{атм}}^0 - H_0) \frac{L - H_0}{L - H} \frac{T}{T_0} + H.$$

Таким образом, можно пользоваться даже неисправным ртутным барометром, только теперь для нахождения атмосферного давления нужен еще и термометр [20].

1.24. ВЕС И ВЫСОТА АТМОСФЕРЫ

В ст. 1.22 было выяснено, что столб воды высотой в 10 м весит примерно столько же, сколько столб воздуха от Земли до верхней границы атмосферы, оттого они и уравнивают друг друга. Поэтому нетрудно вычислить, сколько весит воздушный столб, опирающийся на 1 см^2 земной поверхности: столько же, сколько весит 10-метровый столб воды с основанием в 1 см^2 . Объем такого столба 1000 см^3 . Так как 1 см^3 воды имеет, как мы знаем, массу 1 г, то рассматриваемый водяной столб весит 1000 г, т.е. 1 кг. Значит, атмосфера давит на каждый квадратный сантиметр Земли так, как будто на него положили груз массой 1 кг.

Узнав предыдущее, нетрудно рассчитать массу всего воздуха, окружающего нашу планету — для этого достаточно подсчитать количество квадратных сантиметров в земной поверхности. Учитывая, что средний радиус Земли равен 6400 км, получим $S = 4\pi R^2 = 4 \cdot 3,14 \cdot 6400^2 \approx 515\,000\,000 \text{ км}^2 \approx 5 \cdot 10^{18} \text{ см}^2$. Таким образом, вся атмосфера весит $5 \cdot 10^{18} \text{ кг} = 5\,000\,000\,000\,000\,000 \text{ т}$, т.е. пять тысяч миллиардов тонн! Масса поистине чудовищная, но по сравнению с еще более огромной массой самого земного шара ($\approx 6 \cdot 10^{24} \text{ кг}$) все же довольно скромная (вычислено, что вся атмосфера весит примерно столько, сколько одна гора Эверест).

Кстати, зная массу атмосферы Земли и считая, что молярная масса воздуха равна $\mu = 0,029 \text{ кг/моль}$ (это всего лишь грубое приближение, т.к. состав атмосферы зависит от высоты), можно легко оценить количество молекул в земной атмосфере:

$$N = \frac{m}{\mu} N_A = \frac{5 \cdot 10^{18}}{0,029} \cdot 6,02 \cdot 10^{23} \approx 10^{44}.$$

Если определить вес атмосферы и количество молекул в ней сравнительно просто, то гораздо труднее узнать, как она высока. Вследствие хаотического движения молекулы воздуха должны были бы разлететься во все стороны, однако их удерживает притяжение Земли. С другой стороны, если бы не тепловое движение молекул, то они все упали бы на Землю. В результате борьбы этих двух тенденций — падения вниз и

стремления равномерно рассеяться в окружающем пространстве — в атмосфере наблюдается некоторое распределение плотности (т.е. давления) воздуха по высоте: молекулы сосредоточены гуще в нижних слоях и реже — в верхних. Приблизительно математическое выражение этой закономерности дается формулой, называемой **барометрической**:

$$p = p_0 e^{-\frac{m_0 g h}{kT}}, \quad (1.8)$$

где p — давление воздуха на высоте h ; p_0 — давление воздуха при $h = 0$; m_0 — масса молекулы; T — абсолютная температура воздуха, k — постоянная Больцмана. Необходимо однако заметить, что использование барометрической формулы в данном случае оправдано лишь тем, что она правильно передает основную закономерность в уменьшении плотности воздуха с высотой — **экспоненциальную**. На самом деле мы пренебрегли рядом факторов: 1) воздух состоит из нескольких различных газов, молекулы которых имеют разные массы, и, соответственно, по-разному разрежаются с высотой; 2) в барометрической формуле предполагается, что температура воздуха одинакова на всех рассматриваемых высотах; однако известно, что температура воздуха с высотой понижается; 3) ускорение g не является константой, а также зависит от высоты h ; 4) не учитываются ветра и конвекционные потоки воздуха, которые могут весьма заметно влиять на плотность воздуха. Указанные причины приводят к тому, что распределение давления атмосферы с высотой несколько отличается от рассчитанной по формуле (1.8), но, тем не менее, остается экспоненциальным (табл. 1.1).

Экспоненциальная зависимость давления от высоты приводит к тому, что уже на высоте 1 500 м разреженность воздуха сказывается в том, что человек начинает испытывать болезненные явления, несмотря на то, что на такой высоте воздух совершенно свободен от бактерий.

Начиная с 3 000 м, где количество кислорода на 1/4 меньше нормального, появляются признаки «горной болезни»: головокружение, тошнота, учащенные пульс и дыхание.

Таблица 1.1

Зависимость атмосферного давления p от высоты h при нормальных условиях на поверхности Земли

Высота h , м	Давление p , мм рт.ст.	
	по формуле (1.8)	истинное
0	760	760
100	750	751
500	713	716
1 000	670	674
2 000	591	596
3 000	521	525
4 000	460	462
5 000	406	405
8 000	278	266
10 000	217	198
20 000	62	41
30 000	17	9

На высоте 4 000 м количество вдохов в одну минуту, производимых легкими при дыхании, вместо 18 доходит до 40, а пульс вместо нормальных 80 ударов — до 140.

При продолжительном пребывании на высоте 5 000 м число красных кровяных телец человека увеличивается с обычных 5 000 000 на кубический миллиметр до 8 000 000. Ко всему этому, впрочем, можно привыкнуть: в Тибете существуют постоянные человеческие поселения почти на такой же высоте (4 860 м).

На высоте 6 500 м воздух примерно вдвое реже, чем на уровне океана. Тем не менее, на высоте 7 000 м еще летают большие птицы — кондоры, выше же этой высоты не поднимается ни одно животное. На этой высоте человек может существовать лишь с помощью специальных аппаратов для дыхания.

На высоте 11 км воздух разрежается в 4 раза, а на высоте 22 км воздух почти в 20 раз менее густой, чем вокруг нас у поверхности Земли. В нем совсем нет водяных паров, а потому

и небо там всегда безоблачное; оно не голубое, а почти черное. Там всегда полное безветрие и ничем не нарушаемая тишина.

На высоте 35 км воздух разрежен примерно в 150 раз по сравнению с его плотностью у поверхности Земли.

На высоте 100 км воздух разрежен примерно в 1 000 000 раз по сравнению с воздухом близ земной поверхности. Если вспомнить, что в электрических лампочках газ разрежен только в 100 000 раз, то можно считать, что пространство на высоте 100 км уже практически пустое. Однако ученые подходят к этому более строго и отодвигают границу атмосферы в 6–7 раз дальше: границей атмосферы считают такую высоту, на которой имеются последние следы воздуха, чем-либо обнаруживающие свое существование. Это — высота в 600–700 км, куда достигают только лучи полярных сияний [9, 20, 23, 30, 31, 47, 89, 97, 98, 167, 168].

1.25. АТМОСФЕРЫ ВЕНЕРЫ И МАРСА

Как ни хороша наша Земля, наступит такой момент, когда человечество задумается о расширении своих владений. Вернее, оно уже сейчас думает об этом. Первейшими кандидатами на будущее расселение человечества сейчас рассматриваются наш спутник Луна и планеты Венера и Марс.

Луна сразу же отпадает: на ней нет атмосферы, а создание искусственной атмосферы даже не рассматривается — слишком мала гравитация, которая удерживала бы ее. Единственный выход — создание искусственных куполов, под которыми можно было бы поддерживать условия, приемлемые для человека. Однако и этот вариант проблематичен, так как отсутствие атмосферы на Луне позволяет небесным телам (метеорам и метеоритам) беспрепятственно бомбардировать ее поверхность.

Венера классифицируется как землеподобная планета, и иногда ее называют «сестрой Земли», потому что обе планеты похожи размерами (радиус Венеры равен 95% земного), массой (81,5% земной) и составом. Однако условия на поверхности планет совершенно разные.

Атмосфера Венеры простирается до высоты 250 км и состоит на 96,5% (по объему) из углекислого газа, остальные 3,5% составляет азот в смеси с очень малыми количествами кислорода, окиси углерода, аргона, серного ангидрида и водяного пара. Это объясняется тем, что на Венере нет жизни, которая могла бы перерабатывать углерод в биомассу и, таким образом, организовывать круговорот углерода (см. по этому поводу ст. 5.39 на с. 531). Кроме того, поверхность Венеры на высоте 30–60 км скрывают чрезвычайно густые облака серной кислоты с высокой отражательной способностью, что мешает увидеть ее поверхность в видимом свете. На Венере никогда не бывает ясных дней — только незначительная часть солнечного излучения достигает поверхности планеты.

Основные компоненты венерианской атмосферы значительно тяжелее основных компонентов земной атмосферы. Поэтому давление на поверхности Венеры значительно выше, чем на поверхности Земли, и составляет около 90 атм (это близко к давлению на глубине 900 м под водой на Земле). Сила такого давления просто расплющила бы космонавта, оказавшегося на Венере.

Аномальной является и температура атмосферы Венеры (у поверхности планеты), которая составляет 475 °С. Это превышает температуру поверхности Меркурия, находящегося вдвое ближе к Солнцу. Причиной столь высокой температуры на Венере является **парниковый эффект** (см. ст. 2.62 на с. 237), создаваемый плотной углекислой атмосферой. Несмотря на медленное вращение планеты, перепада температур между дневной и ночной стороной планеты не наблюдается — настолько велика тепловая инерция атмосферы.

Кстати, атмосферу Венеры открыл 6 июня 1761 г. великий русский ученый **М. В. Ломоносов** (1711–1765).

Если уж и искать для себя прибежище, то только на **Марсе**. По линейному размеру Марс почти вдвое меньше Земли (его экваториальный радиус равен 53,2% земного), а его масса составляет всего лишь 11% массы Земли. Длительность суток на Марсе практически равна длительности земных суток, а марсианский год состоит из 668,6 марсианских суток. Из-за того, что ось собственного вращения Марса наклонена

к плоскости орбиты вращения вокруг Солнца, на нем также бывает смена времен года (зима и лето). Марс иногда называют «красной планетой» из-за красноватого оттенка поверхности, придаваемого ей оксидом железа. У Марса есть два естественных спутника — Фобос и Деймос.

Хотя с начала развития космонавтики на Марс было отправлено много космических аппаратов, в основном то, что мы знаем о Марсе сегодня, связано с американской экспедиций «Викинг», которая состоялась в 1976 г. В настоящее время вокруг Марса работает целый флот спутников (американские «Марс Одиссей» и «Марсианский разведывательный спутник», а также европейский «Марс-экспресс»), а на поверхности все еще работает марсоход «Оппортьюнити», запущенный американцами в 2003 г., поставляя на Землю уникальные научные данные.

Как показывают полученные данные, атмосфера Марса на 95% состоит из углекислого газа; также в ней содержатся 2,7% азота, 1,6% аргона, 0,13% кислорода и еще меньше других газов. Атмосфера очень разрежена и очень тонка: она приблизительно в 150 раз тоньше земной и давление у поверхности Марса в 160 раз меньше земного. Температура в экваториальных областях днем положительная и достигает до $+20^{\circ}\text{C}$, а зимой падает до -130°C ; средняя температура составляет -50°C . Пыль играет очень большую роль в атмосфере и климате Марса. Глобальные пылевые бури иногда охватывают всю планету и длятся несколько месяцев.

Вода на Марсе есть в атмосфере в виде облаков, выпадает иней. Вода в виде льда есть и на поверхности, и под ней, а также в горных породах. Можно считать, что под поверхностью существует вечная мерзлота.

Особенностью рельефа Марса можно считать и полярные ледниковые шапки наподобие земных, образующиеся за счет замерзания атмосферы в зимний период (до $1/3$ массы атмосферы).

Хотя условия на Марсе далеко не идеальны, это все-таки лучше, чем Венера и Луна [40, 63, 161, 191].

1.26. ФОКУС С ВОЗДУХОМ

Можно произвести простой опыт, который одним махом подтверждает наличие атмосферного давления. Этот опыт производит потрясающее впечатление на окружающих.

Надо наполнить стакан водой (не обязательно до краев) и прикрыть его куском картона. Придерживая картонку рукой, осторожно переверните стакан и отпустите картонку — она остается на месте, и вода не выливается из стакана!

Картонку удерживает внешнее атмосферное давление. Действительно, накрывая стакан картонкой, мы всегда под ней в стакане имеем некоторый объем воздуха. Даже если стакан наполнен до краев, все равно между картонкой и поверхностью воды имеется тонкий слой воздуха (если бы это было не так, мы не могли бы, например, приподнимать со стола ни одной вещи, опирающейся на стол плоским основанием — пришлось бы преодолевать атмосферное давление). При перевертывании стакана этот объем воздуха перемещается наверх под донышко стакана (воздух легче воды). При этом под тяжестью воды картонка прогибается слегка вниз. Даже если картонка достаточно жесткая (или если, допустим, вместо картонки взять стеклянную пластинку), то она все равно несколько оттягивается от краев стакана. Так или иначе, пространство для воздуха под донышком перевернутого стакана оказывается больше первоначального объема воздуха. Это ведет к разрежению воздуха и его давление падает. Теперь на картонку действуют: снаружи — полное давление атмосферы, а изнутри — неполное атмосферное давление плюс давление столба воды. (Нужно бы, конечно, еще учитывать влияние силы тяжести, действующей на картонку, но мы будем считать ее массу пренебрежимо малой. Также мы не учитываем силу поверхностного натяжения, которая в нашем случае помогает удерживать картонку.) Картонка прогибается ровно настолько, чтобы наружное и внутреннее давления уравнились и вся система оставалась в равновесии.

Из сказанного выше можно подумать, что для достижения равновесия картонка должна прогибаться на значительную величину и это можно пронаблюдать глазами.

В реальности прогибание картонки под действием веса воды ничтожно. Допустим, что после переворачивания стакана воздушное пространство под его доньшком увеличивается на 0,01 от первоначального объема. Тогда на такую же долю уменьшится давление воздуха в стакане (так как $pV = \text{const}$, если считать, что $T = \text{const}$). Таким образом, давление под доньшком стакана упадет на одну сотую долю атмосферного давления, что эквивалентно давлению водяного столба высотой примерно 10 см, чего уже вполне достаточно, чтобы компенсировать давление воды в стакане. К примеру, если стакан наполнен водой доверху и слой воздуха между ее поверхностью и картонкой имеет первоначально толщину 0,1 мм, то достаточно увеличения его толщины на $0,01 \cdot 0,1 = 0,001$ мм (1 мкм), чтобы картонка удерживалась у краев перевернутого стакана. Нечего и пытаться поэтому уловить непосредственно глазом это прогибание картонки. Можно показать, что при большем первоначальном объеме воздуха его разрежение еще значительнее.

И еще одно замечание. Для предложенного фокуса выгоднее использовать именно бумажную картонку, так как в этом случае из-за пропитывания водой картонки происходит дополнительное увеличение объема воздуха в верхней части перевернутого стакана [23, 30, 31, 43, 51, 94, 95, 104, 118, 128, 131, 140, 147].

1.27. СООТНОШЕНИЕ ВОЗДУХА И ВОДЫ НА ЗЕМЛЕ

Как вы думаете, что тяжелее: вся атмосфера земного шара или вся вода на его поверхности? Несложный расчет дает возможность определить приблизительное отношение массы всех водных запасов нашей планеты к массе атмосфер.

Из ст. 1.22 нам известно, что вес столба атмосферы равен весу водяного столба высотой чуть меньше 10 м. Так как атмосфера равномерно покрывает всю поверхность земного шара, то ее масса будет равна

$$m_{\text{атм}} = \rho V = \rho Sh = 10\rho S,$$

где ρ — плотность воды; S — площадь поверхности Земли. Океаны же при средней глубине около 4 км занимают 3/4 земной поверхности. Отсюда масса воды всех океанов

$$m_{\text{вод}} = \rho \cdot \frac{3}{4} S \cdot 4\,000 = 3\,000 \rho S.$$

Искомое отношение равно

$$\frac{m_{\text{вод}}}{m_{\text{атм}}} = \frac{3\,000}{10} = 300.$$

Итак, вся вода земной поверхности весит примерно в 300 раз больше, чем весь воздух (точное значение — в 270 раз).

Кстати, если бы можно было собрать все газы нашей атмосферы в сферическую емкость при нормальном атмосферном давлении и нормальной температуре, то диаметр этой сферы равнялся бы 2 000 км. А если собрать всю воду Земли в одну массу, то получилась бы «капля» диаметром около 1 400 км [63, 95].

1.28. АВТОМАТИЧЕСКАЯ ПОИЛКА

Наполните бутылку водой, приложите к ее отверстию плотно пальцы, переверните ее, погрузите горлышко под воду в чашке и отнимите пальцы от отверстия. Казалось бы, вода из бутылки может свободно вылиться — отверстие открыто. Однако вода, чуть-чуть вылившись, далее не выливается. Это еще один простейший опыт, который доказывает, что воздух имеет вес: в верхней части бутылки образуется разрежение и давление атмосферы уравнивает давление столба воды в бутылке (см. по этому поводу ст. 1.26).

Если вы дома держите кошку или собаку, то на этой основе легко сможете сконструировать для них автоматическую поилку, в которой всегда будет чистая вода.

Для изготовления поилки необходимы неглубокая миска и пластиковая бутылка из-под лимонада или минеральной воды. Налив воду в бутылку, необходимо накрыть ее миской и аккуратно перевернуть. Бутылку необходимо закрепить верх дном

на какой-нибудь стойке (например, скотчем на ножке табуретки), а ее горлышко должно чуть-чуть не доходить до дна миски. Часть воды из бутылки выльется в миску до уровня края горлышка, при этом в верхней части бутылки образуется разрежение и внешнее атмосферное давление не позволит вытечь оставшейся воде. Когда кошка или собака отопьют воды, несколько пузырьков воздуха войдут в бутылку, и опять уровень воды в миске поднимется до уровня горлышка бутылки.

Наряду с несомненным достоинством — простотой, такая поилка имеет существенный недостаток: ее достаточно сложно заправить новой порцией воды после того, как она израсходуется в бутылке. Еще одна неприятность: кошка или собака могут легко сдвинуть миску со своего места, и вся вода из бутылки выльется на пол. Этих недостатков лишена следующая модель.

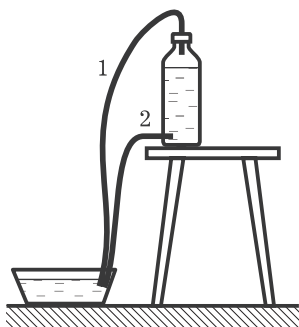


Рис. 1.5

Нам понадобятся пластиковая бутылка из-под лимонада или минеральной воды и две гибкие трубки достаточной длины (например, из одноразового медицинского набора для капельниц). В пробке проделайте дырку и герметично (например, с помощью пластилина, а лучше всего — полимерным клеем) закрепите в ней конец одной из трубок (рис. 1.5). Около основания бутылки проделайте вторую

дырку и герметично закрепите в ней конец второй трубки. Другие концы трубок нужно прикрепить на миске на некоторой высоте от ее дна.

Если теперь налить в бутылку воду и закрутить пробку (герметично!), то вода будет вытекать через нижнюю трубку 2 только в том случае, если в бутылку будет попадать воздух через верхнюю трубку 1. Но как только конец трубки 1 перекроется водой в миске, в бутылке вследствие уменьшения уровня воды образуется разрежение и вода через трубку 2

перестает выливаться. Таким образом будет поддерживаться постоянный уровень воды в миске [30, 31, 51, 97, 118, 132].

1.29. КТО ИЗОБРЕЛ АЭРОСТАТ?

Как-то вечером в 1781 г. французский изобретатель **Жозеф Монгольфье** (1740–1810) заметил, как у супруги, проходившей мимо камина, вздулся шелковый пеньюар. Это навело изобретателя на мысль, что горячий воздух легче холодного. Жозеф Монгольфье и его брат Этьен подожгли клочки бумаги под шариком из шелка и наблюдали, как он надулся и взлетел вверх. Так родилась идея воздушного шара, наполненного подогретым воздухом (дымом).

Монгольфьер — такое название получил изготовленный Жозефом и Этьеном шар — представлял собой льняной мешок диаметром около 30 м, покрытый слоем бумаги. Первый успешный запуск шара (без экипажа) братья осуществили 5 июня 1783 г. в родном городке Видалон-лез-Аннон. После эксперимента их пригласила Парижская академия наук для запуска воздушного шара в столице.

В желающих подняться в воздух на воздушном шаре братьев Монгольфье недостатка не было. Однако король распорядился не рисковать человеческой жизнью и сначала провести «биологический эксперимент»: перед полетом человека попробовать поднять в воздух животных. 19 сентября 1783 г. в Версале в присутствии Людовика XVI и его жены Марии Антуанетты братья Монгольфье запустили в воздух наполненный горячим дымом шар, в гондоле которого находились баран, утка и петух.

Через 8 минут полета шар (когда в нем остыл воздух) приземлился в двух километрах от места старта. Все пассажиры благополучно вернулись на землю (пострадал только петух — он сломал крыло), продемонстрировав, что полеты на воздушном шаре не опасны. Через месяц король разрешил полет первого экипажа — аптекаря Пилара де Розье и маркиза д'Арланда. Он состоялся в Париже 21 ноября 1783 г. и продолжался 25 минут. Так началась эра воздушных шаров. А спустя 70 лет в 1852 г. французский же изобретатель **Анри**

Жиффар (1825–1882) превратил парящий в воздухе аэростат в управляемый дирижабль с паровым двигателем, и с тех пор началась эра дирижаблей.

В России первый полет воздушного шара состоялся в Москве уже спустя год после описанного французского подъема — весной 1784 г. Московская газета того времени писала: «Воздушный шар начал подниматься пополудни в 1-м часу между 20 и 25 минутами и менее нежели в 5 минут взошел выше 500 сажен (1 000 м) и продолжал хождение свое так, что в $2\frac{1}{2}$ часа видели его весьма малым и можно было заключить, что он отстоял от земли на 1 500 сажен (3 000 м). Он упал перед захождением солнца в 7 часов, от Москвы за 27 верст по Калужской дороге».

Существуют исторические сведения (впрочем, не слишком достоверные) и о значительно более ранних полетах человека на воздушных шарах: о воздушном шаре, который поднялся в Пекине в 1306 г. во время церемонии вступления на престол императора Фо Киена; о шаре, на котором в 1709 г. летал португальский монах Бартоломео де Кусмао. Сохранилась также весьма сомнительная запись о полете русского подьячего Крякутного в 1731 г. в Рязани. Запись гласит: «В Рязани ... подьячий ... Крякутной фурвин* сделал, как мяч большой, надул дымом поганым и вонючим, от него сделал петлю, сел в нее, и нечистая сила подняла его выше березы, а после ударила о колокольню, но он уцепился за веревку, чем звонят, и остался тако жив. Его выгнали из города, и он ушел в Москву, и хотели закопать живого в землю или сжечь». Но в настоящее время ученые склоняются к мысли, что это фальсифицированная запись. Поэтому официальным днем рождения воздушного шара (аэростата) считается дата первого полета шара братьев Монгольфье — 5 июня 1783 г.

Подъемная сила воздушного шара равна разности между силой Архимеда F_A , действующей на шар, и силой тяжести, действующей на оболочку шара массы $m_{об}$, газ внутри шара массой $m_г$ и полезную массу $m_{пол}$:

$$F_{под} = F_A - (m_{об} + m_г + m_{пол})g. \quad (1.9)$$

* *Фурвин* — мешок.

Сила Архимеда равна $F_A = \rho_0 g V$, где ρ_0 — плотность окружающего воздуха; V — объем шара (выталкивающей силой, действующей на полезный груз, пренебрегаем ввиду ее малости). Пусть давление и температура окружающего воздуха равны соответственно p_0 и T_0 , газ внутри шара имеет температуру T_Γ , а его давление равно давлению окружающего воздуха (шар сообщается с атмосферой). Тогда плотность окружающего воздуха равна (из уравнения Клапейрона—Менделеева) $\rho_0 = \mu_0 p_0 / (RT_0)$, где μ_0 — молярная масса воздуха ($\mu_0 = 0,029$ кг/моль). Массу газа в шаре также можно выразить из уравнения Клапейрона—Менделеева: $m_\Gamma = \mu_\Gamma p_0 V / (RT_\Gamma)$, где μ_Γ — молярная масса газа в шаре. Получим

$$F_{\text{под}} = \frac{\mu_0 p_0 g V}{RT_0} - \left(m_{\text{об}} + \frac{\mu_\Gamma p_0 V}{RT_\Gamma} + m_{\text{пол}} \right) g$$

или

$$F_{\text{под}} = \frac{g p_0 V}{R} \left(\frac{\mu_0}{T_0} - \frac{\mu_\Gamma}{T_\Gamma} \right) - (m_{\text{об}} + m_{\text{пол}}) g. \quad (1.10)$$

При данных массах оболочки шара и полезного груза второе слагаемое в правой части полученного выражения является константой, поэтому подъемная сила будет определяться разностью в скобках первого слагаемого. При фиксированных μ_0 и T_0 окружающего воздуха эта разность будет тем больше, чем меньше μ_Γ и больше T_Γ . Поэтому выгодно шар наполнять нагретым легким газом. Самым легким газом является водород, но он может легко воспламениться, из-за чего в настоящее время воздушные шары наполняют вторым после водорода по легкости газом — гелием. Кстати, гелий можно и не нагревать — подъемная сила будет обеспечиваться за счет малости μ_Γ . Можно шар наполнять и обычным воздухом (как у братьев Монгольфье), но тогда его приходится нагревать до достаточно высоких температур.

Полезный груз, который может поднять воздушный шар, определяется неравенством $F_{\text{под}} \geq 0$ или $F_A \geq (m_{\text{об}} + m_\Gamma + m_{\text{пол}})g$ (см. формулу (1.9)). Максимально возможная масса

полезного груза соответствует случаю $F_{\text{под}} = 0$, поэтому ее легко найти из (1.10):

$$m_{\text{max}} = \frac{p_0 V}{R} \left(\frac{\mu_0}{T_0} - \frac{\mu_\Gamma}{T_\Gamma} \right) - m_{\text{об}}.$$

Например, пусть воздушный шар заполнен нагретым до 100°C воздухом, масса оболочки шара равна 100 г и имеет объем 4 м^3 (что соответствует шару радиусом чуть меньше 1 м), а давление и температура окружающего воздуха равны нормальным. Тогда максимальная масса полезного груза будет равна

$$\begin{aligned} m_{\text{max}} &= \frac{\mu_0 p_0 V}{R} \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T_\Gamma} \right) - m_{\text{об}} = \\ &= \frac{10^5 \cdot 4 \cdot 0,029}{8,31} \left(\frac{1}{273} - \frac{1}{373} \right) - 0,01 = 1,36\text{ кг}. \end{aligned}$$

Кстати, первый в истории человечества кругосветный полет на воздушном шаре без посадки был осуществлен только в 1999 г. Воздушный корабль «Брейтлинг Орбитер-3» пилотировали швейцарец **Бертран Пиккар** и англичанин **Брайн Джонс**. Они пролетели $46\,759\text{ км}$ за 19 дней 21 ч 55 мин (средняя скорость — 98 км/ч). Шар был наполнен смесью гелия и горячего воздуха [5, 50, 51, 62, 70, 97, 98, 110, 118, 142, 152, 168].

1.30. ВОЗДУШНАЯ ШУБА

Знаете ли вы, что воздух (как и любой газ) является хорошим теплоизолятором? В качестве показательного примера можно привести такое сравнение: теплопроводность серебра больше теплопроводности воздуха в $12\,000$ раз.

Именно на плохой теплопроводности воздуха основан тот факт, что лучшей зимней верхней одеждой является шуба. Мех шубы заполнен воздухом, поэтому даже в самые лютые морозы и ветреную погоду она хорошо защищает тело от теплопотерь. Более того, комбинация мелковорсистого меха и

воздуха в нем уменьшает общую теплопроводность такой системы почти вдвое. Этим же объясняются и теплозащитные свойства оренбургских пуховых платков, хотя на вид они совсем тонкие и прозрачные.

Можно привести много примеров из нашего быта, где используется плохая теплопроводность воздуха. Например, применение красного обожженного кирпича в строительстве в первую очередь обусловлено тем, что он содержит мельчайшие поры, заполненные воздухом, из-за чего красный кирпич является хорошим теплоизолятором (хотя теплопроводность кирпича больше теплопроводности воздуха приблизительно в 20 раз).

В целях теплоизоляции квартир в зимнее время окна наших домов имеют двойные рамы, между которыми находится воздух. Причем, чем лучше изолированы рамы, тем лучше их теплозащитное свойство, т.к. при этом воздух внутри рам не вытесняется порциями наружного холодного (и потому более тяжелого) воздуха и не происходит значительного охлаждения комнаты. Именно поэтому зимой щели в оконных рамах замазываются или заклеиваются.

Выпавший зимой снег тоже весь пронизан воздухом, поэтому обладает относительно плохой теплопроводностью — в 2,5 раза меньше, чем у дерева. Этим свойством обусловлено «греющее» действие снега: покрывая землю, он замедляет потерю ею теплоты. Теплоизолирующее свойство снега издавна использовали коренные жители Крайнего Севера при сооружении своих жилищ.

Кстати, если холодной зимой направить объектив прибора ночного видения на снегиря (как, впрочем, и любую другую птицу, комфортно чувствующую себя в зимние холода), то на экране возникнет только птичий глаз. Дело в том, что теплопроводность птичьих перьев и пуха очень низка (в 1,5–2 раза меньше теплопроводности сухого воздуха), а потому пух и перья снегиря надежно защищают его от потери тепла. Таким же свойством обладают шерсть и мех многих животных. Говорят, что в свое время (во время Афганской войны) кончились неудачей попытки обнаружить с помощью приборов ночного видения караваны моджахедов в Афганистане, ночами

переправлявших оружие из Пакистана: их защищали одеяла из верблюжьей шерсти.

В наследство от далеких и волосатых предков нам достался защитный механизм, срабатывающий при резком похолодании, — это появление прыщиков на коже. Наверняка вы уже догадались, в чем дело: при появлении прыщиков волосяное покрытие тела должно было «встать», утолщая слой неподвижного воздуха около тела и, тем самым, уменьшая теплопотери [11, 62, 95, 147].

1.31. ПАРАДОКС С ОТОПЛЕНИЕМ ПОМЕЩЕНИЯ

Печи и батареи отопления служат единственной цели — согреть воздух в комнате. Повышается ли при этом внутренняя энергия воздуха (т. е. суммарная энергия молекул воздуха) в комнате?

Казалось бы, ответ вполне ясен: так как температура является мерой средней кинетической энергии молекул, то, несомненно, при нагревании внутренняя энергия воздуха в комнате должна увеличиваться. Однако это не так.

Воздух при обычных условиях можно считать идеальным газом, поэтому его внутренняя энергия, как известно, равна (с точностью до постоянной слагаемой)

$$U = \nu \frac{i}{2} RT,$$

где ν — количество вещества; i — параметр, выражающий число степеней свободы молекул воздуха; $R = 8,31$ Дж/(К·моль) — универсальная газовая постоянная. Другими словами, внутренняя энергия пропорциональна количеству молекул и температуре. Но, с другой стороны, можно показать, что эта энергия пропорциональна также произведению давления воздуха на объем комнаты. Действительно, воспользовавшись уравнением Клапейрона—Менделеева $pV = \nu RT$, можно записать

$$U = \frac{i}{2} pV.$$

При нагревании воздуха объем комнаты, естественно, не изменяется. Не изменяется, очевидно, и давление, поскольку комната не изолирована и всегда сообщается с окружающим пространством (давление воздуха внутри комнаты всегда равно внешнему атмосферному давлению). Таким образом, когда нагревается комната, давление и объем воздуха внутри нее сохраняются прежними, соответственно не изменяется и полная энергия находящихся в комнате молекул воздуха. Это, конечно, возможно лишь потому, что по мере возрастания температуры часть молекул воздуха **уходит из помещения (!)** вследствие повышения давления. Так что, как это ни печально, зимой мы частично обогреваем и наружный воздух (никуда не денешься!).

Вышесказанное можно эффектно показать в следующем опыте. В плоскую тарелку налейте немного воды и закрепите в ней горящую свечу. Свечу накройте стаканом. Вследствие горения воздух в стакане нагревается, давление его растет и избыток выдавливается из стакана (это можно заметить по пузырькам воздуха в воде). Горение через некоторое время прекращается из-за истощения запасов кислорода и газ в стакане начинает остывать. Понижение давления при этом ведет к тому, что вода начинает всасываться в стакан и ее уровень в стакане окажется выше уровня в тарелке. Этот опыт можно оформить и как фокус, положив в тарелку с водой монету и предложив зрителям вынуть ее сухой, не обмочив при этом свои пальцы.

Кстати, в этом случае для нагрева воздуха в стакане не обязательно использовать свечку — если воды в тарелке немного, вполне достаточно предварительно подержать стакан под струей горячей воды.

Кстати, вышеописанный опыт многие (даже в некоторых учебниках) объясняют выгоранием кислорода в стакане и соответствующим уменьшением давления, что неправильно. Кислород действительно тратится на горение, но взамен образуется углекислый газ, причем один в один, т.е. сколько молекул кислорода ушло на горение, столько же молекул углекислого газа образовалось ($O_2 \rightarrow CO_2$). Это не влияет на давление в стакане, т.к. по закону Авогадро равное количество

молекул занимает равный объем и, соответственно, оказывает равное давление [30, 31, 38, 92, 95, 118, 131, 140, 147, 169].

1.32. ОТКЛОНЕНИЕ ПЛАМЕНИ СВЕЧИ

Как следует из уравнения Клапейрона—Менделеева, плотность газа прямо пропорциональна давлению и обратно пропорциональна температуре:

$$\rho = \frac{\mu p}{RT},$$

поэтому нагревание газа при неизменном атмосферном давлении ведет к уменьшению его плотности. Это, в свою очередь, иногда приводит к довольно неожиданным наблюдениям.

Например, перенося в комнате с места на место горящую свечу, мы замечаем, что пламя в начале движения отклоняется назад.

Это и понятно: неподвижный воздух, окружающий свечу, оказывает сопротивление движению пламени. Теперь вопрос: куда отклонится пламя, если переносить свечу в закрытом объеме, к примеру, в стеклянной банке?

Тот, кто думает, что пламя свечи, переносимой в банке, вовсе не будет отклоняться при движении, ошибается. Прodelайте опыт с горящей спичкой и вы убедитесь, что если двинуть ее, защитив рукой, то пламя отклонится, и притом, сверх ожиданий, не назад, а вперед.

Причина отклонения вперед та, что пламя обладает меньшей плотностью, чем окружающий его воздух. Согласно 2-му закону Ньютона ($a = F/m$) одна и та же сила телу с меньшей массой сообщает большее ускорение, чем телу с большей массой. Поэтому пламя, двигаясь быстрее воздуха в банке, отклоняется вперед.

Та же причина — меньшая плотность пламени, нежели окружающего воздуха — объясняет и неожиданное поведение пламени при круговом движении банки: оно отклоняется к центру вращения, а не наружу, так как ему (пламени) сообщается большее центростремительное ускорение [94, 95].

1.33. ПЕЧНАЯ ТРУБА, ЗАГАДОЧНАЯ ВЕРТУШКА И СКВОЗНЯК

Как указывалось в предыдущей статье, при нагревании плотность газа уменьшается (за счет его расширения). Если нагретый газ окружен холодным, то более тяжелый холодный газ, опускаясь сверху, вытесняет более нагретый легкий вверх — это так называемое явление **конвекции**. Первоначально термин «конвекция» (от лат. *convectio* — принесение, доставка) был предложен в 1834 г. английским ученым **В. Прутом** (1785–1850) для описания распространения тепла в движущейся жидкости. Конвекция возникает при существовании тепловой неоднородности в жидкостях и газах. Такая неоднородность является источником движения, в результате чего происходит перенос тепловой энергии молекул с одного места в другое.

В явлении конвекции существенную роль играет гравитация. Поэтому, если горение будет происходить в невесомости, например, на космическом корабле, то, начавшись, оно сразу же прекращается.

А все из-за того, что в этом случае газ невесом и не происходит вытеснения легкого нагретого газа холодным тяжелым, т. е. в невесомости конвекция отсутствует (это не означает, что будут отсутствовать явления диффузии, теплопроводности и внутреннего трения). Продуктами же горения являются углекислый газ и водяной пар, которые, укутывая собой пламя, перекрывают доступ кислорода для поддержания горения.

На явлении конвекции основано действие печных труб, создающих вытяжную тягу для продуктов сгорания топлив. Печная труба не только выбрасывает в атмосферу продукты сгорания, но и создает тягу воздуха в зону горения, улучшающую условия его протекания. Связано это с расширением топочных газов в трубе — при типичной для них температуре около 300 °С их объем в 2 раза больше, а давление в 2 раза меньше, чем у окружающего воздуха. Благодаря этому сквозь топку идет мощный поток воздуха, обеспечивающий горение.

Кстати, кирпичная печная труба лучше металлической, так как стенка металлической трубы охлаждается значительно сильнее, чем толстая кирпичная, поэтому ее тяга, особенно зимой, будет слабее.

На явлении конвекции основан показ одного замечательного фокуса. Для этого из тонкой легкой бумаги вырезается небольшой прямоугольник. Его надо перегнуть по средним линиям и снова расправить — это позволит вам знать, где центр тяжести прямоугольника. Положите теперь бумажку на острие торчащей иглы так, чтобы игла подпирала ее как раз в обозначенном центре тяжести. Бумажка при этом останется в равновесии, но от малейшего дуновения начинает вращаться на острие. Теперь осторожно приблизьте к нему руку (чтобы бумажка не была сметена воздушным потоком). Вы заметите интересную вещь: бумажка начнет вращаться — сначала медленно, потом все быстрее. Отодвиньте руку — вращение прекратится, приблизьте — опять начнется.

Это загадочное вращение в одно время — в семидесятых годах XIX века — давало многим повод думать, что тело наше обладает какими-то сверхъестественными свойствами. Любители мистического находили в этом опыте подтверждение своим туманным учениям об исходящей из человеческого тела таинственной силе. Между тем причина вполне естественна и очень проста: воздух, нагретый снизу вашей рукой, поднимается вверх и, напирая на бумажку, заставляет ее вращаться. Внимательный наблюдатель может заметить, что описанная вертушка вращается в определенном направлении — от запястья вдоль ладони к пальцам. Это объясняется разницей температур частей руки: концы пальцев всегда холоднее, чем ладонь.

Конвекцией же объясняется такое явление, как сквозняк от закрытого наглухо окна в теплой комнате. Это кажется странным, но ничего удивительного здесь нет. Воздух комнаты почти никогда не находится в покое: в нем существуют невидимые для глаз течения, порождаемые нагреванием и охлаждением воздуха в разных местах. Легкий нагретый воздух от батареи центрального отопления или теплой печи вытесняется холодным воздухом вверх к потолку, а охла-

жденный окнами и холодными стенами тяжелый воздух стекает вниз к полу. Вот почему зимой мы чувствуем, как дует от окна (особенно у ног), хотя рама так плотно закрыта, что наружный воздух не может проходить сквозь щели [30, 31, 32, 33, 51, 62, 79, 92, 94, 118, 147, 191].

1.34. ОПАСНОЕ ПОГРУЖЕНИЕ И ВСПЛЫТИЕ

Чем глубже под водой вы находитесь, тем большее давление испытывают ваши грудная клетка и легкие. Изнутри, со стороны легких, давит воздух под давлением в 1 атм, а снаружи давит 1 атм + столб воды высотой, равной глубине погружения. При погружении в воду на полметра грудная клетка находится под избыточным давлением, эквивалентным действию груза в 15–20 кг, что заметно затрудняет дыхание. Если вы решите на такой глубине дышать воздухом через сообщающуюся с атмосферой трубочку, то вряд ли сможете долго продержаться под водой. На глубине же около 1 м давление воды уже настолько велико, что дышать атмосферным воздухом через трубочку становится невозможным.

Но гораздо серьезнее происходящие при этом нарушения кровообращения. Кровь вытесняется из частей тела, где давление выше (ноги, полость живота), в области меньшего давления — в грудь и голову. Переполненные кровью сосуды этих частей тела препятствуют оттоку крови от сердца и аорты: последние непомерно расширяются от избытка крови, и в результате — если не смерть, то тяжелое заболевание. В 1910 г. австрийский врач **Р. Штиглер** проверил сказанное на ряде опытов. Оказалось, что когда грудь находилась на глубине одного метра, дыхание через трубочку становилось совершенно невозможным. На глубине 60 см организм выдерживал пребывание под водой в течение всего 3,75 мин, на глубине 90 см — 1 мин, на 1,5 м — не более 6 с. Когда же врач рискнул погрузиться под воду до 2 м, то уже через несколько секунд сердце расширилось до опасного предела и для лечения расстроенного кровообращения потребовалось трехмесячное пребывание в постели.

Для того, чтобы опускаться на большие глубины, необходимо давление воздуха в грудной клетке повышать, чтобы оно могло противостоять внешнему давлению. Именно это мы делаем, когда ныряем в воду. Для этого мы набираем в легкие возможно больше воздуха; по мере погружения тела в воду воздух этот все сильнее сдавливается напором воды, оказывая в каждый момент давление, равное давлению окружающей воды. Нет причины поэтому для переполнения сердца кровью. Одна беда — запаса кислорода хватает ненадолго.

Чтобы обойти это ограничение были придуманы различные системы дыхания под водой: подводный колокол, водолазный костюм и, конечно же, **акваланг** — легкое водолазное снаряжение, способное делать давление в дыхательном аппарате равным окружающему давлению воды и позволяющее погружаться на глубины до 300 м. Создателями современного акваланга для дайвинга считаются французы **Жак-Ив Кусто** (1910–1997) и **Эмиль Ганьян** (1900–1979), разработавшие его в 1943 г. во Франции в условиях фашистской оккупации.

Простейший аналог акваланга — это наполненная воздухом резиновая камера, например, вытасченная из колеса автомобиля. Если с ней опуститься под воду, то можно будет через трубку дышать воздухом из этой камеры, поскольку давление внутри камеры будет равно давлению воды на данной глубине. Правда, погрузиться в воду с таким «баллоном» не так-то просто — очень существенна сила Архимеда. Поэтому к камере надо прикрепить дополнительный груз-балласт. И именно из-за этого у аквалангов баллоны металлические, в которых находится сжатый воздух. А чтобы изменять давление поступающего в легкие воздуха в соответствии с глубиной погружения, акваланг имеет специальное автоматическое устройство.

При глубоких погружениях под воду есть и другая опасность — **кессонная болезнь**. Дело в том, что при погружении в глубину с увеличением давления азот, присутствующий во вдыхаемом воздухе, начинает растворяться в крови и тканях тела (см. ст. 4.54 на с. 452). При всплытии азот выделяется обратно. Если скорость подъема достаточно большая, то он образует пузырьки. Это не только вызывает болезненные

ощущения, но и угрожает смертельной опасностью закупорки кровеносных сосудов и попадания азота в сердце. Поэтому выход на поверхность воды производится постепенно, чтобы азот выходил из тканей без образования пузырьков. Вам, наверное, приходилось это видеть в кино: ныряльщик в процессе всплытия время от времени останавливается на определенных глубинах [12, 95, 98, 213].

1.35. ЭКСТРЕННОЕ ВСПЛЫТИЕ

Допустим, вы плаваете с аквалангом на большой глубине (скажем, около 30 м) и вам необходимо срочно подняться на поверхность. В баллоне воздуха только на один вдох. Как вы станете всплывать? Следует ли вам выдыхать воздух по мере всплытия или нужно стараться удержать его? Это отнюдь не академический вопрос: экипажи подводных лодок отрабатывают такое всплытие на тренировках.

Возможно, на первый взгляд это покажется странным, но тем не менее воздух нужно выдыхать, иначе вы пропали. Если по ходу всплытия не выпускать воздух, то можно порвать легкие, поскольку объем воздуха в них увеличивается с уменьшением внешнего давления. Кроме того, установлено, что наша потребность сделать очередной вдох определяется не количеством углекислого газа в легких, а его парциальным давлением. Поэтому выдыхая при всплытии воздух, мы, тем самым, попутно снижаем парциальное давление углекислого газа в легких. Однако это давление изменяется неравномерно и нелинейно: параллельно с выдыханием углекислого газа организм вырабатывает новые его порции. Поэтому считается, что при всплытии наиболее опасный и критический момент наступает не у поверхности, а на некоторой глубине. Когда же вы проходите критическую точку, ваша потребность совершить вдох уменьшается [140].

1.36. КАРТЕЗИАНСКИЙ ВОДОЛАЗ

Эту забавную и эффектную игрушку придумал французский ученый и философ **Рене Декарт** (1596–1650), и теперь

ее называют «картезианским водолазом» (по латыни имя *Рене Декарт* звучит как *Ренатус Картезиус*).



Рис. 1.6

Устройство игрушки показано на рис. 1.6. Для ее создания берется пластмассовая бутылка из-под лимонада, маленький стеклянный пузырек от какого-нибудь лекарства (это будущий «водолаз») и воздушный шарик. Бутылку необходимо наполнить водой почти до горлышка, так, чтобы над поверхностью воды остался небольшой объем воздуха. Пузырек надо опустить отверстием вниз в воду и, наклонив его, впустить в него немного воды. Количество воды в пузырьке надо отрегулировать так, чтобы пузырек держался на поверхности воды, но от малейшего толчка уходил под воду (для этого удобнее

взять трубочку от кока-колы или пакета с соком и через нее вдвухать под водой воздух в пузырек, пока он не всплывет). При этом пузырек обязательно будет оставаться в вертикальном положении в состоянии устойчивого равновесия, так как плотность воздуха, запертого водой в пузырьке, меньше плотности воды. Затем надо накрыть горлышко бутылки резиновой пленкой от воздушного шарика и привязать ее ниткой вокруг горлышка. Если все правильно отрегулировано, то при нажатии на резиновую пленку «водолаз» пойдет ко дну, а при отпускании — всплывет.

Причина такого поведения «водолаза» проста. Когда вы нажимаете на пленку, объем воздуха, находящегося над поверхностью воды в бутылке, уменьшается, соответственно давление его увеличивается.

Теперь на воздух, запертый в пузырьке, действует большее давление, под действием которого он сжимается и, соответственно, в пузырек входит еще некоторое количество воды. При этом пузырек (т. е. «водолаз») становится тяжелее и начинает тонуть. Когда пленка отпускается, давление в бутылке над поверхностью воды уменьшается, а сжатый воздух в пузырьке выгоняет лишнюю воду — «водолаз» всплывает [23, 38, 51, 88, 104, 106, 131, 168].

1.37. ПОГРУЖЕНИЕ И ВСПЛЫТИЕ РЫБ

Часто способность рыбы плавать под водой объясняют тем, что они, якобы, для этого меняют объем плавательного пузыря с помощью мышц. Однако это неверно, поскольку никакая рыба при таких высоких давлениях, которые существуют в морских глубинах, не может управлять объемом плавательного пузыря с помощью мышц. Как же рыбы плавают под водой?

Начать надо с того, что плавательный пузырь обеспечивает рыбе **нулевую плавучесть** (или **гидроневесомость**), благодаря чему она не всплывает на поверхность и не опускается на дно. Далеко не все рыбы обладают плавательными пузырями. Например, не имеют воздушного поплавка донные рыбы. Не пользуются плавательным пузырем и быстроходные хищники — ведь в погоне за добычей им необходимо совершать стремительные всплытия и погружения; в этом случае емкость, наполненная газом, становится помехой. Предельная глубина, на которой случалось поймать рыбу с плавательным пузырем, — 4 000 м, при этом газ в пузыре должен находиться под давлением 400 атм! Тут уж никакие мышцы не помогут.

Предположим, рыба с помощью плавников плывет вниз. Возрастающее давление воды сжимает газ в пузыре, соответственно объем рыбы, а с ним и плавучесть уменьшаются. Причем, чем глубже опускается рыба, тем меньше плавучесть. Если рыба прозеваает этот момент, то она запросто может утонуть. Еще опаснее для рыбы подниматься в более поверхностные слои: по мере падения давления воды газы плавательного пузыря начнут расширяться, объем его увеличится, и он потащит рыбу наверх. Если она зазеваается и поднимется слишком высоко, то уже не сможет преодолеть подъемную силу собственного газового поплавка, будет выброшена на поверхность и вывернута наизнанку, а может быть, просто лопнет. Из этого положения есть лишь один выход — освободиться от излишков газа. Однако, возвращаясь обратно на глубину, рыба будет вынуждена снова заниматься его добычей и восстановлением в плавательном пузыре необходимого давления. Так как же рыба меняет давление в герметичном пузыре?

Единственная для рыбы возможность — это выделение потребляемого через жабры кислорода в плавательный пузырь. Для этого рыбы оснащены хитроумными «механизмами».

Заполнение кислородом плавательного пузыря обеспечивает **газовая железá**, расположенная непосредственно в его стенке (в потрошенной рыбе она хорошо заметна благодаря ярко-красной окраске). Железá лишь помогает выделяться кислороду, содержащемуся в крови, но сама его не вырабатывает. Для этого она в нужный момент выделяет в кровь молочную кислоту, которая нарушает связь кислорода с гемоглобином и снижает растворимость газов в крови. В результате кровь мгновенно наполняется большим количеством свободного кислорода.

Этот кислород, в принципе, мог бы выделиться в плавательный пузырь, но его давление не столь велико, чтобы он мог проникать в плавательный пузырь с существующим там огромным давлением. Для этого случая природа снабдила рыб так называемой **умножающей системой** (или, другое название, «**чудесной сетью**»), которая позволяет преодолевать огромные давления океанских глубин. Ее основой являются кровеносные сосуды. Кровь поступает к газовой железé по специальной артерии, но прежде чем войти в саму железú, она распадается на громадное количество капилляров, а затем снова сливается в один сосуд. Вена, выходящая из железý, также делится сначала на мельчайшие капилляры, а затем снова собирается в общую вену. Самое главное, венозные капилляры проходят сквозь частокол артериальных капилляров и тесно соприкасаются с ними.

В артериальных капиллярах кислород содержится под давлением всего-то 0,2 атм — это давление растворенного кислорода в морской воде на любых глубинах океана. Поэтому, отекая от газовой железý, свободный кислород из венозной крови диффундирует в артериальную. В газовой железé к нему прибавляется новая порция кислорода, освобожденного из-под влияния гемоглобина действием молочной кислоты. Эта процедура многократно повторяется, и умножающая система, не давая кислороду уйти с венозной кровью в жабры, наконец настолько повышает его давление, что он преодолевает

высокое давление плавательного пузыря и начнет проникать в него, восстанавливая его прежний объем.

Чтобы понять, почему умножающая система работает так совершенно, представьте ее реальные размеры. Например, у обыкновенного угря «чудесная сеть» содержит около 100 000 артериальных и такое же количество венозных капилляров. Каждый капилляр имеет длину около 4 мм, так что их общая длина составляет 800 м. Поверхность стенок капилляров, через которые происходит диффузия кислорода, достигает 100 см³. И по этой поверхности «размазано» всего-то 0,04 г крови! Ясно, что для свободной диффузии газов условия здесь превосходные. Главное достоинство умножающей системы — высочайшая экономичность: ее работа основана на простой диффузии газов, т. е. идет сама собою без затраты энергетических ресурсов рыбы.

Однако описанный механизм работает достаточно медленно, поэтому рыбы не переносят быстрого изменения глубины. Например, треска и хек при ловле тралом погибают, когда их быстро вытаскивают на поверхность [23, 98, 115, 140].

1.38. КАК РАБОТАЕТ ВАКУУМНЫЙ НАСОС

Воздушный вакуумный насос был изобретен в середине XVII в. бургомистром города Магдебург **Отто фон Герике** (1602–1686) для проведения своих знаменитых опытов с полшариями (см. ст. 1.22), хотя водяные насосы для тушения пожаров использовались еще раньше. Позднее устройство вакуумного насоса было усовершенствовано английским физиком **Р. Бойлем** (1627–1691) — одним из первооткрывателей газового **закона Бойля—Мариотта**.

Принцип работы вакуумных насосов, выкачивающих газ из емкостей в атмосферу, приведен на рис. 1.7. При движении поршня насоса справа налево впускной клапан за счет создаваемого разрежения открывается, а выпускной — закрывается. Когда поршень доходит до крайнего левого положения часть газа из выкачиваемой емкости заполняет цилиндр насоса, при этом устанавливается одинаковое давление по всему объему

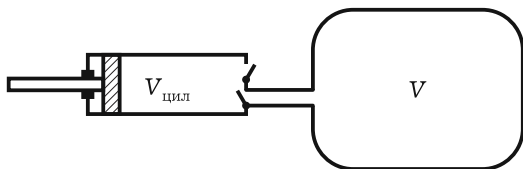


Рис. 1.7

системы «сосуд—цилиндр». При последующем ходе поршня вправо создаваемое избыточное давление закрывает впускной клапан и открывает выпускной, и поршень выталкивает газ из цилиндра в атмосферу.

Сколько же качаний нужно сделать этим насосом, чтобы давление в сосуде уменьшилось, допустим, от первоначально-го p_0 до некоторого конечного $p_{\text{кон}}$?

Пусть атмосферное давление тоже равно p_0 , т. е. давление в откачиваемом сосуде равно атмосферному (иначе можно было бы просто выпустить излишек газа из сосуда в атмосферу за счет перепада давлений). Рассмотрим первый ход поршня влево, при этом выпускной клапан закрыт, а впускной — открыт. В конце хода поршня давление газа в системе «сосуд—цилиндр» за счет увеличения общего объема уменьшается от первоначального значения p_0 до некоторого p_1 . Будем считать этот процесс изотермическим. Так как и масса газа при этом не меняется, то воспользуемся законом Бойля—Мариотта:

$$p_0 V = p_1 (V + V_{\text{цил}}), \quad (1.11)$$

где V — объем откачиваемого сосуда, $V_{\text{цил}}$ — объем цилиндра насоса. При последующем обратном ходе поршня впускной клапан закрывается, и газ из камеры насоса выталкивается наружу через выпускной клапан насоса.

При втором ходе поршня влево все повторяется точно так же, только давление в начале хода в сосуде равно p_1 . Обозначая давление в конце второго хода через p_2 , имеем

$$p_1 V = p_2 (V + V_{\text{цил}}).$$

Подставляя сюда p_1 из уравнения (1.11), находим

$$p_2 = p_0 \left(\frac{V}{V + V_{\text{цил}}} \right)^2.$$

Рассуждая дальше таким же образом, нетрудно убедиться, что после n ходов поршня давление в сосуде будет равно

$$p_n = p_0 \left(\frac{V}{V + V_{\text{цил}}} \right)^n.$$

По этой формуле определяется число качаний n , необходимое для того, чтобы понизить давление в сосуде до значения $p_n = p_{\text{кон}}$:

$$n = \frac{\lg(p_{\text{кон}}/p_0)}{\lg[V/(V + V_{\text{цил}})]}.$$

Сразу же возникает «соблазнительный» вопрос: а сколько качаний надо сделать, чтобы давление в сосуде обратилось в нуль? Для этого рассмотрим график зависимости давления p_n в сосуде от числа качаний n (рис. 1.8). Из него видно, что давление с каждым шагом уменьшается на все меньшее и меньшее значение и при достаточно большом числе качаний n может быть сделано сколь угодно малым. Тем не менее, понятно, что время полной откачки равно бесконечности.

Однако в действительности все намного хуже — для каждого насоса существует некоторое минимальное давление

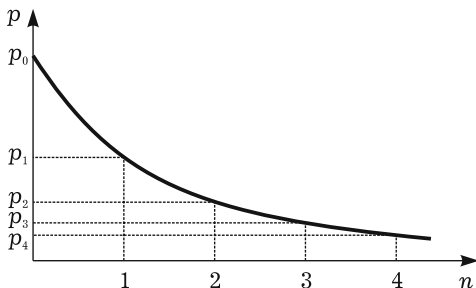


Рис. 1.8

$p_{\min}$, ниже которого он не может дать разрежение. Причины этому вполне прозаичные. Во-первых, это неидеальная работа (отсечка) клапанов. Но более существенной является вторая причина: когда поршень насоса движется вправо, выталкивая воздух из цилиндра в атмосферу, между поршнем и клапаном неизбежно остается пусть даже очень маленький, но конечный объем ΔV — из-за этого не весь газ из цилиндра будет вытолкнут в атмосферу. Все это постепенно замедляет откачку и в конце концов приводит к тому, что при некотором давлении в сосуде $p_{\min}$ насос вообще начинает работать вхолостую. Действительно, при давлении в сосуде $p_{\min}$ газ, сжатый при движении поршня вправо от первоначального объема цилиндра $V_{\text{цил}}$ до «вредного» объема ΔV , будет иметь давление не выше атмосферного p_0 и не сможет выйти наружу. Таким образом, для минимального давления в сосуде можно написать

$$p_{\min} V_{\text{цил}} = p_0 \Delta V, \quad \text{или} \quad p_{\min} = p_0 \frac{\Delta V}{V_{\text{цил}}}.$$

В конце необходимо отметить, что инженеры уже давно придумали способы бороться с «вредным» объемом откачивающих поршневых насосов: для получения больших разрежений используют несколько насосов, соединенных последовательно. В этом случае насос каждой последующей ступени откачивает воздух не в атмосферу, а в объем, из которого воздух откачивается насосом предыдущей ступени. Кроме того, существуют конструкции бесклапанных насосов, в которых, таким образом, устранено влияние неидеальности работы клапанов [20, 128].

1.39. САМОДЕЛЬНЫЙ НАСОС

В домашних условиях достаточно легко сконструировать водоструйный насос для выкачивания воздуха из емкостей. Кран на кухне есть в каждой квартире, а всасывающий воздушный насос может пригодиться для самых разнообразных практических целей: выпаривание жидкости под низким

давлением при низкой температуре (например, молоко), сушка продуктов (фруктов или грибов) и т. д.

Схема устройства водоструйного насоса изображена на рис. 1.9, где используется всасывающее действие струи жидкости (как в карбюраторах бензиновых двигателей внутреннего сгорания, только наоборот). Вода из водопровода проходит через узкий участок трубки 1, в котором скорость ее движения сильно возрастает, вследствие чего давление там становится меньше атмосферного. Благодаря этому через трубку, связанную с емкостью 2, засасывается воздух до тех пор, пока давление в емкости не становится равным давлению в суженной части трубки 1. Эвакуированный из емкости воздух уносится протекающей водой в сливную трубу 3 [43, 167].

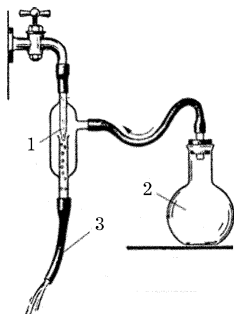


Рис. 1.9

1.40. УДОБНЫЙ ТЕРМОС

Всякий, кто пользовался термосом, знает, как долго надо его открывать — в целях сохранения тепла пробка термоса делается составной, состоящей из нескольких частей. Чтобы устранить такое неудобство распространение получили термосы, которые вообще не нужно открывать, — достаточно несколько раз нажать на специальную кнопку и из термоса потечет, например, горячий чай или кофе.

Схематически устройство такого термоса приведено на рис. 1.10. Принцип его работы основан в нагнетании особым насосом воздуха в объем над жидкостью. Теперь при открытии краника повышенное давление выдавливает жидкость через трубку наружу.

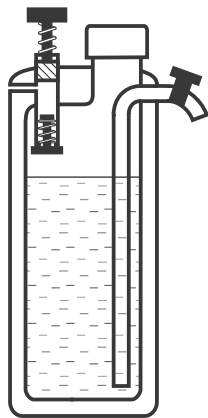


Рис. 1.10

У такого термоса есть и недостаток: при нагнетании внутрь попадает относительно холодный наружный воздух, что немного уменьшает температуру жидкости.

1.41. ОПЫТЫ С НАГРЕВОМ ВОЗДУХА

Вот вам три занимательных опыта, связанных с изменением давления воздуха внутри неизменного объема при изменении температуры, т. е. связанных с газовым законом Шарля.

Для первого опыта возьмите кусок плоского стекла длиной около 40 см и чисто вымойте его. Под один его край необходимо подложить два спичечных коробка, чтобы образовалась наклонная плоскость. Далее поставьте на стекло вверх дном тонкий стакан (толстый не годится — слишком тяжел, да и может треснуть при нагреве), предварительно смочив его края водой. Стакан, конечно, будет стоять на месте — наклон стекла очень мал.

Ну, а теперь совсем близко к стакану поднесите горящую свечу, чтобы нагреть воздух внутри него. И через некоторое время стакан начинает двигаться вниз по наклонной плоскости! Что же произошло?

Воздух в стакане нагревается, соответственно его давление повышается. Под действием этого давления стакан немного приподнимается, а зазор между стаканом и стеклом из-за поверхностного натяжения заполняется водой, которой смочены края стакана — стакан как бы повисает на водяной прослойке. При этом трение резко уменьшается, и стакан ползет (вернее, плавает) вниз.

Для второго опыта возьмите небольшую бутылочку с плотно входящей в нее пробкой. В пробку вставьте тонкую трубочку такой длины, чтобы она при закупоривании бутылочки доходила почти до ее дна и немного выступала из пробки сверху (на 15–20 мм).

Налейте в бутылку воды на две трети ее высоты, плотно закупорьте и поставьте на кусок мягкой резины (в крайнем случае можно поставить на мокрую бумагу). Затем возьмите 3-литровую стеклянную банку, подержите 4–5 с над открытым

огнем, чтобы набрать в нее теплого воздуха, а затем накройте ею бутылку, плотно прижав банку к резине. Через некоторое время вы увидите, как из трубочки в бутылке брызнет фонтанчик.

Объясняется этот опыт тем, что когда банка начинает остывать, то согласно закону Шарля падает и давление воздуха в ней. Однако давление воздуха в бутылочке практически не меняется и оказывается большим, чем в банке. Из-за разницы давлений воздух в бутылочке выдавливает воду наружу — так образуется фонтан.

Третий опыт можно оформить в виде эффектного фокуса. Для этого вы берете стеклянную трубку с оттянутым, как у пипетки, концом и показываете ее зрителям. Другой рукой берете за верхний край стакан с водой и тоже показываете его. Опускаете трубку оттянутым концом в стакан и ждете, пока в нее не войдет вода. Закрыв верхнее отверстие трубки пальцем, вы быстро вынимаете ее из стакана и переворачиваете — из трубки бьет мощный фонтан на высоту более метра.

Секрет фокуса очень прост: в стакане находится вода, нагретая до 80–90 °С, тогда как трубка имеет комнатную температуру около 20 °С. Когда в трубку из стакана попадает горячая вода, воздух в верхней части трубки в силу его плохой теплопроводности имеет практически комнатную температуру. После того как вы закроете пальцем верхнее отверстие трубки и трубку перевернете, горячая вода по стенкам начнет стекать вниз, быстро нагревая воздух. Давление воздуха в трубке возрастает и расширяющийся воздух «выбрасывает» через узкое отверстие трубки не успевшую опуститься вниз воду в виде фонтана.

Для этого опыта рекомендуется использовать стеклянную трубку диаметром 8–12 мм и длиной 30–40 см, маленькое отверстие которой имеет диаметр около 1 мм.

Высота фонтана зависит от разности температур воздуха и воды, набранной в трубку. Оптимальное количество набираемой в трубку воды колеблется в пределах от 1/4 до 1/3 объема трубки и легко подбирается экспериментально [30, 31, 77, 88, 94, 118].

1.42. ЗЕМЛЯ И ГАЗОВЫЕ ЗАКОНЫ

В цилиндре, наполненном воздухом, без трения может двигаться поршень массы m (рис. 1.11). В начальном состоянии объемы воздуха в двух частях цилиндра равны V_1 и V_2 . Как вы думаете, будет ли перемещаться поршень при повышении температуры окружающей среды?

Ответ на этот вопрос далеко не однозначный, как может показаться с первого взгляда, т.к. он зависит от ориентации цилиндра по отношению к Земле. Поэтому необходимо рассмотреть два случая: 1) цилиндр расположен горизонтально (рис. 1.11, а); 2) цилиндр расположен вертикально (рис. 1.11, б).

Ясно, что в обеих рассматриваемых ситуациях в любой момент должно выполняться условие механического равновесия (поршень должен быть неподвижен). Отсюда очевидно, что в любой момент при нагревании давления газов по обе стороны от цилиндра в первом случае должны быть равны ($p_1 = p_2$), а во втором случае — отличаться на величину давления силы тяжести поршня ($p_2 = p_1 + mg/S$, где S — площадь поршня). Также ясно, что поршень будет смещаться только в том случае, если при нагревании будет меняться соотношение между давлениями p_1 и p_2 , т.к. это вызовет соответствующие изменения объемов V_1 и V_2 для восстановления механического равновесия. Значит, нам надо выяснить, как во время нагревания будут меняться давления газов в двух частях цилиндра при фиксированных объемах V_1 и V_2 . Для этого воспользуемся **законом Шарля** для каждого из объемов газа по разные

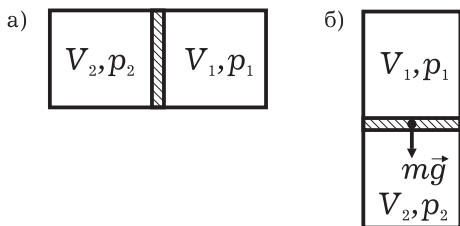


Рис. 1.11

стороны от поршня:

$$\frac{p'_1}{T'} = \frac{p_1}{T}, \quad \frac{p'_2}{T'} = \frac{p_2}{T},$$

где p_1, p_2 — давления газов до нагревания; p'_1, p'_2 — давления после нагревания; T, T' — температуры газов до и после нагревания. Из этих выражений получим

$$\Delta p_1 = p'_1 - p_1 = \left(\frac{T'}{T} - 1 \right) p_1,$$

$$\Delta p_2 = p'_2 - p_2 = \left(\frac{T'}{T} - 1 \right) p_2.$$

Из последних выражений видно, что изменение давления газа зависит от его начального значения.

При горизонтальном расположении цилиндра первоначально $p_1 = p_2$ и, следовательно, $\Delta p_1 = \Delta p_2$, что автоматически означает $V'_1 = V_1, V'_2 = V_2$, т.е. поршень останется в покое. При вертикальном же расположении цилиндра давление p_2 в его нижней части больше давления p_1 в верхней части на величину mg/S , поэтому $\Delta p_2 > \Delta p_1$, т.е. поршень поднимется вверх для восстановления механического равновесия [8].

1.43. СКРЫТАЯ КАТАСТРОФА

В цилиндре длины L под невесомым поршнем находится идеальный газ при температуре T_0 , а поверх поршня налита жидкость плотности ρ до полного заполнения цилиндра (рис. 1.12). Первоначально поршень находится на расстоянии x_0 от дна цилиндра. Газ равновесно (т.е. очень медленно) начинают нагревать, при этом поршень начинает подниматься, а жидкость — постепенно выливаться из трубки. Что такого особенного может случиться в этой системе при дальнейшем нагревании?

Первоначальное давление газа p_0 в цилиндре под поршнем можно определить из условия равновесия:

$$p_0 = p_{\text{атм}} + \rho g(L - x_0), \quad (1.12)$$

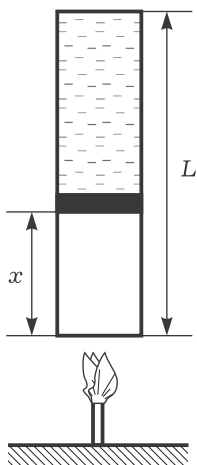


Рис. 1.12

где $p_{\text{атм}}$ — атмосферное давление. При нагревании газа до произвольной температуры T давление газа станет равным

$$p = p_{\text{атм}} + \rho g(L - x), \quad (1.13)$$

где x — текущее положение поршня относительно дна цилиндра. Так как количество газа под поршнем остается постоянным, то давления p_0 и p можно связать с помощью уравнения Клайперона:

$$\frac{p_0 V_0}{T_0} = \frac{pV}{T} \quad \text{или} \quad \frac{p_0 x_0}{T_0} = \frac{px}{T}. \quad (1.14)$$

Из трех соотношений (1.12–1.14) получим

$$p_{\text{атм}} + \rho g(L - x) = \frac{x_0}{x} \frac{T}{T_0} (p_{\text{атм}} + \rho g(L - x_0))$$

или

$$\frac{p_{\text{атм}}}{\rho g} + L - x = \frac{x_0}{x} \frac{T}{T_0} \left(\frac{p_{\text{атм}}}{\rho g} + L - x_0 \right). \quad (1.15)$$

Для упрощения записей и повышения наглядности введем обозначение $\tau = T/T_0$ — безразмерную температуру, показывающую степень нагрева газа относительно начального ($\tau \geq 1$). Также обозначим $\Lambda = p_{\text{атм}}/(\rho g) + L$, имеющую размерность длины. Тогда соотношение (1.15) примет вид

$$\Lambda - x = \frac{x_0}{x} \tau (\Lambda - x_0),$$

откуда для нахождения положения поршня x получаем квадратное уравнение

$$x^2 - \Lambda x + \tau x_0 (\Lambda - x_0) = 0.$$

Корнями этого уравнения будут

$$x_{1,2} = \frac{\Lambda \pm \sqrt{\Lambda^2 - 4\tau x_0 (\Lambda - x_0)}}{2}. \quad (1.16)$$

Необходимо проверить, оба ли решения физически допустимы. Для этого примем $\tau = 1$, что означает начальное состояние системы; в этот момент для положения поршня должно выходить $x = x_0$. Получаем

$$\begin{aligned} x_{1,2} &= \frac{\Lambda \pm \sqrt{\Lambda^2 - 4x_0(\Lambda - x_0)}}{2} = \\ &= \frac{\Lambda \pm \sqrt{\Lambda^2 - 4x_0\Lambda + 4x_0^2}}{2} = \\ &= \frac{\Lambda \pm \sqrt{(\Lambda - 2x_0)^2}}{2} = \frac{\Lambda \pm (\Lambda - 2x_0)}{2}. \end{aligned}$$

Отсюда видно, что $x = x_0$ при знаке « $-$ » перед квадратным корнем в решении (1.16). Значит, физически допустимым является решение

$$x = \frac{\Lambda - \sqrt{\Lambda^2 - 4\tau x_0(\Lambda - x_0)}}{2}. \quad (1.17)$$

Итак, мы постепенно нагреваем газ, параметр τ растет, разность под корнем в решении постепенно уменьшается, а числитель — увеличивается. Другими словами, при нагревании поршень поднимается все выше и выше, жидкость все выливается, и так до тех пор, пока поршень не достигнет верхнего положения и вся вода не выльется. Вроде бы ничего особенного, однако не торопитесь.

Давайте проанализируем решение (1.17). Проницательный читатель может заметить, что при некотором значении $\tau = \tau_{\text{кр}}$ подкоренное выражение может обратиться в нуль, а при дальнейшем увеличении τ — стать отрицательным. В таком случае из него нельзя будет извлечь квадратный корень (вернее, значениями квадратного корня будут комплексные числа) и наше решение перестает работать. Чему же это соответствует физически?

Вспомним, что газ мы нагреваем очень медленно, т. е. в любой момент газ и жидкость находятся в механическом равновесии. Поэтому тот факт, что решение (1.17) при

некотором $\tau = \tau_{\text{кр}}$ перестало работать, означает, что теперь равновесие газа и жидкости стало невозможным. К чему это приведет? К тому, что поршень самопроизвольно (уже без нагрева) начнет двигаться вверх, выталкивая жидкость, пока не выбросит ее всю. Произойдет качественное изменение состояния системы — **катастрофа** (другие употребительные термины — **бифуркация, режим обострения**). Физически понять это несложно. В какой-то момент жидкости в цилиндре останется настолько мало, а давление газа к этому моменту возрастет настолько, что система «газ-жидкость» окажется в состоянии неустойчивого равновесия. Теперь достаточно малейшего возмущения (например, еще чуть-чуть подогреть газ), чтобы система вышла из этого равновесия и газ резко (взрывоподобно) выбросил остатки жидкости.

Интуитивно понятно, что такой режим обострения может развиваться не всегда, а только при каких-то особых начальных условиях и параметрах системы. Поэтому продолжим анализ нашего решения.

Как уже было сказано выше, критическому состоянию соответствует нулевое значение подкоренного выражения в решении (1.17). В этот момент положение поршня равно $x_{\text{кр}} = \Lambda/2$. Понятно, что катастрофу мы сможем наблюдать только в том случае, если значение $x_{\text{кр}}$ окажется меньше значения высоты цилиндра L :

$$x_{\text{кр}} < L \quad \text{или} \quad \frac{\Lambda}{2} < L.$$

Вспомнив, что $\Lambda = p_{\text{атм}}/(\rho g) + L$, получим

$$p_{\text{атм}} < \rho g L. \quad (1.18)$$

Итак, чтобы в системе при нагревании осуществилась катастрофа, необходимо плотность жидкости ρ и высоту цилиндра L подобрать таким образом, чтобы выполнялось неравенство (1.18), иначе при возрастании температуры жидкость будет постепенно вытекать из цилиндра вплоть до самого ее верха, и никакой катастрофы не произойдет. Другими слова-

ми, гидростатическое давление жидкости, полностью заполняющей цилиндр, должно быть больше атмосферного давления. Кто читал статью 1.22. (на с. 45), тот сразу же поймет, что в случае воды при нормальном атмосферном давлении высота цилиндра должна быть не меньше 10 м, что сразу же делает проблематичным проведение опыта по наблюдению катастрофы. Другое дело — ртуть, тут достаточно высоты цилиндра больше 760 мм. Однако ртуть — жидкость, опасная для организма, так что она тоже отпадает.

В качестве практически приемлемого варианта для проведения опыта можно предложить использовать вместо жидкости мелкую свинцовую дробь. Так как плотность свинца равна $11\,300\text{ кг/м}^3$, что лишь немногим меньше плотности ртути ($13\,600\text{ кг/м}^3$), то можно будет обойтись цилиндром высоты порядка 1 м [68].

1.44. НАИБОЛЬШАЯ СКОРОСТЬ СНАРЯДА

Артиллеристы утверждают, что пушечный снаряд приобретает наибольшую свою скорость не в стволе орудия, а вне его, покинув жерло. Возможно ли это?

Это действительно так. Скорость артиллерийского снаряда должна возрастать все время, пока давление пороховых газов сзади превосходит сопротивление воздуха спереди. Очевидно, это условие выполняется до момента выхода снаряда из ствола орудия, поэтому его скорость при движении в стволе постоянно возрастает. Однако в первые мгновения пороховые газы продолжают давить на снаряд и вне ствола орудия, следовательно, скорость снаряда должна еще в течение некоторого времени расти. Только тогда, когда расширение пороховых газов в свободном пространстве приведет к уменьшению давления до того, что оно станет слабее сопротивления воздуха, снаряд будет подвержен спереди большему напору, чем сзади, и скорость его станет уменьшаться.

Итак, максимальной своей скорости снаряд действительно должен достигать не внутри орудия, а вне его на некотором расстоянии от жерла ствола, т. е. спустя короткий промежуток после того, как он уже покинул ствол орудия.

Кстати, для справки: давление пороховых газов в артиллерийском оружии достигает до 4000 атм. Это соответствует давлению водяного столба высотой в 40 км [95].

1.45. ЭФфуЗИЯ

Допустим, вы накануне празднования дня рождения своего друга купили два воздушных шарика: один — наполненный гелием, другой — воздухом. На следующий день после праздника вы увидите, что наполненный гелием шарик уже сдулся, а наполненный воздухом — еще нет. В чем дело?

Дело в **эффузии** — в медленном истечении газов через маленькие отверстия (в данном случае — через микроскопические отверстия в воздушном шарике). Существенным в эффузии является малость размеров отверстия по сравнению со средней длиной свободного пробега λ (со средним расстоянием, пробегаемым молекулой газа между двумя последовательными соударениями). В этом случае молекулы газа проходят через отверстие **без столкновения** с другими молекулами, что приводит к удивительным следствиям. В случае же больших размеров отверстий вся физика сводится всего лишь к выравниванию давлений по обе стороны от него.

Молекулярно-кинетическая теория позволяет оценить скорость истечения молекул газа при эффузии. Действительно, количество молекул, эффузирующих через отверстие, прямо пропорционально их количеству в сосудах около отверстия: $\Delta N_{\text{эфф}} \sim N$. Тогда скорость эффузии

$$\frac{\Delta N_{\text{эфф}}}{\Delta t} \sim \frac{N}{\Delta t} = \frac{nS\langle v \rangle \Delta t}{\Delta t} = nS\langle v \rangle,$$

где n — концентрация молекул в сосудах, откуда происходит истечение газа; S — площадь отверстия; $\langle v \rangle$ — средняя скорость молекул. Как известно, средняя скорость молекул пропорциональна квадратному корню температуры T и обратно пропорциональна квадратному корню молярной массы газа μ : $\langle v \rangle = \sqrt{8RT/(\pi\mu)}$. Тогда получим

$$\frac{\Delta N_{\text{эфф}}}{\Delta t} \sim nS \sqrt{\frac{8RT}{\pi\mu}} \sim nS \sqrt{\frac{T}{\mu}}. \quad (1.19)$$

Таким образом, скорость эффузии тем выше, чем выше концентрация газа и температура и чем меньше его молярная масса.

Впервые указанную выше закономерность выявил в 1829 г. шотландский химик и физик **Томас Грэм** (1805–1869). Математически он оформил свой закон (**закон Грэма**) в виде

$$\frac{\Delta N_{\text{эфф}}}{\Delta t} \cdot \sqrt{\mu} = \text{const}.$$

Понятно, что эффузия через малое отверстие будет происходить в обоих направлениях. Однако, как видно из (1.19), как только хотя бы один из параметров газов (n , T или μ), находящихся по разные стороны от отверстия, будут отличаться друг от друга, так сразу же будут различными и скорости эффузии в противоположных направлениях.

При прочих равных условиях более легкий газ быстрее эффузирует через отверстие, чем тяжелый. Вот почему резиновый шарик, наполненный гелием (с молярной массой 4 г/моль), сдуется за одну ночь, а шарик с воздухом (смесью, главным образом, азота с молярной массой 28 г/моль и кислорода с молярной массой 32 г/моль) остается надутым в течение нескольких дней. Тем не менее, шарик с воздухом тоже сдуется из-за разницы в концентрациях молекул внутри шара и в окружающей среде.

Чтобы не ждать целые сутки для наблюдения эффузии (как в случае с шариками выше), вы можете друзьям продемонстрировать другой более эффектный опыт. Для этого нужен керамический сосуд с пористыми стенками (не покрытый глазурью!). Внутри сосуда необходимо установить электрическую спираль с выведенными наружу проводами, чтобы при пропускании через нее электрического тока можно было нагревать воздух. Сосуд открытой стороной опускается в воду на некоторую глубину и закрепляется. Таким образом, в сосуде оказывается запертым некоторый объем воздуха, который можно нагревать с помощью спирали. Если теперь включить ток (например, от батарейки), то нагревающийся воздух начнет расширяться и вытесняться наружу, что можно наблюдать по пузырькам в воде. При достижении стационарного

состояния, когда подводимая спиралью теплота станет равной теплоте, отдаваемой поверхностью сосуда в окружающую среду, в сосуде установится определенная температура. Казалось бы, что при этом выход пузырей воздуха должен прекратиться. Так бы и произошло, если бы стенки сосуда были непроницаемыми для молекул воздуха, например, стеклянными или металлическими. Но если стенки сосуда пористые, то пузырьки воздуха будут выходить все время, даже тогда, когда температура воздуха в сосуде перестанет повышаться!

Действительно, из уравнения состояния идеальных газов $p = nkT$ видно, что концентрация молекул прямо пропорциональна давлению и обратно пропорциональна температуре: $n = p/(kT)$. Подставляя это выражение в (1.19), для скорости эффузии молекул через поры стенок керамического сосуда получим

$$\frac{\Delta N_{\text{эфф}}}{\Delta t} \sim \frac{p}{\sqrt{\mu T}}.$$

Давление воздуха внутри сосуда превышает наружное атмосферное всего на несколько сантиметров водяного столба, соответствующего глубине погружения отверстия сосуда под воду, так что их можно считать практически одинаковыми. Однако температура воздуха внутри сосуда выше, чем снаружи. Из-за этого, как видно из полученной формулы, скорость эффузии молекул внутрь сосуда выше, чем наружу. В результате в стационарном состоянии непрерывно входящий через поры в сосуд избыточный воздух нагревается, расширяется и выходит в виде пузырей.

Явление эффузии нашло применение для очистки газа, содержащего различные его изотопы. Изотопы — это атомы, ядра которых содержат одно и то же количество протонов (т. е. это одно и то же вещество), но различное количество нейтронов. Хотя у изотопов различные молярные массы, химически они никак не различаются, поэтому разделить их химическими методами невозможно. Эффузионный способ разделения изотопов состоит в каскадной эффузии газа через специальную систему малых отверстий. Таким образом, например, производится обогащение уранового топлива для ядерных реак-

торов изотопами ${}^{235}_{92}\text{U}$ (урановая руда в основном содержит изотопы ${}^{238}_{92}\text{U}$, не пригодные для ядерных реакций), для чего урановая руда предварительно переводится в газовое состояние [20, 101, 111, 136, 191].

1.46. ТЕРМОДИФфуЗИЯ

Если состав газовой смеси или жидкости не однороден, то тепловое движение молекул рано или поздно приводит к выравниванию концентрации каждой компоненты во всем объеме. Такой процесс называется **диффузией**. При диффузии всегда имеются так называемые **диффузионные потоки** вещества, величина и скорость которых определяются свойствами среды и градиентами концентраций. Скорость диффузии молекул $\Delta N/\Delta t$ описывается **уравнением Фика** (в честь немецкого физиолога **Адольфа Фика** (1829–1901), предложившего это уравнение в 1855 г.):

$$\frac{\Delta N}{\Delta t} = -D \frac{dn}{dz} S,$$

где dn/dz — градиент (быстрота изменения) концентрации молекул вдоль произвольного направления z ; S — площадь, через которую происходит диффузия; D — **коэффициент диффузии**, являющийся характеристикой диффундирующего вещества и зависящий, к тому же, от его состояния. Для газов

$$D = \frac{1}{3} \lambda \langle v \rangle = \frac{1}{3} \frac{kT}{\sqrt{2} \pi d_{\text{эфф}}^2 p} \sqrt{\frac{8RT}{\pi \mu}},$$

поэтому скорость диффузии в газах увеличивается с понижением давления и ростом температуры. Увеличение температуры также вызывает ускорение диффузионных потоков в жидкостях и твердых телах.

Кроме градиента концентрации, к возникновению диффузионных потоков приводит и наличие температурных градиентов в веществе — это так называемая **термодиффузия**, или **эффект Соре**, впервые открытая в 1879 г. швейцарским физиком **Ш. Соре**. Перепад температур в однородной по составу

смеси вызывает появление разности концентраций между областями с различной температурой, при этом в газах более легкая компонента газовой смеси скапливается в области с более низкой температурой. Таким образом, явление термодиффузии можно использовать для разделения газовых смесей, поэтому этот метод весьма ценен в промышленности.

И наоборот, при диффузионном перемешивании двух различных газов, находящихся при одинаковой температуре, наблюдается явление, обратное термодиффузии: в смеси возникает разность температур — это **эффект Дюфора**, впервые обнаруженный в 1873 г. швейцарским физиком **Л. Дюфором**. При диффузионном смешивании газов, составляющих атмосферный воздух, возникающая разность температур составляет несколько градусов [15, 49].

РАБОТА И ТЕПЛОТА. НАЧАЛА ТЕРМОДИНАМИКИ

2.1. ЭНЕРГИЯ И ЧЕЛОВЕЧЕСТВО

Роль энергии в жизни человечества исключительно велика, вернее сказать, без энергии ничего не было бы. Только для своей жизнедеятельности человек берет от природы в среднем около 2 000 килокалорий энергии в сутки, получая ее из потребляемой пищи. (Одна килокалория приблизительно равна 4 190 Дж; см. по этому поводу ст.ст. 2.26 и 2.27). Причем это потребление в течение миллиона лет с момента появления человека как биологического вида практически не изменилось (см. ст. 2.71).

Однако объяснить в двух словах, что такое энергия, практически невозможно. Это понятие формировалось постепенно, но уже на заре человечества люди понимали, что существует «нечто», являющееся эквивалентом их трудозатрат. Древние греки еще до нашей эры высказывали мысль о том, что это «нечто» является неуничтожимой сущностью природы и имеет свойство превращаться из одной формы в другую. (Эта мысль впоследствии стала основой для формулировки закона сохранения и превращения энергии.)

Исторически первыми начали формироваться представления **о механической энергии**. Это связано с тем, что с момента появления человека на Земле основным источником энергии была мускульная сила. Сперва человек пользовался только своими мускулами, затем куда более сильными мускулами прирученных животных — лошадей, быков, буйволов, верблюдов. Не гнушались и мускульной силой других людей — рабов.

Средняя продолжительность жизни человека составляла всего 20–25 лет. Из них лишь три года приходились на досуг и созидательную деятельность; остальное время уходило на сон, охоту, принятие пищи и обучение выживанию.

Однако как ни совершенны мускулы, с их помощью не сварить обеда и не выплавить металла. И стал человек использовать **тепловые источники энергии**, главным образом дрова (см. ст. 2.3). Научившись добывать огонь, наши предки стали брать у природы в 4–5 раз больше энергии, чем только с пищей, а к средним векам — уже в 20 раз больше. Продолжительность жизни человека увеличилась до 30–40 лет и уже почти четверть своей жизни он мог отдавать досугу и образованию.

К XVII в. катастрофическое вырубание лесов и малая эффективность дров как топлива снизили их роль и основным источником энергии стал **уголь**. К этому времени начали формироваться понятия **о химической энергии**, а также **об электрической и магнитной энергиях**. В первой половине XX в. **нефть** начала теснить уголь и к началу XXI в. ее доля в выработке энергии достигла одной трети. В качестве топлива также широко начали использоваться природный газ, горючие сланцы и торф. Потребление энергии человеком возросло в 800 раз по сравнению с потреблением первобытного человека! Это привело к тому, что средняя продолжительность жизни увеличилась до 70 лет. Почти половина жизни человека сейчас уходит на досуг и образование и только 8–10 лет — на работу.

К середине XX в. человечество начало осознавать, что запасы химической энергии в виде угля, нефти, газа и т. д. не безграничны, и необходимо искать альтернативные источники. Открытие **атомной энергии** не оправдало в полной мере надежды человечества на ее роль в качестве неиссякаемого источника, и сейчас ее доля в общем энергопотреблении человечества составляет всего лишь около 10%. Связано это с тем, что эксплуатация атомных станций сопряжена с определенным риском для живого на Земле, а отработанное топливо необходимо «хоронить» в специальных хранилищах, что само по себе может создать проблемы в будущем. К тому же

атомные станции также потребляют невозобновляемый природный ресурс — **уран**. В связи с этим в последнее время интенсивно развиваются отрасли энергетики, основанные на так называемых **возобновляемых источниках энергии** — ветра, геотермальных источников, солнечного излучения и т. д. Большие надежды возлагаются на **термоядерную энергетику**, хотя ее становление сопряжено со столь большими техническими трудностями, что ожидать ее расцвета в ближайшее время не приходится [11, 41, 60, 102, 154, 170].

2.2. ХИМИЧЕСКАЯ ЭНЕРГИЯ И СОЛНЦЕ

Мы настолько привыкли к тому, что тепловая энергия получается в результате горения различных топлив, что не задумываемся, откуда же берется эта энергия, ведь до горения топливо было холодным телом.

Энергия топлив — дров, угля, нефти, газа, взрывчатых веществ и т. д. — это энергия химической связи атомов в молекулах, т. е. энергия, запасенная в силовых полях атомов. Упрощенно внутримолекулярную энергию можно представить как энергию сжатых (или растянутых) пружин между атомами, которые в обычном состоянии не могут разжаться. Разумеется, химическая энергия — гораздо более сложная вещь, чем рассмотренная модель, но она иллюстрирует главную идею: атомы и молекулы запасают энергию, которая высвобождается при одних химических реакциях и пополняется при других.

Горение тоже является химической реакцией — это соединение молекул вещества с атомами кислорода, т. е. фактически — окисление. Как правило, при горении топлив потребляется кислород, содержащийся в атмосфере, однако есть вещества (например, порох, взрывчатые соединения), которые изначально в себе содержат запас кислорода для горения.

Нефть, уголь, бензин, горючий газ — все они содержат запас химической энергии, которая может быть превращена в теплоту и которая, в свою очередь, может быть преобразована в другие полезные формы энергии. Откуда же в них появился этот запас энергии?

Все эти топлива образовались из растений, которые росли сотни миллионов лет назад. Деревья и растения во время своего роста и развития поглощают лучистую энергию Солнца, и эта энергия содействует поглощению растительностью воды и углерода из углекислого газа, находящегося в воздухе, — это так называемый **фотосинтез**, открытый русским естествоиспытателем **К. А. Тимирязевым** (1843–1920). Уравнение фотосинтеза выглядит так:

$$\text{вода} + \text{углекислый газ} + \text{свет} \rightarrow$$
$$\rightarrow \text{углеводы} + \text{кислород}.$$

Поглощенный углерод в виде углеводов, в свою очередь, входит сложными путями в другие химические соединения и образует белки, крахмал, сахар, клейковину и т. д. Поэтому можно говорить, что деревья и растения трансформируют энергию Солнца в энергию химических связей, накапливая запасы углерода. Все операции по соединению воды и углекислого газа в более сложные молекулы (за счет энергии солнечного света) производятся такими «умными» молекулами растений, как **зеленый хлорофилл** (именно из-за хлорофилла листья растений зеленого цвета).

Таким образом, энергия любого вида топлива — это солнечная энергия, аккумулированная в форме химической. Сжигая топливо, мы выделяем солнечную энергию, которая когда-то была запасена в нем. В табл. 2.1 приведены данные (на конец 2010 г.) о соотношении запасов (разведанных и предполагаемых) между различными видами химического топлива, имеющимися на территории России (после перевода в эквивалентное условное топливо). Там же отражен вклад каждого из видов топлива в общее энергопотребление страны.

Кроме химической Солнце снабжает нас и другими видами энергии. Например, от Солнца же получают запас энергии ветроустановки, т. к. ветры возникают из-за неодинакового нагрева Земли Солнцем. Можно показать, что это верно и для других источников энергии — все наше энергоснабжение, в конечном счете, идет от Солнца. Человек, чтобы чувствовать себя в абсолютной безопасности, в конце концов неизбежно

Таблица 2.1

**Соотношение между запасами химического топлива
России и их вклад в общее энергопотребление
страны на конец 2010 г.**

Топливо	Доля (в %)	
	в запасах	в потреблении
Древесина	6	0,6
Торф	29	0,05
Уголь	43	18,25
Нефть	13	21
Газ	9	49,4

должен обратиться к самому естественному, самому проверенному, самой природой уготовленному для нас источнику — Солнцу.

Солнечное излучение приносит на Землю около 10^{17} Вт энергии, в то время как уровень производства энергии всей земной цивилизацией еще не достиг и 10^{13} Вт. Считается, что наиболее эффективно прямое преобразование солнечной энергии в электрическую с помощью термо- и фотоэлементов. Подсчитано, если бы на малой части пустыни Сахары (скажем, сравнимой с территорией Египта) при помощи соответствующего оборудования можно было бы использовать хоть 10% солнечной радиации, то этой энергии с лихвой хватило бы для нужд всей планеты.

Но у этого способа есть и большой недостаток, заключающийся в том, что солнечное излучение падает на Землю неравномерно и зависит от времени суток и времени года. Выходом из этой ситуации является использование емких аккумуляторов для запасаания в солнечный период вырабатываемой энергии и «умных» систем распределения электроэнергии в период отсутствия солнечного излучения. Другим решением может быть вынос энергоустановок в космос, где солнечная радиация постоянна и во много раз сильнее, чем на земной поверхности, с последующей передачей электроэнергии на Землю посредством направленного электромагнитного (лазерного) луча. Известен, например, американский проект

такой взвешенной радиационной энергоустановки мощностью 10 000 МВт, масса которой всего-то 25 т, стоимостью 20 млрд. долларов. Однако реализация проекта — все еще дело будущего [6, 11, 26, 41, 42, 51, 52, 85, 99, 108, 136, 154, 170].

2.3. ОГОНЬ И ЧЕЛОВЕК

Использование огня — одно из величайших открытий в жизни первобытного человека. Огню поклонялись как боже-ству, берегли его, наделяли волшебными свойствами, в честь огня совершали особые ритуалы, пережившие века. Огонь не только защищал от холода и диких зверей, с его помощью человек узнал вкус приготовленной пищи.

Вначале люди не умели сами добывать огонь, но его дарила природа: извержения вулканов, удары молний, лесные пожары. Наиболее ранние следы использования огня найдены в Восточной Африке на стоянке Чесованджа: их возраст — 1,3–1,6 миллиона лет. И судя по многометровым слоям пепла и золы, огонь в пещере поддерживали непрерывно в течение не одной сотни лет — ведь огонь был величайшей ценностью для первобытного человека.

И вот новое открытие: люди сами научились добывать огонь. По результатам последних исследований, случилось это около 700 тыс. лет назад. Об этом свидетельствуют находки археологов в долине реки Иордан. Там были найдены следы применения примитивных огнив: искру высекали ударами кремня о кремень.

Другим известным способом было добывание огня с помощью трения. Первобытное «огненное сверло» — круглую палочку — быстро вращали в углублении обрубка дерева, пока не начинали тлеть подложенные опилки или трут. Сначала вращение производили руками, но скоро для вращения палки люди каменного века начали использовать обернутую вокруг нее веревочку или тетиву лука. Таким способом можно было добыть огонь за считанные минуты, и его до сих пор употребляют некоторые дикие племена, существующие еще на Земле.

Но на протяжении почти всей истории человеческой цивилизации от 5 000 лет до н.э. вплоть до начала XIX в. самым

распространенным инструментом для получения огня было **огниво**. Огниво представляло собой железный брусок, которым ударяли по куску кремня для высекаания искры и поджигания легковоспламеняющегося фитиля. Принцип работы огнива дожил до наших дней — ведь он используется в современных зажигалках.

После того, как человек научился добывать огонь таким образом, прошло еще много времени, пока он смог делать это очень легко. Имеются в виду **спички** — еще одно удивительное изобретение человечества.

Первые спички появились лишь в начале XIX в. и они были серными. Зажечь такие спички было довольно хлопотно, ведь для воспламенения надо было привести их в соприкосновение с серной кислотой. Стоили спички очень дорого, кроме того, когда спичка погружалась в кислоту, она производила брызги. Поэтому через некоторое время спички модифицировали: к их концу начали привязывать маленькие стеклянные шарики с серной кислотой. Чтобы зажечь спичку, шарик разбивали, и спичка воспламенялась.

Потом появились фосфорные спички, головки которых состояли из смеси бертолетовой соли, белого фосфора и клея. Их достоинством было то, что для поджига не требовалась кислота — они легко воспламенялись при трении о шероховатую поверхность. Но это же был и их главный недостаток: если такую спичку уронить на пол или наступить на нее, то она может воспламениться. К тому же использовавшийся в головке спички белый фосфор ядовит как при ее производстве, так и при поджиге.

«Безопасные» («шведские») спички были изобретены сравнительно недавно: в 1855 г. шведский химик **Й. Лундстрем** нанес красный фосфор на поверхность наждачной бумаги и заменил им же белый фосфор в составе головки спички. Такие спички уже не приносили вреда здоровью, легко зажигались о заранее приготовленную поверхность и не самовоспламенялись. В таком виде спички дошли до наших дней.

Примерно в то же время — в середине XIX в. — появились и первые **зажигалки**, представлявшие собой фитиль, смоченный горючим (бензином, керосином), который

поджигался искрами, высекаемыми ударами металлического колесика по кремню. В начале XX в. австрийский химик **К. Вельсбах** опытным путем определил оптимальный состав сплава, из которого до сих пор делают кремни для зажигалок: железо с церием. Именно после этого усовершенствования зажигалки уменьшились в размерах, стали намного безопаснее и приобрели современный вид. В 1947 г. в Париже появились первые газовые зажигалки, в 70-е годы XX в. — электронные пьезозажигалки. А в 1986 г. фирма *Sagoma* создала первую в мире газовую турбо-зажигалку с противовеетровой системой защиты пламени.

Кроме рассмотренных выше способов добывания огня были и экзотические, например, концентрированием солнечных лучей с помощью линз или зеркал (вспомните **Архимеда**, который сжег таким образом римский флот). Однако они носили эпизодический характер и не получили широкого распространения [11, 72, 73, 110, 180, 216].

2.4. КАК ОТКРЫВАЛИ I НАЧАЛО ТЕРМОДИНАМИКИ

В современной формулировке **I начало термодинамики** выглядит следующим образом:

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

где ΔU — изменение внутренней энергии тела (суммарной энергии всех его молекул); ΔQ — количество переданной телу теплоты; A' — работа, совершенная над телом. Из этой формулы видно, что количество теплоты ΔQ и работа A' являются способами изменения внутренней энергии (энергии молекул) и в этом отношении эквивалентны друг другу. Эта эквивалентность обусловлена связью между теплом и движением.

На заре становления термодинамики как науки (вплоть до начала XIX в.) было известно лишь одно движение — механическое. Считалось, что движение и теплота никак не связаны между собой, и наличие у тел температуры обусловлено наличием в них невесомой жидкости — **теплорода**, пронизывающего всю объекты мира. Понятие теплорода в научный

оборот был введен в 1783 г. французским химиком **А. Л. Лавуазье** (1743–1794) — первооткрывателем химического состава атмосферы (см. ст. 1.22 на с. 45). Предполагалось, что при контакте тел теплород перетекает из одного тела в другое аналогично перетеканию жидкости в сообщающихся сосудах, поэтому у них устанавливается одинаковая температура (впоследствии это положение оформилось в **общее начало термодинамики**). Измерялось количество теплорода в **калориях** (кал). Хотя теория теплорода как несостоятельная была отвергнута еще в середине XIX в., ее наследием мы пользуемся до сих пор в виде оставшихся от нее терминов «количество теплоты», «теплоемкость», «теплопередача», «тепловой резервуар», «тепловой аккумулятор» — все эти термины связаны с теплотой как с чем-то содержащимся в теле, т. е. по существу с «теплородом» (см. следующую статью).

Первые догадки о том, что тепло и движение связаны между собой, появились в XVIII в. Еще в 1744 г. великий русский ученый **М. В. Ломоносов** (1711–1765) в своей диссертации «Размышления о причине теплоты и стужи» высказал предположение о такой связи, причем используя не понятие теплорода, а представление о мельчайших частицах, из которых состоят все вещества. Доводы Ломоносова повлияли на **Л. Эйлера** (1707–1783), в 1752 г. написавшего: «То, что теплота заключается в некотором движении малых частиц тела, теперь уже достаточно ясно». Позднее, в 1798 г., английский физик **граф Румфорд** (1753–1814), наблюдая за изготовлением пушечных стволов на оружейном заводе, заметил, что при сверлении ствол сильно разогревается. Проведя собственные эксперименты, он показал связь между механической работой и теплотой и тоже рассматривал эту связь как результат особого вида движения частиц материи. В 1799 г. английских физик и химик **Г. Дэви** (1778–1829) произвел опыты по трению кусков льда в безвоздушном пространстве, которые тоже свидетельствовали о связи между теплом и механической работой. Сам Г. Дэви объяснял эту связь опять же с атомистический точки зрения.

Однако теория теплорода оказалась живучей, и в значительной степени из-за этого с таким трудом устанавливалась

связь между теплотой и движением. Открытие первого начала термодинамики неразрывно связано с именем **Юлиуса Роберта Майера** (1814–1878) — немецкого естествоиспытателя и врача, основателя термодинамики. История эта печальна и поучительна.

После окончания в 1838 г. Тюбингенского университета со званием доктора медицины Р. Майер, не желая работать простым провинциальным медиком, устраивается на торговое судно врачом и отправляется на остров Ява. В этом путешествии Майер начинает свою научную деятельность — проводит наблюдения над морскими водорослями, различными породами рыб и птиц, цветом моря и неба.

Однажды штурман корабля сказал ему, что во время сильной бури вода нагревается. Майер занес замечание штурмана в свой дневник и с этой путевой записи у Майера зародилась мысль о связи между теплотой и движением. Вскоре его мысль подтвердилась другим фактом. Выполняя обязанности врача, Майер делал переливание крови заболевшим матросам. У берегов Явы он заметил, что цвет венозной крови матросов стал значительно светлее, чем он был в Европе. Майер правильно понял, что процессы окисления в жарком климате происходят медленнее, так как организму требуется меньшее количества теплоты. Он также интуитивно понимал, что энергия окисления пищевых продуктов расходуется не только на поддержание постоянной температуры тела, но и при совершении им механической работы. А это означало, что должно существовать определенное соотношение между количеством теплоты, образующимся в организме, и механической работой, которую человек совершает в течение определенного времени, т. е. определенному количеству теплоты должно соответствовать определенное значение совершенной механической работы. С этого момента Майер весь поглощен новой идеей, которая становится содержанием его жизни.

По возвращении на родину в 1841 г. Майер пишет статью «Количественное и качественное определение сил» и отправляет ее в физический журнал «*Annalen der Physik und Chemie*», однако ее не печатают. Написав новый вариант статьи под названием «Замечания о неодушевленных силах при-

роды», Майер в 1842 г. добивается ее опубликования в другом журнале. С точки зрения современной физики Р. Майер в своих работах исследовал превращения известных в то время видов энергии и фактически сформулировал закон сохранения и превращения энергии. Но ученый мир не обращает внимания на его статью, и этому в значительной степени способствовала царившая в то время неразбериха в физических понятиях — ведь слово «энергия» в то время еще не применялось. Все крупные ученые, изучавшие в то время превращения одних видов движения в другие (Д. Джоуль, Г. Гельмгольц и др.), в своих работах писали о «превращениях силы» и о «сохранении силы», фактически подразумевая под словом «сила» энергию. Все это порождало путаницу и лишало ясности изложение мыслей Майера.

В 1845 г. Р. Майер публикует новую работу «Органическое движение в связи с обменом веществ», где рассматривает различные энергетические превращения и объясняет, почему теплоемкость газа при постоянном давлении не равна теплоемкости газа при постоянном объеме. На основе этого он теоретически (!) определяет **механический эквивалент теплоты**, т. е. вычисляет количество теплоты, по своей величине равного единице механической работы.

Он рассуждал следующим образом. Мысленно запрем $V = 1 \text{ см}^3$ воздуха при температуре 0°C в трубке с площадью поперечного сечения $S = 1 \text{ см}^2$ столбиком ртути высотой $h = 760 \text{ мм}$. Нагреем теперь этот воздух на $\Delta t = 1^\circ\text{C}$, т. е., по тогдашним представлениям, передадим ему некоторое количество теплоты.

Очевидно, что процесс этот будет изобарным, так как давление запертого воздуха все время будет равно давлению столба ртути плюс внешнее давление. При нагревании газ согласно закону Гей-Люссака увеличит свой объем на $1/273 \text{ см}^3$. Поскольку расширяться он может только вверх, тем самым он поднимет столб ртути на $\Delta h = 1/273 \text{ см}$, совершив при этом механическую работу $A = m_{\text{рт}} g \Delta h$. Массу ртути $m_{\text{рт}}$ можно выразить через ее плотность ($\rho_{\text{рт}} = 13,6 \text{ г/см}^3$) и объем, а объем — через поперечное сечение трубки S и высоту столба ртути h , тогда

$$A = \rho_{\text{рт}} S h g \Delta h = 13,6 \cdot 1 \cdot 76 \cdot 981 \cdot \frac{1}{273} =$$

$$= 3714 \text{ ед. мех. работы.}$$

С другой стороны, количество теплорода, которое получит воздух при нагревании, можно определить через (известное в то время) значение теплоемкости воздуха при постоянном давлении $c_p = 0,238 \text{ кал/(г} \cdot ^\circ\text{С)}$. Действительно, плотность воздуха при нормальных условиях $\rho_v = 0,00129 \text{ г/см}^3$, тогда затраченное на нагревание воздуха количество теплорода будет

$$\Delta Q_p = c_p m \Delta t = c_p \rho_v V \Delta t =$$

$$= 0,238 \cdot 0,00129 \cdot 1 \cdot 1 = 3,07 \cdot 10^{-4} \text{ кал.}$$

Во втором случае, говорит Майер, запрем $V = 1 \text{ см}^3$ воздуха в неизменном объеме и опять же нагреем его на $\Delta t = 1 ^\circ\text{С}$. Понятно, что в этом случае механическая работа не совершается, а количество переданного теплорода равно $\Delta Q_v = c_v m \Delta t$. Майеру было известно, что теплоемкости газов при постоянном давлении и постоянном объеме различны, причем для воздуха отношение c_p/c_v составляет 1,4, следовательно,

$$\Delta Q_v = c_v m \Delta t = \frac{c_p m \Delta t}{1,4} = 2,19 \cdot 10^{-4} \text{ кал.}$$

Значит, заключает Майер, количество теплорода, равное $\Delta Q_p - \Delta Q_v = 0,88 \cdot 10^{-4} \text{ кал}$, в первом опыте идет на совершение механической работы. Другими словами, на каждую калорию теплорода приходится количество единиц механической работы, равное

$$\frac{A}{\Delta Q_p - \Delta Q_v} = \frac{3714}{0,88 \cdot 10^{-4}} \approx 42\,000\,000$$

(в современных единицах энергии это значение равно 4,2 Дж/кал). Правда, Майер на основании известных, но

недостаточно точных в его время значений теплостойкостей воздуха c_p и c_v получил значительно меньшую величину, чем то, которое мы привели выше.

К подобным же результатам пришел в 1843 г. английский ученый-экспериментатор **Дж. П. Джоуль** (1818–1889), правда, немного другим путем. Джоуль вначале заинтересовался выделением тепла в проводе, по которому течет электрический ток (**закон Джоуля—Ленца**), что побудило его заняться изучением связи между теплотой и работой. В результате он делает вывод: «Во всех случаях, когда затрачивается механическая сила, получается точное эквивалентное количество теплоты». В 1845 г. на основании многочисленных опытов Дж. П. Джоуль тоже публикует значение механического эквивалента теплоты, причем намного более точное, чем у Майера.

В результате всего этого между двумя великими учеными возникает спор о первенстве открытия механического эквивалента теплоты (фактически, спор о первенстве открытия закона сохранения и превращения энергии!).

В 1848 г. Майер публикует в газете заметку «Важное физическое открытие», где еще раз повторяет свои идеи для широкого круга читателей, но она была не понята читателями. В это время досадный спор между Майером и Джоулем о первенстве открытия закона сохранения энергии разгорелся в полную силу и обсуждение газетной заметки приняло характер травли ее автора. Надо отдать справедливость Майеру — он проявил при этом корректность и выдержку, но вся эта история обострила его нервное состояние. Вдобавок ко всему стали невыносимыми домашние условия: у него умирают две дочери, он ссорится со старшим братом, члены семьи настроены против него. К тому же власти нелепо обвиняют его в шпионаже.

Не в силах выдерживать дольше эти мучения, он решает покончить жизнь самоубийством и в 1850 г. ночью выбрасывается из окна своей спальни, но остается жив. Попытки опровержения возводимой на него клеветы ни к чему не приводят — газеты их не печатают. Чтобы ответить своим врагам, он написал и выпустил за свой счет брошюру «Замечания о механическом эквиваленте тепла». Это вывело из терпения

его семью и на семейном совете его решают отправить в психиатрическую больницу. Майер дает согласие на лечение, но предупрежденные родственниками врачи просто запирают его в одиночной камере. Тринадцать месяцев, проведенные в доме умалишенных, сломили сопротивление Майера.

В 1854 г. Майер был выпущен на свободу. Прежний «блаженный» стал жить, как все добропорядочные граждане, и даже заниматься врачебной практикой. Но время не только сломало сопротивление Роберта Майера — оно принесло, наконец, и признание его заслуг. В Швейцарии Майера избирают почетным членом Общества естествоиспытателей. В Англии признают за Майером приоритет и славу творца закона сохранения энергии, за что Лондонское королевское общество присуждает Майеру медаль. Во Франции он избирается членом Парижской Академии наук. Поздно! Только в 1862 г. Майер смог возобновить свою научную деятельность, но ничем больше не обогатил науку. 20 марта 1878 г. Роберт Майер умер от воспаления легких.

Более строго открытый Майером закон об эквивалентности движения и теплоты был обоснован в 1847 г. немецким ученым **Г. Гельмгольцем** (1821–1894) с позиций о природе теплоты как о механическом беспорядочном движении молекул.

В 1853 г. английский физик **У. Ранкин** (1820–1872) в статье «Об общем законе превращения энергии» узаконивает использование термина «энергия» (от греч. *энергейя* — деятельность, способность ее осуществить), предложенного еще в 1807 г. английским ученым **Т. Юнгом** (1773–1829), и формулирует закон сохранения энергии в следующем виде: «Сумма всей энергии (потенциальной и кинетической) во Вселенной остается неизменной». С этого времени термин «энергия» и закон сохранения энергии входят во всеобщее употребление.

Впоследствии **Р. Клаузиус** (1822–1888) и **Кельвин** (У. Томсон) (1824–1907) систематически развили теоретический аппарат термодинамики, оформив закон сохранения энергии в первое начало термодинамики [9, 12, 19, 35, 47, 66, 116, 121, 168, 169, 191].

2.5. О ТЕРМИНАХ ТЕРМОДИНАМИКИ

Само слово «термодинамика» состоит из двух греческих слов: «терме», что означает теплота, и «динамис», что переводится как сила или работа. Таким образом, термодинамика — это тепловая работа или тепловая сила. Слово это впервые встречается в статье **У. Томсона (лорда Кельвина)** (1824–1907), опубликованной в 1854 г., и заменило первоначальное название «механическая теория тепла».

Как указывалось в предыдущей статье, многие термины в термодинамику перешли из теории теплорода, и это иногда становится причиной недоразумений в понимании формулы $\Delta U = \Delta Q + A'$, выражающей первое начало термодинамики.

Чтобы исключить ошибки при анализе энергетических преобразований, нужно совершенно четко представлять разницу между внутренней энергией, **содержащейся** в каком-либо теле, и энергией, **подводимой** к нему (или **отводимой** от него).

Подводимая (или отводимая) энергия существует **только** тогда, когда передается от одного тела к другому. Передача энергии может происходить в двух формах: теплоты ΔQ и работы A' . Таким образом, общность теплоты и работы определяется тем, что они представляют собой количественную меру передаваемой энергии.

Однако между теплотой и работой есть и существенная разница.

Работа — это передача энергии в организованной форме, при которой каждая частица совершает движение по определенной траектории. В общем случае работа может быть не только механической, но и электрической, магнитной и т. д. Если, например, происходит передача механической энергии газу посредством движения поршня в цилиндре, то каждая молекула поршня совершает движение строго по прямой линии, и молекулам газа от молекул поршня передаются импульсы, тоже направленные по этой линии.

Напротив, передача энергии **в форме теплоты** совершается хаотическим движением частиц. При контакте двух тел с разными температурами молекулы тела, имеющего более высокую температуру, «раскачивают» молекулы более холодного

тела так, что средняя скорость первых уменьшается, а вторых увеличивается. В результате определенное количество энергии передается от первого тела ко второму.

Таким образом, и теплота, и работа — это энергия в процессе передачи и она не может «содержаться» (как теплород) в телах. Другими словами, тот факт, что теплота переходит от одного тела к другому, вовсе не означает, что она сначала содержалась в одном, а потом стала содержаться в другом теле.

Следовательно, **превращение работы в теплоту** означает, что система, получившая энергию в форме работы от какого-либо тела, превращает его сначала во внутреннюю энергию, а затем отдает ее другому телу в форме теплоты, и наоборот. Например, затрачивая механическую работу по встряхиванию бутылки с жидкостью, мы увеличиваем внутреннюю энергию этой жидкости (что выражается в повышении ее температуры). Затем, приведя бутылку в контакт с другим более холодным телом, мы можем уменьшить внутреннюю энергию жидкости отведением теплоты (что выражается в понижении температуры жидкости) [19, 35, 90, 121, 169, 170].

2.6. РАБОТА ПРИ ИЗОТЕРМИЧЕСКОМ ПРОЦЕССЕ

При изотермическом сжатии идеального газа его температура не изменяется и, следовательно, не изменяется кинетическая энергия его молекул. Так как между молекулами идеального газа по определению нет взаимодействия, то при сжатии не изменяется и потенциальная энергия молекул. Но мы знаем, что сжатый газ может совершить работу, т.е. обладает дополнительной энергией. Откуда же берется энергия для совершения работы?

Все дело в том, что изотермический процесс не может осуществляться в теплоизолированной системе — наоборот, система должна быть термодинамически связана с окружающей средой и «кто-то» за счет теплопередачи должен поддерживать температуру неизменной. Поэтому, рассматривая внутреннюю энергию идеального газа при изотермическом процессе, сле-

дует учитывать переход энергии от окружающей среды к газу и от газа к среде.

Вообще говоря, сжатый идеальный газ, расширяясь, может совершить работу в двух случаях. Во-первых, за счет уменьшения своей внутренней энергии (т.е. кинетической энергии молекул). Однако при этом температура будет соответственно уменьшаться, т.е. это не будет изотермическим процессом. Во-вторых, работа может совершаться изотермически, но газ при этом черпает энергию из окружающей среды и работа будет совершаться за счет уменьшения внутренней энергии окружающей среды. Противоречие, сформулированное в начале статьи, разрешается тем, что энергия, затраченная на изотермическое сжатие газа, была передана не газу, а окружающей среде [7, 137].

2.7. КИПЯЩИЙ СЛОЙ

Известны 3 основных вида теплообмена — **конвекция**, **излучение** и **теплопроводность**, которые в настоящее время находят широкое применение в промышленности. Однако прямое их использование не всегда экономически выгодно, и тогда приходится «хитрить».

Например, во многих производствах требуется нагревание металлических изделий. Для этого существует традиционная система нагрева — посредством обдувания изделия газообразными продуктами сгорания различных газовых или жидких топлив. Однако газ скорее можно назвать изолятором, чем проводником тепла: коэффициент его способности передавать тепло в сотни раз меньше, чем у жидких металлов или расплавов солей.

Намного эффективнее использование для теплообмена кипящей **псевдожидкости** (другое название — **кипящий слой**), представляющей собой взвесь твердых частиц, осуществляющих хаотическое движение в потоках нагретого газа (пламени), поступающего снизу. Газообразные продукты сгорания топлива первоначально отдают тепло твердым частичкам, а уже те — металлу. В качестве псевдожидкости можно использовать, например, обычный песок. Хотя сам песок получает

тепло все от того же теплоизолятора — газа, но суммарная поверхность песчинок огромна, и в значительной мере благодаря этому они отбирают у пламени во много раз больше тепла, чем сумела бы отнять нагреваемая заготовка. Поэтому псевдожидкость обладает удивительным теплотехническим свойством: контактируя с нагреваемой деталью со скромной скоростью всего 1 м/с, она передает теплоту столь же эффективно, как и движущийся со сверхзвуковой скоростью чистый нагретый газ. Поэтому применение псевдожидкости для высокотемпературного нагрева металла позволяет резко уменьшить расход топлива в производстве.

На этом же принципе работают высокоэффективные котлы для сжигания твердых топлив, например, угля. Продуванием через объем котла под большим давлением воздуха организуется кипящий слой, состоящий на 90% из песка. В этот слой, разогретый пламенем газовой горелки, и подается угольная пыль. Частицы угля горят и передают свое тепло песчинкам. Благодаря хорошей теплоотдаче поддерживается невысокая температура слоя — всего 800–850 °С. Каждая крупинка топлива достаточно долго находится во взвешенном слое и успевает сгореть полностью. Тепло от частиц передается трубкам парогенератора, пронизывающим кипящий слой.

Кстати, в топках с кипящим слоем можно сжигать не только уголь, но также торф, дерево, резину, битумные сланцы, опилки и городские отбросы. Если же в топку добавлять пылевидные частицы доломита или известняка, то они вступят в реакцию с окислами серы и образуют сульфат кальция, удаляемый с золой. А это очень эффективный способ уменьшения выбросов серы [49, 102].

2.8. ОПАСНАЯ ПЫЛЬ

Для некоторых промышленных предприятий опасность взрыва пыли весьма серьезна. Например, на мукомольных заводах принимаются очень серьезные меры для избежания накопления статического электричества, на их территории запрещено пользоваться открытыми источниками огня — все

из-за того, что малейшая искра может привести к взрыву. Почему искра вызывает взрыв имеющейся в воздухе пыли?

По закону Фурье скорость передачи теплоты зависит от площади прямо пропорциональным образом:

$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = \kappa \frac{dT}{dz} S, \quad (2.1)$$

т. е. чем больше площадь теплопередачи, тем больше в единицу времени передается количество теплоты. С другой стороны, из определения теплоемкости следует, что при одном и том же количестве переданной теплоты температура в большей степени изменится у того тела, масса которого меньше:

$$\Delta T = \frac{\Delta Q}{c_{уд} m} = \frac{\Delta Q}{c_{уд} \rho V}. \quad (2.2)$$

Из формул (2.1) и (2.2) получаем, что быстрота повышения температуры равна

$$\frac{\Delta T}{\Delta t} = \frac{\kappa}{c_{уд} \rho} \frac{dT}{dz} \frac{S}{V} \quad \text{или} \quad \frac{\Delta T}{\Delta t} \sim \frac{S}{V}. \quad (2.3)$$

В предыдущей статье мы уже говорили, что отношение суммарной площади поверхности к суммарному объему у распыленного вещества намного больше, чем у того же вещества, сжатого в цельный комок. Поэтому любая искра или вспышка мгновенно нагревают отдельные частицы пыли до температуры воспламенения. Избыток воздуха способствует тому, что сгорание происходит подобно взрыву.

Например, достаточно уронить пакет с мукой так, чтобы концентрация муки в воздухе составила более 50 г/м^3 , а потом «случайно» зажечь спичку — неминуемо раздается взрыв. Такие взрывы довольно часто происходят на элеваторах и иногда сопровождаются жертвами. Происходит это из-за того, что в муке много крахмала, а крахмал — это много-много молекул сахара, соединенных между собой. Каждая же из молекул сахара «хорошо» сгорает в воздухе, превращаясь в углекислый газ и воду и выделяя при этом большое количество теплоты,

что в условиях распыления муки приводит к взрыву (детонации).

Вышесказанное же является причиной прекращения авиалетов во время выбросов вулканического пепла. Вулканический пепел представляет собой песок, на две трети состоящий из силикатов (диоксида кремния). В чистом виде это хорошо всем знакомый кварц, с добавками — обычное стекло. Частицы пепла имеют размер от десятков миллиметров до единиц микрометров и меньше. Пепел может выбрасываться на высоту до нескольких десятков километров, при этом крупные частицы сохраняются в атмосфере неделями, мелкие — месяцами. Обычно температура плавления силиката чуть-чуть превышает 1000°C , однако для частиц пепла она снижается до 500°C . Поэтому, попадая в авиационный двигатель, пепел легко плавится, спекается и прилипает к частям двигателя, например, к лопаткам турбин, нарушая механический баланс. При этом пепел может образовывать агрессивные сплавы с материалами двигателя и прожигать его детали [11, 124, 140].

2.9. ПАЯЛЬНИК И МЕДЬ

Если вы интересуетесь радиотехникой и любите паять, то могли заметить, что жало паяльника всегда делается из меди. Никакой другой металл не может ее заменить. Какие же свойства меди делают ее исключительно удобным материалом для паяльников?

Медь как простой (чистый без примесей) металл известна в технике и быту под названием **красной меди** благодаря ее характерному красноватому цвету. Красная медь обладает большой удельной теплоемкостью: $400 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot^{\circ}\text{C})$, благодаря чему при нагреве медного паяльника ему сообщается большое количество теплоты и при последующей пайке температура паяльника практически не меняется.

Однако более дешевое железо обладает еще большей теплоемкостью ($460 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot^{\circ}\text{C})$) и, тем не менее, все-таки выгоднее использовать медь. Почему?

Кроме большой теплоемкости, у меди есть другое ценное свойство — большая теплопроводность: $390 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ (у же-

леза лишь 75 Вт/(м·К)). Благодаря этому медный паяльник намного быстрее отдает большое количество теплоты припою (олову), который нужно расплавить.

Другим материалом, обладающим столь же необходимыми качествами, является серебро, но оно слишком дорого [79, 157].

2.10. ОДЕЖДА МЕТАЛЛУРГОВ

В трудных условиях приходится работать сталеварам, имеющим дело с расплавленным металлом, — его горячее дыхание буквально обжигает человека. Казалось бы, что для облегчения условий труда костюмы доменщиков, мартенщиков и других металлургов должны изготавливаться из материалов с низкой теплопроводностью. Между тем на самом деле спецодежда металлургов часто покрывается тонким слоем металла — великолепного проводника тепла. С какой целью так поступают?

Дело в том, что передача тепла от раскаленного металла к человеку происходит главным образом через **электромагнитное излучение**. Максимум энергии излучения при температуре расплавленного металла несут **инфракрасные лучи**, которые, как и вообще электромагнитные волны, очень сильно отражаются металлами. Это и дает ответ на вопрос, зачем металлизуют одежду сталеваров [70].

2.11. О ФОРМЕ ЧАЙНИКА

Почти каждый день мы пользуемся чайниками — приятно с утра выпить чашку вкусного бодрящего чая. Но обращали ли вы внимание на форму чайника? Почему чайники почти всегда имеют шарообразную форму — фактически представляют полусферу? Между тем кастрюли для готовки пищи всегда имеют цилиндрическую форму. Почему?

Любой работник фабрики, где выпускают чайники, скажет, что полусфера — самая оптимальная форма для него. Связано это с тем, что от чайника нам требуется как можно быстрее вскипятить воду. А она вскипает тем быстрее, чем больше по-

верхность нагрева, т. е. дно чайника. Одновременно требуется, чтобы охлаждение чайника вследствие излучения было минимальным. Излучение же тем меньше, чем меньше поверхность чайника. При одном и том же объеме поверхность шара наименьшая, вот почему верхняя (не нагреваемая) часть чайника и имеет шарообразную форму.

К кастрюле требования немного другие: во время варки пищи нам нужно не только довести воду до кипения, но и определенное время поддерживать его. При этом в процессе готовки приходится многократно открывать кастрюлю: пускать в нее продукты, проверять готовность и т. д. Для этого удобна широкая, цилиндрическая форма. Некоторая потеря тепла вследствие излучения с боковой поверхности кастрюли в этом случае не столь существенна [103].

2.12. КТО ОТКРЫЛ II НАЧАЛО ТЕРМОДИНАМИКИ

Второе начало термодинамики является постулатом, не доказываемым в рамках термодинамики. Оно было создано на основе обобщения опытных фактов и получило многочисленные экспериментальные подтверждения. Открытие II начала термодинамики связано с именем французского инженера **Садй Карно** (1796–1832) и исторически это случилось раньше, чем открытие I начала (см. ст. 2.4 на с. 102).

Садй Карно родился 1 июня 1796 г. в Париже. В 1812 г. он поступил в Политехническую школу, созданную Конвентом — законодательным органом Франции во время Великой французской революции. Эта школа ставила своей задачей подготовку гражданских и военных инженеров, в которых нуждалась молодая республика. (Первыми профессорами Политехнической школы были лучшие ученые того времени: Лагранж, Ашет, Прони, Бертолле; из Политехнической школы вышла целая плеяда знаменитых математиков, физиков и инженеров: Ампер, Араго, Гей-Люссак, Пуассон и др.)

В конце 1814 г. С. Карно окончил Политехническую школу и, получив назначение в инженерные войска, участвовал в защите наполеоновского Парижа от союзных войск (в число

которых входили и русские войска). В 1819 г. в чине поручика он перешел на службу в Генеральный штаб корпуса инженерных войск.

Молодой офицер, страстный любитель музыки и вообще искусства, неутомимый спортсмен и фехтовальщик, С. Карно находил время для занятий науками, историей и политической экономией. Он посещал лекции в Сорбонне, Коллеж де Франс, Консерватории искусств и ремесел. В Париже Карно знакомится с химиком **Николя Клеманом** (1779–1841), занимавшимся изучением газов. Общение с ним вызвало у Карно интерес к изучению паровых машин.

Хотя паровые двигатели появились еще в начале XVIII в. (см. ст. 2.36 на с. 171), они имели очень низкий коэффициент полезного действия (не более 2%). Это навело Карно на мысль исследовать причины столь явного несовершенства тепловых машин и найти пути их совершенствования. И в 1824 г. вышла первая и единственная работа Карно «Размышления о движущей силе огня и о машинах, способных развивать эту силу», которую он издал на свои средства. Эта работа обессмертила его имя.

В своем исследовании Карно исходил из господствовавшей в то время ошибочной теории теплорода и рассматривал работу тепловой машины как работу, производимую при движении теплорода от тела с более высокой температурой к телу с более низкой температурой. Главная идея Карно состояла в том, что работа тепловой машины зависит не столько от количества переходящего теплорода, сколько от разницы температур горячего и холодного тел. Он писал: «Недостаточно создать теплоту, чтобы вызвать появление движущей силы: нужно еще добыть холод — без него теплота стала бы бесполезной. В самом деле, если бы вокруг нас были тела только такие же горячие, как и топка, каким же образом можно было сконденсировать пар? Куда бы его деть, раз он получен? Не следует думать, что его можно, как это практикуется в некоторых машинах, выбросить в атмосферу: атмосфера не приняла бы его. Она принимает его в обычных условиях, потому что выполняет роль большого холодильника, потому что она находится при более низкой температуре. Повсюду, где существует

разность температур, повсюду, где возможно восстановление равновесия теплорода, возможно получение движущей силы». Чтобы обосновать свою идею, он приводит следующую (вообще говоря, неправильную) аналогию: «Движущая сила падающей воды зависит от высоты падения и количества воды; движущая сила тепла также зависит от количества употребленного теплорода и зависит от того, что можно назвать и что мы на самом деле будем называть высотой его падения, т. е. от разности температур тел, между которыми происходит обмен теплорода. При падении теплорода движущая сила, без сомнения, возрастает с разностью температур между горячим и холодным телом». Таким образом, Карно обосновывает, что **для работы тепловой машины нужен не только источник тепла, но и источник холода, и ее работа возможна только в том случае, когда имеется перепад температур между ними.**

Карно подошел к решению проблемы с максимально общих позиций, исключив все частности, не имеющие принципиального значения. Он рассматривал не какую-то определенную паровую машину, даже не паровую машину вообще, а абстрактный тепловой цикл (называемый теперь **циклом Карно**), описывающий работу **идеальной тепловой машины**, не зависящей от рода рабочего тела в ней. Эта машина (вернее, **рабочее тело** машины) получает теплород от **нагревателя** с постоянной температурой T_1 и отдает его холодильнику с постоянной температурой T_2 . Анализ процессов этой машины позволил Карно сделать вывод о том, что ее КПД равен

$$\eta = 1 - \frac{T_2}{T_1}.$$

Так, несмотря на ложность теории теплорода (ее исходное положение — это неуничтожимость теплорода, т. е. количество полученного от нагревателя теплорода равно количеству отданного холодильнику, что неверно), Карно приходит к правильному выводу о том, в каком направлении происходит процесс в тепловой машине и каково условие его наиболее выгодного использования: чем выше температура нагревателя и чем ниже температура холодильника, тем больше КПД машины.

В 1828 г. Карно оставил военную службу. Он много работал и у него были большие планы, но в 1832 г. скороотечно умер от холеры. По правилам того времени все его вещи (в том числе и бумаги) были сожжены. Таким образом, его научное наследие было утрачено.

Только в 1850 г. **Р. Клаузиус** (1822–1888) в своей статье «О движущей силе теплоты», разбирая работу Карно и отказываясь от его концепции о неуничтожаемости теплоты, оформляет основную идею Карно в виде нового принципа — второго начала термодинамики — следующим образом: «Теплота не может переходить сама собой от более холодного тела к более теплomu». А в 1851 г. **Кельвин** (1824–1907) в своей работе «О динамической теории теплоты» второе начало формулирует так: «Невозможны такие тепловые машины, единственным конечным результатом которых явилось бы отнятие от некоторого тела теплоты и превращение его полностью в работу». (Можно показать, что формулировки Клаузиуса и Кельвина эквивалентны.) Кстати, именно работа Карно подсказала Кельвину важную мысль о введении температурной шкалы, не зависящей от выбора термометрического тела, — **абсолютной шкалы температур (шкалы Кельвина)**, основанной на цикле Карно.

Позднее в 1872 г. австрийским физиком-теоретиком **Людвигом Больцманом** (1844–1906) был показан статистический характер второго начала термодинамики, заключающегося в том, что любая изолированная система многих частиц (например, молекул) с течением времени переходит из состояния, осуществляемого меньшим количеством способов, в состояние, осуществляемое большим количеством способов (см. ст. 2.19 на с. 136). Другими словами, статистическая система всегда стремится переходить из менее вероятного состояния в более вероятное [9, 19, 35, 47, 66, 116, 121, 169, 170, 191].

2.13. КАЧЕСТВО ЭНЕРГИИ

Из второго начала термодинамики (см. предыдущую статью) следует, что для непрерывной циклической работы теплового двигателя обязательно нужны источник теплоты ΔQ_1

(нагреватель) с высокой температурой T_1 и приемник теплоты ΔQ_2 (холодильник) с более низкой температурой T_2 — это так называемый **принцип Карно**. Математическое выражение принципа Карно, определяющего условие перехода теплоты ΔQ_1 в работу A при заданных температурных условиях, можно получить, приравняв выражение для КПД тепловой машины по определению ($\eta = A/\Delta Q_1$) выражению для КПД идеальной машины Карно ($\eta = 1 - T_2/T_1$), откуда получаем

$$A = \Delta Q_1 \frac{T_1 - T_2}{T_1} \quad (2.4)$$

(на самом деле это выражение было выведено Р.Клаузиусом после анализа работы С.Карно). Из этой формулы следуют многие важные следствия.

Первое следствие состоит в том, что получаемая работа A всегда меньше подводимой к двигателю теплоты ΔQ_1 , т.к. коэффициент $(T_1 - T_2)/T_1$ в формуле (2.4) всегда меньше единицы. Другими словами, в работу может быть превращена только часть получаемой теплоты ΔQ_1 ; другая часть, равная $\Delta Q_2 = \Delta Q_1 - A$, неизбежно должна быть отдана какому-либо теплоприемнику при температуре T_2 . Чем выше температура T_1 и ниже T_2 , тем бóльшая доля теплоты ΔQ_1 может быть превращена в работу. Но всю теплоту ΔQ_1 в работу преобразовать нельзя (для этого T_1 должна была бы быть бесконечно большой или T_2 — бесконечно малой).

Таким образом, в природе существует **асимметрия во взаимной превратимости теплоты и работы**: работа может превратиться в теплоту полностью, но теплота в работу — только частично.

Второе следствие из принципа Карно состоит в том, что получение работы из теплоты возможно только в том случае, когда между нагревателем и холодильником есть разность температур, т. е. $T_1 - T_2 \neq 0$. Если же $T_1 - T_2 = 0$, т. е. если двигатель вступает в тепловой контакт с телами, имеющими ту же температуру, то никакой работы он произвести не может, как бы ни была велика энергия хаотического движения молекул, содержащаяся в этих телах. Так как **полная энергия** тела

состоит из: 1) **внутренней**, связанной с хаотическим движением молекул внутри него (т. е., фактически, с температурой), 2) **кинетической**, связанной с его скоростью как целого, и 3) **потенциальной**, связанной с его положением как целого в силовом поле, то в общем случае наличие энергии еще не говорит о том, что из нее может быть получена работа — энергия может быть и неработоспособной. Поэтому сильно упрощенное определение энергии, которое часто встречается в книгах и учебниках, как величины, характеризующей способность тела совершить работу, в общем случае неверно — оно досталось нам по наследству от XVII–XVIII вв., когда представление об энергии (по тогдашней терминологии — «силе») было связано только с механической работой. Принцип Карно ясно показывает, что такое определение применительно к внутренней энергии тела и к теплоте, отводимой от него, неверно.

Вокруг нас (в воздухе, воде, почве, окружающих телах) содержится гигантское количество внутренней энергии хаотического молекулярного движения, но, увы, оно для получения полезной работы абсолютно бесполезно. Чтобы воспользоваться все-таки этой энергией, мы должны были бы иметь теплоприемник с более низкой температурой. Но чтобы создать такой теплоприемник, мы обязаны совершить работу бóльшую, чем потом получим от созданной тепловой машины — и все из-за асимметрии во взаимной превратимости теплоты и работы.

Таким образом, окружающую нас тепловую энергию с точки зрения ее качества — способности совершить работу — можно разделить на два класса: 1) можно говорить о «хорошей» высокотемпературной энергии, часть которой можно превратить в полезную механическую работу, и 2) можно говорить о «плохой» низкотемпературной, из которой практически невозможно извлечь выгоду. Любая работа, совершаемая за счет высокотемпературного тепла, приводит к выбросу его части в холодильник (читайте — в окружающую среду) и превращению в низкотемпературное тепло — как говорят, происходит **деградация энергии**.

Эту мысль можно продолжить далее: в «табеле о рангах» механическая энергия по качеству лучше тепловой. Такое

ранжирование возможно потому, что механическая энергия целиком может перейти в тепловую, но обратно можно перевести только часть тепловой. В свою очередь, электрическая и химическая энергии по качеству выше механической. Действительно, пусть, например, в аккумуляторе запасена электрическая энергия. Ее можно целиком преобразовать в механическую работу и тепло. Наоборот, если мы вращаем электрический генератор с целью преобразовать механическую энергию в электрическую, то лишь часть имеющегося у нас запаса механической энергии перейдет в электрическую, а другая часть этого запаса преобразуется опять же в низкосортное тепло (нагревание подшипников и обмотки).

Переходы энергии из формы высшего качества в форму низшего качества наблюдаются в природе повсеместно. Наоборот, случаи перехода от формы низшего качества к форме высшего качества наблюдаются лишь в частичном виде [19, 108, 126, 142, 158, 170].

2.14. ЗАЧЕМ МЫ ПОТИРАЕМ РУКИ!

Обычно мы потираем руки, когда они озябли (у некоторых это входит в привычку). И не подозреваем, что таким образом иллюстрируем I начало термодинамики. Действительно, когда мы потираем руки, то преодолеваем силу трения между ними. Сила трения — это **диссипативная сила**: работа, расходуемая на ее преодоление, переходит в тепло (происходит деградация энергии; см. предыдущую статью). Этот факт в неявном виде известен человечеству с самого зарождения нашей цивилизации и использовался, например, для получения огня (см. ст. 2.3).

Попробуем оценить количество теплоты, которое выделяется, когда мы, разогреваясь, потираем руки. Допустим, что мы сжимаем ладони с силой $F = 0,5$ Н, а коэффициент трения кожи об кожу составляет $\mu = 0,5$. Тогда сила трения, которую мы преодолеваем при скольжении одной ладони по поверхности другой, будет равна $F_{\text{тр}} = \mu F = 0,25$ Н. Если считать, что, разогреваясь, мы за одну секунду совершаем че-

тыре движения ладоней и каждое из них по $l = 0,1$ м, то мощность, расходуемая на преодоление силы трения, составляет $N = 4F_{\text{тр}}l = 0,1$ Вт. Тогда за $\Delta\tau = 10$ с такого разогрева в области контакта ладоней выделится $\Delta Q = N\Delta\tau = 1$ Дж тепла. Много это или мало?

Оценим повышение температуры руки от этого количества тепла. Пусть все полученное тепло идет на разогрев участка поверхности кожи на ладонях. Наша тело в основном состоит из воды, поэтому будет разумно, если удельную теплоемкость кожи примем равной теплоемкости воды, т.е. $c_{\text{уд}} = 4,2$ кДж/(кг·К). Приблизительно можно считать, что площадь ладоней равна 1 дм², а толщину кожи можно принять равной 1 мм. Так как кожа все-таки у нас сухая, то для массы нагреваемого участка будет хорошим приближением значение $m = 0,1$ г. Тогда потирание рук приведет к нагреву участка кожи на

$$\Delta T = \frac{\Delta Q}{c_{\text{уд}}m} = \frac{1}{4200 \cdot 10^{-4}} \approx 2,5^\circ\text{C}.$$

Большая часть тепла от разогрева, конечно же, уходит в ткани, расположенные под кожей, и разносится по телу с кровотоком, но и оставшейся части тепловой энергии обычно оказывается достаточной, чтобы поднять температуру кожи на несколько градусов [11].

2.15. РАБОТА ЗА СЧЕТ ХОЛОДА

Закон сохранения энергии можно формулировать так: для того чтобы произвести некоторую работу, необходимо затратить соответствующее количество энергии. Предположим, что в герметически закупоренном чугунном сосуде находится вода. Отнимем от нее некоторое количество теплоты и охладим воду до 0°C , чтобы образовался лед. При этом лед, занимая объем бóльший, чем вода, разрывает сосуд (см. ст.3.43 на с.342). Как же согласовывается с этими опытами вышеприведенная формулировка закона сохранения энергии? Ведь мы фактически отнимаем энергию, а работа, тем не менее, совершается!

Видимое противоречие возникло здесь вследствие неполноты (а значит, и неточности) формулировки закона сохранения энергии применительно к тепловым явлениям. На самом деле необходимо пользоваться законом сохранения энергии в виде первого начала термодинамики:

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

Отсюда видно, что уменьшение внутренней энергии тела равно $-\Delta U = A - \Delta Q$ и, соответственно, уменьшение температуры может происходить при выполнении некоторой положительной работы и отнятии при этом некоторого количества теплоты.

Разберем более конкретно наш случай. Внутренняя энергия тела складывается из кинетической и потенциальной энергий молекул. Кинетическая энергия зависит от скоростей молекул, а потенциальная — от взаимного их расположения. При затвердевании воды существенным образом меняется характер движения и расположение молекул: они организуются в кристаллическую решетку и начинают совершать лишь колебательное движение, причем их скорости (т.е. температура) остаются неизменными (см. ст. 4.1 на с.370). Это означает, внутренняя энергия меняется за счет изменения потенциальной составляющей. Разница выделяется в виде теплоты фазового перехода (теплоты кристаллизации). Именно за ее счет и происходит разрушение герметически закупоренного чугунного сосуда при замерзании налитой в него воды [70, 137].

2.16. ЭНТРОПИЯ

В ст. 2.13 уже говорилось о том, что теория теплорода, объясняющая наличие у тел температуры и основанная на предположении о существовании неуничтожимой невесомой жидкости, заполняющей все тела природы, была ошибочной. Такое понимание теплоты было связано с аналогией падающей воды, которая, протекая сверху вниз, производит работу. В этой теории считалось, что теплород неуничтожим, поэтому его количество после перехода от тела с более высокой температурой к телу с более низкой температурой не меняется.

В случае тепловой машины это вело к несуразице: раз количество теплорода не меняется, то полезная работа A возникает ниоткуда. С установлением теории тепловых явлений на основе рассмотрения движения молекул эта несуразица естественным образом разрешилась сама собой: $A = \Delta Q_1 - \Delta Q_2$, где ΔQ_1 и ΔQ_2 — соответственно количество теплоты, переданного тепловой машине и отданного тепловой машиной.

Однако оказалось (как это часто бывает), что в представлении о том, что сквозь тепловую машину проходит поток «чего-то», не меняющего свое количество, есть некое рациональное зерно. Действительно, из принципа Карно (см. формулу (2.4) в ст. 2.13) следует (с учетом $A = \Delta Q_1 - \Delta Q_2$), что

$$\frac{\Delta Q_1}{T_1} = \frac{\Delta Q_2}{T_2}. \quad (2.5)$$

Выходит, что отношения количеств теплоты к соответствующим температурам и на входе тепловой машины, и на ее выходе равны. Значит, действительно есть тепловая величина, сохраняющая в процессе работы идеальной тепловой машины (цикла Карно) свое постоянное значение.

Это замечательное свойство отношения $\Delta Q/T$ оставаться неизменной при идеальных превращениях теплоты в работу не могло не обратить на себя внимания. Первым, кто это сделал, был **Р. Клаузиус** (о нем см. ст.ст. 2.4, 2.12, 2.13), который в 1865 г. придал величине $\Delta Q/T$ самостоятельное значение и ввел ее в науку под именем «**энтропия**» (от греч. *entropia* — превращение, поворот). Название «энтропия» он выбрал из-за того, что оно было созвучно слову «энергия». Традиционно энтропию обозначают символом S .

Выражение (2.5) означает, что изменение энтропии двигателя Карно при его работе равно нулю — сколько ее входит вместе с теплом, столько и выходит:

$$\Delta S_1 = \Delta S_2, \quad (2.6)$$

т. е. энтропия S как бы «протекает» через двигатель от нагревателя к холодильнику. Но при обычном нагреве вещества путем подвода к нему теплоты энтропия поступает, но не

выходит — она «накапливается» в веществе. Таким образом, энтропия может как содержаться в телах, так и посредством теплоты передаваться от одного тела к другому, что, опять-таки, роднит ее с теплотородом.

Вообще говоря, нам известна одна такая величина, которая содержится в телах и может передаваться другим телам в виде работы A и количества теплоты ΔQ — это внутренняя энергия U (см. ст. 2.4). Внутренняя энергия является характеристикой (параметром) состояния, т. е. при одних и тех же давлении p , температуре T , объема V она всегда имеет одно и то же значение независимо от того, каким образом мы пришли в данное состояние. Поэтому можно предположить, что энтропия тоже обладает таким свойством, т. е. является параметром состояния. Это действительно так.

Соотношением $\Delta S = \Delta Q/T$ можно пользоваться тогда, когда все количество теплоты ΔQ отдается при одной и той же температуре T . Однако в общем случае температура T в процессе подвода теплоты может меняться (например, тело при подводе теплоты нагревается, а при отводе — охлаждается). Поэтому количество теплоты, передаваемую телу или отводимую от тела, делят на бесконечно малые порции dQ и изменение энтропии подсчитывают для каждой малой порции dQ , считая при этом текущую температуру тела T неизменной:

$$dS = \frac{dQ}{T}.$$

В целом же изменение количества энтропии ΔS будет равно сумме малых изменений:

$$\Delta S = \int dS = \int \frac{dQ}{T}. \quad (2.7)$$

Понятие энтропии возникла (см. выше) из рассмотрения **идеальной тепловой машины** Карно. Машину Карно можно заставить работать и в обратном направлении — это есть **идеальная холодильная машина**. В этом случае она будет отбирать теплоту ΔQ_2 у тела с меньшей температурой T_2 и отдавать теплоту ΔQ_1 телу с большей температурой T_1 за счет

работы A' , совершаемой внешними силами: $\Delta Q_1 = \Delta Q_2 + A'$. При одних и тех же условиях функционирования тепловой машины в прямом и обратном направлениях работа A , полученная при действии тепловой машины в прямом направлении, в точности равна работе A' , затраченной на приведение машины в действие в обратном направлении: $A = A'$. Таким образом, идеальная тепловая машина обладает **свойством обратимости**: если ее пустить сначала в прямом направлении и получить работу A , а затем израсходовать эту работу для приведения в действие этой же машины в качестве холодильной, то в окружающем пространстве никаких изменений обнаружено не будет.

Однако в природе существуют и другие — **необратимые** — процессы переноса теплоты, могущие сами по себе идти только в одну сторону. Действительно, если нагреватель с более высокой температурой T_1 привести в тепловой контакт с холодильником с более низкой температурой T_2 без идеальной тепловой машины между ними, то возникнет тепловой поток от нагревателя к холодильнику. Работы при этом, естественно, производиться не будет, и всю теплоту, отдаваемую нагревателем, получит холодильник. Таким образом, процесс в этом случае будет односторонним (необратимым), поскольку в обратную сторону он идти не может; для того, чтобы процесс все-таки пошел в обратном направлении, мы должны совершить внешнюю работу, затратив определенную энергию, т.е. в окружающем пространстве будут изменения.

А как будет вести себя энтропия в этом случае (в случае необратимого переноса тепла по сравнению с обратимым)?

Как указывалось выше, при работе обратимой машины Карно энтропия как бы «протекает» через нее от нагревателя к холодильнику, не меняя запаса энтропии самой машины (см. формулу (2.6)). Это означает, что если рассматривать нагреватель и холодильник как одну систему, то их общий запас энтропии не меняется: сколько ее убыло от нагревателя, столько же прибыло к холодильнику: $\Delta S_1 = \Delta S_2$.

Совершенно другая картина возникает при необратимой теплопередаче от нагревателя к холодильнику (т.е. без машины Карно между ними). Ясно, что в этом случае все ко-

личество теплоты ΔQ_1 , отдаваемое нагревателем, получит холодильник: $\Delta Q_2 = \Delta Q_1$. При этом нагреватель передает энтропию $\Delta S_1 = \Delta Q_1/T_1$, а холодильник получает энтропию $\Delta S_2 = \Delta Q_1/T_2$. Поскольку $T_2 < T_1$, то $\Delta S_2 > \Delta S_1$, т.е. холодильник получает больше энтропии, чем отдает нагреватель. Энтропия системы «нагреватель-холодильник» в целом возрастает!

Таким образом, энтропия (вернее, ее возрастание) может служить индикатором необратимости процессов в замкнутых системах, т.е. может показывать их отклонение от идеальных: чем больше рост энтропии, тем больше отклонение. Именно в этом ценность энтропии и именно на это обратил внимание Р. Клаузиус. Необратимые процессы могут идти не только в термодинамических системах, но и в других (например, в информационных), поэтому понятие «энтропия» в настоящее время нашло широкое применение во многих научных отраслях.

Работа всех реальных тепловых машин (двигателей) сопровождается потерями, поэтому они, в отличие от идеальной машины Карно, являются необратимыми. Для реального двигателя это означает, что при тех же, что и у идеальной машины, температурах T_1 нагревателя и T_2 холодильника и количестве передаваемой нагревателем теплоты ΔQ_1 работа будет уже не A , а $A^* < A$. Так как $\Delta Q_2^* = \Delta Q_1 - A^*$, то холодильник по сравнению с идеальной машиной получит уже большее количество теплоты: $\Delta Q_2^* > \Delta Q_2$. Следовательно, полученная холодильником энтропия $\Delta S_2^* = \Delta Q_2^*/T_2$ тоже оказывается большей по сравнению с идеальной машиной. Таким образом, работа реальной (необратимой) тепловой машины в целом всегда сопровождается возрастанием энтропии (напомним, работа идеальной машины Карно происходит без изменения суммарной энтропии системы).

Р. Клаузиус обобщил эту закономерность на любые необратимые энергетические процессы, введя **принцип возрастания энтропии**: во всех реальных процессах, происходящих в изолированных системах, суммарная энтропия всех участвующих в них тел возрастает. Это возрастание при прочих равных условиях тем больше, чем сильнее процессы в рас-

смаатриваемой системе отличаются от идеальных (обратимых); при идеальных же процессах в изолированной системе суммарная энтропия не меняется. Сказанное можно обобщить и очень кратко написать в виде математического выражения, называемого **неравенством Клаузиуса**:

$$\Delta S \geq 0.$$

Обратите внимание на следующий факт: речь идет о замкнутых (изолированных) системах. В незамкнутых системах (например, в человеческом организме) энтропия может как увеличиваться, так и уменьшаться за счет внешних воздействий. Но в природе любая незамкнутая система всегда является частью еще ббльшей системы, в которой обязательно выполняется неравенство Клаузиуса.

Таким образом, принцип возрастания энтропии тоже является выражением второго закона термодинамики и указывает направление протекания процессов в замкнутой термодинамической системе. Уменьшение энтропии в изолированных системах второй закон запрещает — оно в принципе невозможно.

Примеров таких воображаемых невозможных процессов можно привести много, например, закипание чайника с водой, поставленного на лед. Нетрудно видеть, что суммарная энтропия при этом уменьшилась бы, поскольку энтропия льда уменьшилась бы на $\Delta Q/T_2$, а энтропия воды в чайнике возросла бы всего лишь на $\Delta Q/T_1 < \Delta Q/T_2$ (т.к. $T_1 > T_2$).

Энтропия в необратимых процессах будет расти до тех пор, пока будут идти процессы переноса, связанные с теплопередачей. Как мы знаем, такие процессы ведут к установлению равновесного состояния с выравниванием параметров состояния по всему объему системы. После наступления равновесия процессы теплопередачи прекращаются, и вместе с этим прекращается и рост энтропии. Значит, состояние термодинамического равновесия — это состояние **с максимальной энтропией** (при данных условиях) [19, 35, 47, 91, 121, 126, 158, 169, 170].

2.17. ИЗМЕРЕНИЕ ЭНТРОПИИ

Обычно в учебниках по молекулярной физике пишут, что энтропию никак нельзя измерить, а можно только вычислить по другим измеренным параметрам. В определенной степени это верно — нет такого физического прибора, который позволял бы получить значение энтропии тела подобно тому, как мы получаем значение температуры с термометра. Однако этого и не нужно делать.

Как вы могли заметить из предыдущей статьи, для нас, в общем-то, важно не само значение энтропии S , а ее изменение ΔS (такова ситуация и с внутренней энергией). Изменение же энтропии можно вычислить по формуле (2.7) из предыдущей статьи:

$$\Delta S = \int \frac{dQ}{T} \approx \sum \frac{\Delta Q_i}{T_i} = \sum \Delta S_i. \quad (2.8)$$

Одно существенное замечание: таким образом можно вычислить изменение энтропии только **для обратимых процессов**. Процесс же будет обратимым, если будет протекать достаточно медленно (в пределе — бесконечно медленно). Для необратимых процессов это принципиально невозможно в силу самого определения необратимости!

В создании прибора нам помогут современные электронные средства — компьютер и электрический (термопарный) термометр. Принципиальная схема такого измерителя приведена на рис. 2.1; его основными частями являются термометр 2 и нагреватель 4, соединенные через электронный блок управления 5 с компьютером 6. Блок управления 5 может регистрировать значения T_i термометра 2 и по указанию компьютера 6 регулировать количество теплоты ΔQ_i , выделяемое на нагревателе 4. Данные, полученные блоком управления, передаются на компьютер 6, который производит все необходимые вычисления и выводит результаты на экран.

Процесс измерения происходит следующим образом. Измеряемое тело 1 (см. рис. 2.1) помещается в калориметр 3 и запускается программа на компьютере. Так как процесс теплопередачи должен быть обратимым (т.е. равновесным), то

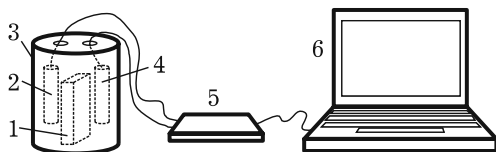


Рис. 2.1

нагревание должно происходить медленно до такой степени, чтобы не создавались перепады температуры между разными точками измеряемого тела (в принципе, для контроля за этим можно воспользоваться несколькими термометрами, но это усложнит нашу схему).

При подведении к измеряемому телу 1 малой порции теплоты ΔQ_i его текущая температура T_i также увеличивается незначительно, так что вычисленное значение приращения энтропии $\Delta S_i = \Delta Q_i / T_i$ можно считать практически точной (температура должна выражаться в кельвинах!). Поскольку, однако, температура

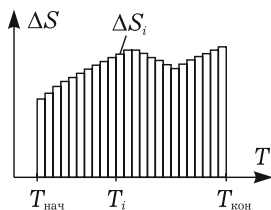


Рис. 2.2

температура измеряемого тела все же слегка возрастет, то передача следующей порции энергии будет происходить при чуть более высокой температуре, но мало отличающейся от предыдущей. Полученные при каждом акте измерения результаты накапливаются в памяти компьютера. Процедура продолжается до тех пор, пока температура не достигнет заданного конечного значения. Тогда в соответствии с формулой (2.8) сумма всех накопленных значений ΔS_i и есть общее изменение энтропии тела (рис. 2.2).

Кстати, схема этого прибора обладает до некоторой степени универсальностью — меняя только программу расчетов в компьютере, его можно использовать как измеритель теплоемкости тел. Действительно, в этом случае компьютеру, кроме переданного телу количества теплоты ΔQ , надо регистрировать вызванное этим изменение температуры ΔT и вычислять теплоемкость: $c = \Delta Q / \Delta T$ [170].

2.18. УМНЫЙ ТЕПЛООБМЕН

Имеется изолированная система из трех твердых тел, сделанных из одного и того же вещества и имеющих одинаковые размеры. Для простоты расчетов будем считать, что теплоемкость вещества, из которого сделаны тела, равна единице и не зависит от температуры: $C = 1 = \text{const}$. Два тела нагреты до температуры $T_1 = T_2 = 300$ К, а третье — до $T_3 = 100$ К. До какой максимальной температуры можно нагреть какое-нибудь одно из тел представленной системы, не передавая в нее извне энергии?

Для изменения температуры тел нам необходимо организовать между ними теплообмен. Самый простой и очевидный вариант заключается в приведении тел в тепловой контакт друг с другом. Однако, как мы знаем, в соответствии со II началом термодинамики такой теплообмен является **необратимым**, ведущим лишь к выравниванию температур тел. Это означает, что максимум, на что мы можем рассчитывать, — это получение значений температуры из интервала 100–300 К. Действительно, т.к. тела совершенно одинаковые, то конечная температура в тепловом равновесии для случая контакта тел с температурами T_1 и T_3 окажется равной

$$T_{1,3} = \frac{T_1 + T_3}{2} = \frac{300 + 100}{2} = 200 \text{ К},$$

а в случае одновременного контакта всех трех тел —

$$T_{1,2,3} = \frac{300 + 300 + 100}{3} \approx 233,3 \text{ К}.$$

Таким образом, никакие комбинации контактов между тремя данными телами не позволят нам получить температуры за пределами интервала 100–300 К.

Тем не менее, нам известен и другой вид теплообмена — **обратимый** (см. ст. 2.16). Такой теплообмен можно организовать, если между телами установить работающую на перепаде температур **идеальную тепловую машину** (машину Карно). Тогда, получив с помощью этой машины на перепаде между $T_1 = 300$ К (нагреватель) и $T_3 = 100$ К (холодильник) некоторую полезную работу и превратив ее полностью в тепло (это

всегда возможно; см. ст. 2.13), можно это тепло передать телу с температурой $T_2 = 300$ К и получить окончательную температуру выше 300 К.

Чтобы узнать, какую работу можно получить от нашей тепловой машины, надо воспользоваться II началом термодинамики. При работе обратимой (идеальной) тепловой машины энтропия всей системы не увеличивается, т. е. сколько ее тепловая машина получает от нагревателя, столько же отдает и холодильнику:

$$\Delta S_1 = \Delta S_3 \quad \text{или} \quad \frac{\Delta Q_1}{T_1} = \frac{\Delta Q_3}{T_3}. \quad (2.9)$$

Однако это выражение справедливо в том случае, когда температуры нагревателя и холодильника в процессе работы тепловой машины остаются постоянными. У нас же температуры тел меняются. Поэтому выражение (2.9) надо записать для бесконечно малых порций тепла, считая, что при этом текущие температуры тел практически не меняются (см. ст. 2.16):

$$\frac{dQ_1}{T_1} = \frac{dQ_3}{T_3}. \quad (2.10)$$

Из определения теплоемкости следует, что

$$dQ_1 = -C dT_1 = -dT_1, \quad dQ_3 = C dT_3 = dT_3$$

(знак « $-$ » в выражении для dQ_1 появляется из-за того, что dQ_1 и dT_1 разных знаков). Подставляя в (2.10), получим

$$-\frac{dT_1}{T_1} = \frac{dT_3}{T_3} \quad \text{или} \quad \frac{dT_1}{T_1} + \frac{dT_3}{T_3} = 0.$$

После интегрирования находим, что

$$\ln T_1 + \ln T_3 = \text{const} \quad \text{или} \quad T_1 T_3 = \text{const}.$$

Значит, произведение температур тел в любой момент обратной теплопередачи имеет одно и то же значение, в том числе в начале и в конце процесса теплопередачи:

$$T_1 T_3 = T_{1,3}^2,$$

откуда температура после окончания обратимой теплопередачи равна

$$T_{1,3} = \sqrt{T_1 T_3} = \sqrt{300 \cdot 100} \approx 173 \text{ К.}$$

Общее количество теплоты, отданное нагревателем тепловой машине, равно

$$\Delta Q_1 = C(T_1 - T_{1,3}) = 1 \cdot (300 - 173) = 127 \text{ Дж,}$$

а количество теплоты, переданное холодильнику, —

$$\Delta Q_3 = C(T_{1,3} - T_3) = 1 \cdot (173 - 100) = 73 \text{ Дж.}$$

Следовательно, с помощью идеальной (обратимой) тепловой машины можно получить работу

$$A = \Delta Q_1 - \Delta Q_3 = 127 - 73 = 54 \text{ Дж.}$$

Превращая ее в теплоту ΔQ_2 и передавая телу с температурой $T_2 = 300 \text{ К}$, получим повышение его температуры на

$$\Delta T_2 = \frac{\Delta Q_2}{C} = \frac{54}{1} = 54 \text{ К.}$$

Таким образом, температуру в системе можно довести до

$$T'_2 = T_2 + \Delta T_2 = 300 + 54 = 354 \text{ К.}$$

Совсем неплохо!

Однако это не окончательное решение — можно улучшить результат. Многие читатели, наверное, уже догадались, что мы слишком поспешно приняли решение превратить полученную полезную работу в теплоту на последнем этапе. Правильный путь состоит в использовании запасенной работы $A = 54 \text{ Дж}$ для приведения в действие **идеальной холодильной машины**, отбирающей теплоту от системы двух тел с температурой $T_{1,3} = 173 \text{ К}$ (холодильник) и передающей ее телу с температурой $T_2 = 300 \text{ К}$ (нагреватель). В этом случае повышение температуры должно быть еще более значительным.

Действительно, пусть $T'_{1,3}$ и T'_2 — температуры тел в конце работы холодильной машины. Значит, холодильная машина отберет от системы тел с $T_{1,3} = 173$ К количество теплоты

$$\Delta Q_{1,3} = 2C(T_{1,3} - T'_{1,3}) = 2(T_{1,3} - T'_{1,3})$$

(множитель 2 здесь учитывает тот факт, что теплота отбирается от двух тел) и передаст телу с T_2 количество теплоты

$$\Delta Q_2 = C(T'_2 - T_2) = T'_2 - T_2.$$

Действие холодильной машины совершается за счет запасенной ранее работы A , поэтому

$$\Delta Q_2 = \Delta Q_{1,3} + A$$

или

$$T'_2 - T_2 = 2(T_{1,3} - T'_{1,3}) + A. \quad (2.11)$$

С другой стороны, при работе идеальной холодильной машины энтропия системы не меняется:

$$\frac{dQ_{1,3}}{T_{1,3}} = \frac{dQ_2}{T_2}.$$

Так как $dQ_{1,3} = -2C dT_{1,3} = -2dT_{1,3}$, $dQ_2 = C dT_2 = dT_2$, то

$$-\frac{2dT_{1,3}}{T_{1,3}} = \frac{dT_2}{T_2} \quad \text{или} \quad 2\frac{dT_{1,3}}{T_{1,3}} + \frac{dT_2}{T_2} = 0.$$

После интегрирования получим

$$2 \ln T_{1,3} + \ln T_2 = \text{const} \quad \text{или} \quad T_{1,3}^2 T_2 = \text{const}.$$

Значит,

$$T_{1,3}^2 T_2 = T_{1,3}'^2 T_2'. \quad (2.12)$$

Из выражений (2.11) и (2.12) получим систему для нахождения $T'_{1,3}$ и T'_2 :

$$\begin{cases} T'_2 - T_2 = 2(T_{1,3} - T'_{1,3}) + A, \\ T_{1,3}^2 T_2 = T_{1,3}'^2 T_2' \end{cases}$$

или

$$\begin{cases} T'_2 - 300 = 2(173 - T'_{1,3}) + 54, \\ 173^2 \cdot 300 = T_{1,3}'^2 T_2'. \end{cases}$$

Решая эту систему, получим $T'_{1,3} = 150 \text{ K}$, $T'_2 = 400 \text{ K}$. Итак, температуру одного из тел можно довести до 400 K , охладив при этом два других до 150 K . Условие задачи нами не было нарушено — никакой энергии извне в данную систему не было передано. Однако для этого нам пришлось включить в нее идеальные тепловые машины.

Необходимо отметить, что полученный результат — это всего лишь теоретический «изыск». Связано это с тем, что идеальных тепловых машин в природе не бывает. Любая реальная тепловая машина является необратимой, соответственно и результаты этого опыта в реальности окажутся более скромными (но, тем не менее, в любом случае окончательную температуру можно вывести за пределы интервала $100\text{--}300 \text{ K}$) [120].

2.19. ЭНТРОПИЯ И МОЛЕКУЛЫ

Все окружающие нас тела состоят из молекул. Поэтому можно предположить, что фундаментальная причина возрастания энтропии в изолированных системах и, соответственно, природа второго начала термодинамики кроется в поведении молекул. Впервые на эту связь указал один из основоположников статистической физики австрийский ученый **Л. Больцман** (1844–1906), которая позже была уточнена немецким физиком-теоретиком **М. Планком** (1858–1947).

Л. Больцман исследовал законы поведения большого количества молекул и установил, что существует непосредственная связь энтропии с тем состоянием, в котором эти молекулы находятся.

В каждый определенный момент времени каждая молекула обладает вполне определенной энергией, связанной:

- 1) с ее движением (кинетическая энергия, зависит от скорости);
- 2) с ее взаимодействием с другими молекулами (потенциальная энергия, зависит от расстояния между молекулами, т. е. от координат).

Поскольку молекулы постоянно находятся в хаотическом движении и взаимодействуют между собой, происходит по-

стоянный энергетический обмен между ними, приводящий к тому, что энергия все время перераспределяется между ними. Поэтому каждый следующий момент соответствует уже другому состоянию системы с другим распределением энергии между молекулами — другому **микросостоянию системы**. Таким образом, микросостояние системы — это такое ее состояние в данный момент, при котором для каждой молекулы определена ее энергия (т. е. скорость и координаты). Это, если так можно выразиться, мгновенный снимок системы.

Изучить поведение молекул в состоянии хаоса и беспорядка, существующего при переходах из одного микросостояния в другое, чтобы предсказать их поведение в дальнейшем, практически невозможно. Но этого, оказывается, и не нужно делать. Мы знаем, что сумма энергий всех молекул вещества представляет собой его внутреннюю энергию. Значит, внутренняя энергия является общей характеристикой всей совокупности молекул и определяет **макросостояние системы**. Параметры, с помощью которых оценивается макросостояние (давление, температура, плотность, объем и т. д.), вполне доступны нам для измерения с помощью физических приборов. Ясно, что одному и тому же макросостоянию (общей внутренней энергии) может соответствовать множество различных микросостояний (множество различных распределений энергии между молекулами). Оказывается, для того, чтобы знать возможные варианты общего поведения системы молекул в будущие моменты времени, достаточно знать **число всех возможных микросостояний, соответствующих различным макросостояниям**. Идея, в общем-то, проста: система чаще будет находиться в том макросостоянии, которому соответствует большее количество микросостояний. Чтобы проиллюстрировать эту идею, можно привести следующий пример-аналогию.

Пусть на плоском подносе лежат 10 одинаковых монет. Каждая из них может лежать только в одном из двух положений — гербом вверх («орел») или вниз («решка»). Поскольку оба положения совершенно равновероятны, каждая монета при подбрасывании может лечь или орлом, или решкой; заранее предсказать это невозможно. Допустим, что вначале они

все лежали в строгом порядке — орлом вверх ($10\uparrow$). После подбрасывания монет движением подноса возможны разные варианты: все десять монет могут лечь орлом ($10\uparrow$); девять — орлом, одна — решкой ($9\uparrow, 1\downarrow$); восемь — орлом, две — решкой ($8\uparrow, 2\downarrow$), и т. д. до варианта, когда все лягут решкой ($10\downarrow$). Эти 11 возможных вариантов выпадения монет образуют все возможные «макросостояния» системы. Теперь поставим такой вопрос: какое «макросостояние» будет осуществляться чаще при последовательных подбрасываниях монет?

На первый взгляд кажется, что все 11 вариантов выпадения монет равноправны и равновероятны, но это только на первый взгляд. На самом деле эти «макросостояния» резко различаются тем, что частота их появления будет неодинакова. Действительно, первый вариант ($10\uparrow$) можно реализовать только одним способом, а второй ($9\uparrow, 1\downarrow$) — уже десятью способами-«микросостояниями»: первая монета — орел, остальные — решка; вторая — орел, остальные — решка; третья — орел, остальные — решка, и т. д. Следовательно, вариант ($9\uparrow, 1\downarrow$) будет возникать в 10 раз чаще варианта ($10\uparrow$). Третий вариант ($8\uparrow, 2\downarrow$) можно реализовать еще большим количеством способов. Действительно, двумя монетами, выпадающими решкой, могут быть: первая и вторая, первая и третья и т. д.; а также — вторая и третья, вторая и четвертая и т. д. Легко убедиться, что всего таких способов будет уже 45. Четвертый вариант реализуется уже 120 способами и т. д. Если свести все данные вместе, то получим табл. 2.2. Из этой таблицы видно, что всего в сумме возможны 1024 «микросостояния». Из них состояния «полного порядка» ($10\uparrow$) и ($10\downarrow$) встречаются только по 1 разу. Напротив, наиболее далекие от порядка «макросостояния» ($5\uparrow, 5\downarrow$), ($4\uparrow, 6\downarrow$), ($6\uparrow, 4\downarrow$) встречаются наиболее часто.

Это также означает, что для гарантированного получения первоначального порядка поднос нужно встряхнуть не менее 1024 раз — только тогда имеется шанс получить «макросостояние» ($10\uparrow$)! Напротив, перемешать все до состояния беспорядка, т. е. до «макросостояния» ($5\uparrow, 5\downarrow$), можно всего-то за $1024/252 = 4$ встряхивания. Таким образом, «макросостояние» полного перемешивания в 252 раза вероятнее, чем состояние

Таблица 2.2

«Макросостояния»	Число «микросостояний»
(10↑)	1
(9↑, 1↓)	10
(8↑, 2↓)	45
(7↑, 3↓)	120
(6↑, 4↓)	210
(5↑, 5↓)	252
(4↑, 6↓)	210
(3↑, 7↓)	120
(2↑, 8↓)	45
(1↑, 9↓)	10
(10↓)	1
Всего 1024 «микросостояния»	

полной упорядоченности. Путь от порядка к беспорядку очень короток, но чтобы пройти путь от беспорядка к порядку, нужно поработать намного больше! Житейское правило (особенно хорошо известное женщинам), что беспорядок из порядка всегда возникает сам по себе, а наведение порядка всегда требует затраты работы, здесь иллюстрируется в полной мере.

В описанном эксперименте мы взяли всего 10 монет, для которых возможны всего 1024 «микросостояния». А если монет будет больше? В табл. 2.3 даны суммарные (округленные!) количества «микросостояний» Ω в зависимости от числа монет N .

Таблица 2.3

N	10	20	30	50	70	100
Ω	10^3	10^6	10^9	10^{15}	10^{21}	10^{30}

В этой таблице обратите внимание на количество «микросостояний», соответствующее системе из 100 монет: число 10^{30} настолько большое, что его даже трудно с чем-нибудь сравнить. Сами посудите: для возвращения к упорядоченному расположению 100 монет (например, все монеты выпадут

решкой) нам нужно встряхнуть поднос не менее 10^{30} раз. Если поднос встряхивать 1 раз в секунду, то для этого потребуется время $10^{30} \text{ с} \approx 3,2 \cdot 10^{22}$ лет, что намного больше времени существования солнечной системы ($\approx 8 \cdot 10^9$ лет)!

Но ведь молекул вещества даже в самом малом объеме несоизмеримо больше, чем 100 (например, при нормальных условиях в 1 см^3 воздуха содержится около $2,9 \cdot 10^{19}$ молекул)! Поэтому вероятность того, что внутренняя энергия почти равномерно распределится между молекулами, чрезвычайно велика — этому соответствует гигантское количество возможных микросостояний. Напротив, по сравнению с этим вероятность установления микросостояний, в которых энергия сконцентрируется в какой-либо части вещества, совершенно ничтожна — практически она равна нулю. Именно поэтому тепло может передаваться только от более горячего тела к менее горячему, чтобы получилось равномерное распределение энергии. В этом и состоит суть второго начала термодинамики — система просто стремится перейти в наиболее вероятное макросостояние. Обратный процесс физически не запрещен, однако вероятность наступления этого события настолько мала, что, случись такое, это стало бы чудом.

Рассмотренное стремление энергии перейти в наиболее вероятное состояние можно обобщить и на другие величины, характеризующие системы многих частиц: концентрацию, давление, температуру и т. д. Все эти параметры в изолированных системах стремятся выровнять свое значение в пределах объема системы, и в конце концов устанавливается некоторое их среднее равновесное значение. Если нет внешнего воздействия, то такое равновесное состояние может длиться неограниченно долго.

Самым важным в исследовании Л. Больцмана, а затем М. Планка явилось то, что было установлено соответствие между энтропией S и количеством микросостояний Ω данного макросостояния термодинамической системы:

$$S = k \ln \Omega, \quad (2.13)$$

где $k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К}$ — постоянная Больцмана. Таким образом, энтропия макросостояния пропорциональна логариф-

му количества микросостояний, которыми данное макросостояние может быть реализовано. Формула (2.13) очень наглядно раскрывает принцип возрастания энтропии в замкнутых системах: раз термодинамическая система всегда стремится перейти в макросостояние с бóльшим количеством микросостояний Ω , то и энтропия S может только возрастать либо, по достижению состояния равновесия, оставаться постоянной; самопроизвольно она уменьшаться не может.

После своего создания теория Больцмана подверглась ожесточенной критике, особенно со стороны соотечественника Больцмана, австрийского физика и философа-позитивиста **Э. Маха** (1838–1916), который в совершенно категорической форме отрицал существование атомов. Полемика между Больцманом и Махом проходила в период резкого обострения борьбы между материализмом и идеализмом, накануне революционных открытий в физике, превративших в руины многие представления классической физики. Неудивительно, что полемика была резкой, подчас выходящей за рамки академического спора. Перед лицом многочисленных оппонентов Больцман был почти одинок. Нападки и травля со стороны идейных противников привели его к трагическому концу — в 1906 г. 62-летний ученый покончил жизнь самоубийством.

Кстати, формула (2.13) высечена на пьедестале надгробного памятника Л. Больцману в Вене [13, 19, 35, 47, 61, 91, 121, 158].

2.20. КАК РАБОТАЕТ ХОЛОДИЛЬНИК

Теоретической основой, на которой построена работа холодильников, является второе начало термодинамики. Рабочее тело в холодильнике совершает обратный термодинамический цикл, при котором тепло передается от менее нагретого тела (морозильной камеры) более нагретому (окружающему воздуху) за счет совершения над рабочим телом внешней работы: $\Delta Q_1 = \Delta Q_2 + A'$. Как известно, в этом отношении наиболее энергетически выгодным является **обратный цикл Карно**.

В настоящее время в быту и технике наибольшее распространение получили **парокомпрессионные холодильные**

машины, в которых передача тепла основана не на сжатии или расширении газа (однофазное рабочее тело), а на фазовых переходах вещества — испарении и конденсации (двухфазное рабочее тело; о двухфазных состояниях см. ст. 3.6 на с. 283). Для получения высокого КПД температура рабочего тела в газовой фазе должна незначительно отличаться от температуры его кипения в жидкой фазе, поэтому в качестве **хладагента** в большинстве холодильников используется **фреон**, реже — **аммиак**. Рабочим циклом таких холодильных машин является разновидность цикла Карно — **обратный цикл Ранкина**, предложенный в середине XIX в. шотландским инженером и физиком **У. Д. Ранкиным** (1820–1872). Цикл Ранкина идеальной парокомпрессионной холодильной машины представлен на рис. 2.3 и состоит из двух адиабат и двух изотерм-изобар. Устройство простейшего холодильника, соответствующего этому циклу, приведено на рис. 2.4.

В испарителе 3 холодильной машины происходит интенсивное испарение (кипение) хладагента (процесс 1–2) при температуре T_1 и давлении p_1 за счет теплоты охлаждаемой среды (морозильной камеры). Испарившийся хладагент отсасывается компрессором 2, адиабатически сжимается в нем до давления p_2 и температуры T_2 (процесс 2–3) и подается в конденсатор 1, где происходит его конденсация (процесс 3–4) с выделением теплоты, передающейся окружающему воздуху. Получающийся жидкий хладагент возвращается в испаритель 3 через регулирующий вентиль 4. Вентиль 4 представляет собой капилляр, поэтому жидкий хладагент под давлением дросселирует через него, при этом давление адиабатически

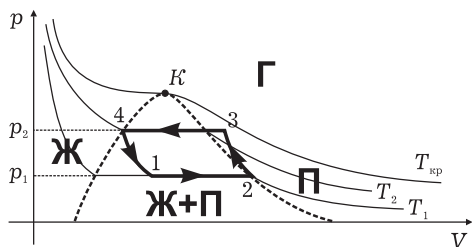


Рис. 2.3

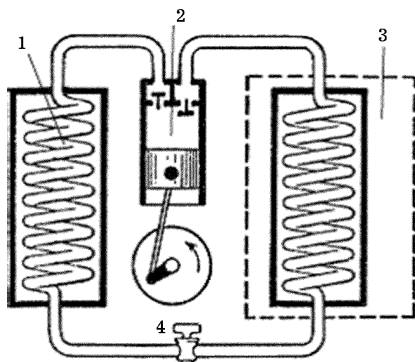


Рис. 2.4

(в реальных устройствах — изоэнтальпически, эффект Джоуля—Томсона) падает до p_1 (процесс 4–1) и цикл повторяется. Таким образом, в конденсаторе хладагент под воздействием высокого давления конденсируется и переходит в жидкое состояние, выделяя тепло, а в испарителе под воздействием низкого давления вскипает и переходит в газообразное, поглощая тепло [7, 9, 11, 43, 47, 191].

2.21. О «ТЕПЛОВОЙ СМЕРТИ» ВСЕЛЕННОЙ

Из предыдущих статей видно, что любая термодинамическая система, предоставленная самой себе, в конце концов придет в состояние термодинамического равновесия с максимумом энтропии. Все точки такой системы будут иметь одни и те же параметры состояния, энергия деградирует и, соответственно, больше уже не будет причин, способствующих возникновению каких бы то ни было процессов. Впервые на это в 1852 г. обратил внимание **У. Томсон** (лорд Кельвин) в своей работе «О проявляющейся в природе общей тенденции к рассеянию механической энергии», в результате чего пришел к выводу о неминуемой «тепловой смерти» Вселенной, когда в ней в конце концов прекратятся все термодинамические процессы и она придет в состояние термодинамического равновесия. Несколько позже к такому же заключению пришел

Р. Клаузиус, сформулировав его в виде положения: энтропия Вселенной стремится к максимуму.

Первым, кто подверг критике эти представления, был немецкий философ **Ф. Энгельс** (1820–1895), утверждавший, что концепция «тепловой смерти» Вселенной противоречит закону сохранения и превращения энергии, т.к. этот закон говорит не только о количественной неуничтожимости движения материи, но и о неутрачиваемой способности к качественным превращениям различных форм движения.

Передовые физики XIX в. также выступали против концепции «тепловой смерти». Большое прогрессивное значение имели в этом отношении работы выдающегося австрийского физика **Л. Больцмана**, установившего статистическую природу второго начала термодинамики (см. ст. 2.19). В противовес концепции «тепловой смерти» Вселенной он выдвинул «флуктуационную гипотезу». Согласно статистической природе макросостояний состояние термодинамического равновесия является лишь наиболее часто встречающимся, наиболее вероятным; в равновесной системе всегда могут самопроизвольно возникнуть сколь угодно большие отклонения от этого состояния — **флуктуации**. Распространяя эти выводы на Вселенную как целое, Больцман пришел к заключению, что Вселенная изначально находится, вообще говоря, в состоянии термодинамического равновесия, однако в ней неизбежно возникают сколь угодно большие флуктуации. Такой огромной флуктуацией является та часть Вселенной, в которой мы находимся. Всякая флуктуация должна исчезнуть, но столь же неизбежно будут возникать флуктуации подобного рода в других местах Вселенной. Таким образом, по Больцману, одни миры погибают, а другие возникают.

Однако и против больцмановской флуктуационной гипотезы был выдвинут ряд возражений, одно из существенных из которых — исчезающе малая вероятность сколь-нибудь больших флуктуаций.

Современной наукой установлено, что недостатком и причиной ошибок рассмотренных концепций являлось то, что они не учитывали специфики Вселенной как **гравитирующей системы**. Гравитация же существенно меняет свойства систе-

мы. Если для идеального газа наиболее вероятным является равномерное распределение параметров в пространстве, то в системе гравитирующих объектов однородное распределение уже не соответствует максимальной энтропии. Согласно современной релятивистской космологии образование звезд и галактик из равномерного распределения вещества — это не следствие флуктуации, а естественный процесс, идущий с ростом энтропии.

Таким образом, ошибочность концепции Томсона—Клаузиуса о тепловой смерти Вселенной состояла в необоснованном распространении второго начала термодинамики на всю Вселенную, не учитывая при этом роль гравитации [3, 91].

2.22. ДЕМОН МАКСВЕЛЛА

Второе начало термодинамики в формулировке **Клаузиуса** гласит о том, что тепло может непосредственно (без преобразований) переходить только от горячих тел к холодным. Как известно, природа второго начала кроется в статистическом механизме макросостояний термодинамической системы (см. ст. 2.19 на с. 136). Полного запрета на обратное явление нет, просто вероятность такого процесса ничтожно мала. Поэтому передать тепло от холодных тел горячим можно только с помощью преобразователей энергии — тепловых машин. Например, холодной батареей от карманного фонаря можно раскалить горячий волосок лампочки, но при этом происходит преобразование формы энергии и переход ее части в низко-температурное тепло.

Если бы был найден процесс, который позволял теплу переходить от менее нагретых тел к более нагретым, то можно было бы полностью превращать тепло в работу (такое запрещено вторым началом термодинамики в формулировке **Кельвина**). Тогда мы имели бы практически неисчерпаемые запасы энергии (например, от вод мирового океана). Эту идею активно поддерживал **К. Э. Циолковский** (1857–1935), считая, что в природе существуют процессы концентрирования энергии, обратные процессам рассеяния. Решить такую задачу попытался еще в 1871 г. великий английский ученый

Джеймс Максвелл (1831–1879). Он приписал подобный процесс некоему фантастическому существу, названному позже «демоном Максвелла». Это существо, утверждал ученый, обладает столь изощренными способностями, что может следить за каждой отдельной молекулой и знать ее скорость. Если взять сосуд, разделенный перегородкой на две части, и посадить «демона» у дверцы в перегородке, мы можем заставить его открывать дверцу только перед быстрыми или только перед медленными молекулами. «Демон» будет пропускать быстрые молекулы в одну часть сосуда, а медленные — в другую, тогда в одной части сосуда и температура, и давление окажутся выше, чем в другой, т. е. мы без затраты работы получим запас высококачественной энергии.

«Демон Максвелла», придуманный более 100 лет назад, и ныне будоражит умы людей. Много раз ученые убедительно доказывали, что это лишь шутка великого физика, не имеющая никакой реальной основы. А все из-за того, что просто так «демон» работать не может, т. е. затраты на его деятельность не могут быть меньше той работы, которую способна дать запасенная «демоном» энергия.

Если бы в сосуде были всего две молекулы, то и без «демона» они в половине случаев могли бы оказаться в какой-либо одной части сосуда. Если же молекул много, то вероятность подобного случая чрезвычайно мала (см. ст. 2.19 на с. 136). Русский академик **А. Ф. Иоффе** (1880–1960) оценил величину вероятности такого самопроизвольного процесса концентрации энергии как 10^{-84} . Такая вероятность гораздо меньше вероятности получения совершенно нового «Мерседеса» при столкновении автомобилей «Жигули» и «Ока» [19, 43, 120, 136].

2.23. ВИХРЕВАЯ ТРУБА

В предыдущей статье было сказано, что по физическим соображениям «демон Максвелла» в природе не может существовать. Тем не менее, есть удивительное устройство, которое позволяет разделить газ на холодный и горячий фракции (рис. 2.5). Внутри устройства нет ни нагревателей, ни холо-

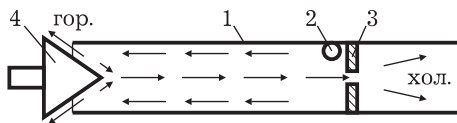


Рис. 2.5

дильников — оно представляет собой просто трубу 1, которая перекрыта диском 3 с дырочкой посередине и с одной стороны прикрыта вентилем 4. В боковой патрубке 2 трубы почти перпендикулярно к ее оси и по касательной к ее боковой поверхности подается сжатый газ, например, воздух при комнатной температуре. Такой способ подачи воздуха закручивает его внутри трубы в вихрь. Отсюда и название устройства — **вихревая труба**. При этом для воздуха, выходящего из левого конца трубы, удастся достичь температуры почти 200°C , а из правого — температуры -80°C .

Принцип работы устройства базируется на **вихревом эффекте**, сущность которого заключается в снижении температуры в центральных слоях закрученного потока газа и повышении температуры периферийных слоев. Происходит это следующим образом. Вначале охлаждение воздуха происходит из-за его расширения при входе в трубу 1 через патрубок 2. В образовавшемся вихре скорость воздуха у оси трубы больше, чем у стенок (эффект торнадо). По мере того как воздушный поток внутри трубы движется влево по спирали, распределение скорости по радиусу трубы становится более однородным из-за вязкости воздуха. В результате работы вязких сил наружный слой вихря, приближаясь к левому отверстию, значительно согревается, а центральная часть — охлаждается. Центральная часть вихря, отразившись от вентиля 4, проходит отверстие диска 3 и расширяется, соответственно — дополнительно охлаждается.

Вихревой эффект был впервые обнаружен французским инженером **Жозефом Ранком** (1898–1973) в конце 20-х годов XX в. при измерении температуры в промышленном циклоне, поэтому вихревую трубу еще называют **трубой Ранка** (другие названия — **вихревой энергоразделитель**, **вихревой**

холодильник). Промышленное использование трубы Ранка началось после 50-х годов XX в. В настоящее время вихревой эффект широко применяется при разработке систем микроклимата (т. е. в кондиционерах). Однако возникающие при этом эффекте физические закономерности еще не до конца изучены. Одно можно утверждать точно — «демон Максвелла» в эффекте не участвует [19, 140, 191].

2.24. ИНФОРМАЦИЯ И ЭНТРОПИЯ

Трудно вообразить жизнь человека без информации. А задумывались ли вы над тем, что такое **информация**? Подспудно вы, наверное, понимаете: это что-то такое, которое до нас дошло или передалось из очень большой неопределенности, что окружает нас; порция того, что мы отобрали из этого многообразия неопределенностей.

Вы на правильном пути: любая информация изначально связана с ее получением (передачей) в виде **сообщения**. А уж потом ее можно хранить, преобразовывать, передавать дальше, забывать (стереть) и т. д.

Количество информации I в сообщении определяется возможностью разрешения той неопределенности, которая была до передачи сообщения. Например, из колоды, содержащей 32 карты, наугад выбирается одна. Изначально неопределенность заключается в том, что имеется 32 вариантов выбора, и все они имеют одинаковую вероятность, равную $p = 1/32$. Но как только вы получаете сообщение, что выбрана конкретная карта, неопределенность сразу же исчезает. Поэтому количество информации определяется через **вероятность события, снимающего данную неопределенность**: $I \sim p$.

Однако такое определение имеет недостаток, заключающийся в том, что при таком определении количество информации I не является аддитивной (т. е. суммируемой) величиной, что неудобно. Действительно, возвращаясь к нашему примеру, пусть из двух колод наугад выбираются по одной карте. Вероятность выбора определенной карты из первой колоды равна $p_1 = 1/32$, точно также из второй колоды $p_2 = 1/32$. Согласно теореме об умножении вероятностей, вероятность получе-

ния двух конкретных карт в этом случае равна $p = p_1 \cdot p_2 = (1/32) \cdot (1/32)$, т. е. $I = I_1 \cdot I_2$.

Чтобы избавиться от этого неудобства, считают, что $I \sim \log p$; в этом случае $\log p = \log(p_1 \cdot p_2) = \log p_1 + \log p_2$ и $I = I_1 + I_2$. В качестве основания логарифма можно взять, вообще говоря, любое число, однако для практических целей (для цифровых технических линий передачи информации) удобнее брать основание 2:

$$I = -\log_2 p.$$

Знак минус в определении появляется для того, чтобы количество информации была, к тому же, положительной величиной. Из этого определения сразу же вытекает **единица количества информации**: это количество информации в сообщении о событии, вероятность которого равна $p = 1/2$:

$$I = -\log_2 \frac{1}{2} = \log_2 2 = 1.$$

Такая единица получила название «бит» (от англ. *binary digits* — двоичное число). Сообщением с количеством информации в 1 бит, может быть, например, сообщение о том, что при подбрасывании монеты выпала «решка». В приведенном выше примере с колодой карт сообщение о выборе определенной карты несет количество информации

$$I = -\log_2 p = -\log_2 \frac{1}{32} = \log_2 32 = 5 \text{ бит.}$$

Теперь вернемся к физике. Пусть задано **макросостояние** некоторой системы, т. е. указаны значения таких параметров, как объем, давление, температура, химический состав и т. п. Но эти параметры являются всего лишь усредненными и обобщенными характеристиками молекул, и мы ничего не знаем о состояниях отдельных молекул! Если бы мы знали о состоянии каждой молекулы, то нам было бы известно **микросостояние** системы в данный момент (см. ст. 2.19 на с. 136). Таким образом, знать микросостояние системы значит знать о системе все!

Сразу же возникает вопрос: какого количества информации недостает для полного описания системы в заданном макросостоянии? Иначе говоря, какое количество информации надо получить о системе, находящейся в данном макросостоянии, чтобы однозначно знать ее микросостояние в данный момент?

Мы знаем, что каждому макросостоянию соответствует огромное количество микросостояний Ω , с помощью которых оно может осуществиться, причем вероятность каждого микросостояния одинакова (см. ст. 2.19 на с. 136). Значит, вероятность того, что макросостояние системы будет осуществляться одним из микросостояний, равна $p = 1/\Omega$. Соответственно, сообщение об этом будет содержать количество информации, равное

$$I = -\log_2 p = -\log_2 \frac{1}{\Omega} = \log_2 \Omega. \quad (2.14)$$

С другой стороны, количество микросостояний Ω для данного макросостояния связано с количеством энтропии с помощью формулы Больцмана (см. формулу (2.13) на с. 140):

$$S = k \ln \Omega. \quad (2.15)$$

Формулы (2.14) и (2.15) совпадают с точностью до постоянного размерного множителя, т. е. величины I и S существенно идентичны. Вот вам и главный вывод: **энтропия системы в данном макросостоянии есть величина, пропорциональная количеству информации, недостающей до ее полного описания.**

Теперь можно объяснить, почему не может существовать «демон Максвелла» (см. ст. 2.22 на с. 145). Обратите внимание на следующее: для того, чтобы «демон Максвелла» открыл перед нужными молекулами дверцу, ему необходимо получить информацию об этих молекулах, т. е. уменьшить энтропию системы. Но информацию же он может получить только в результате взаимодействия с ними! А так как любое взаимодействие связано с передачей энергии, то отсюда вывод: информацию нельзя получать бесплатно — за нее приходится платить энергией, в результате чего энтропия системы повышается на

величину, по крайней мере равную ее понижению за счет полученной информации [10, 91, 113, 129, 158].

2.25. ЭКОНОМНЫЙ ТЕПЛООБМЕН

Имеется 1 л горячей воды при температуре $t_{\text{гор}}$ в сосуде A и такое же количество холодной воды при температурой $t_{\text{хол}}$ в сосуде B . Воду из сосуда B необходимо нагреть с помощью воды из сосуда A без их смешивания, для чего можно пользоваться другими подходящими емкостями. Можно ли сделать так, чтобы окончательная температура воды из сосуда B стала выше температуры из сосуда A ?

Обычно сразу же следует категоричный ответ: нельзя, т.к. это противоречит второму началу термодинамики и, соответственно, процесс теплопередачи прекратится, когда температура обоих объемов воды станет одинаковой. Тем не менее, есть способ сделать требуемое.

Идея решения этой задачи состоит в том факте, что малую часть холодной воды из сосуда B (например, 1 см³) с помощью горячей воды из сосуда A мы могли бы нагреть почти до $t_{\text{гор}}$. Поэтому надо попробовать разделить воду из сосуда B на части и нагревать их поочередно.

Попробуем провести процедуру нагрева воды из сосуда B , разделив ее, к примеру, на две части. Для этого отольем некоторую часть воды из сосуда B во вспомогательный сосуд C с тонкими теплопроводными стенками (рис. 2.6). Затем опустим сосуд C в сосуд A с горячей водой (жидкости при этом не смешиваются). Через некоторое время установится тепловое равновесие, причем установившаяся температура t_1 будет равна некоторому значению в промежутке между $t_{\text{хол}}$ и $t_{\text{гор}}$, т. е. $t_{\text{хол}} < t_1 < t_{\text{гор}}$. Выльем воду из сосуда C во второй вспомогательный сосуд D . Нальем в сосуд C оставшуюся холодную воду с температурой $t_{\text{хол}}$ из сосуда B и опять погрузим сосуд C в сосуд A . Температура в сосудах A и C снова сравняется и станет равной t_2 , причем $t_{\text{хол}} < t_2 < t_1$. Перельем воду из сосуда C в сосуд D . В результате в сосуде D через некоторое время установится равновесная температура $t_{\text{кон}}$ из промежутка между t_2 и t_1 , т. е. $t_2 < t_{\text{кон}} < t_1$. Таким образом,

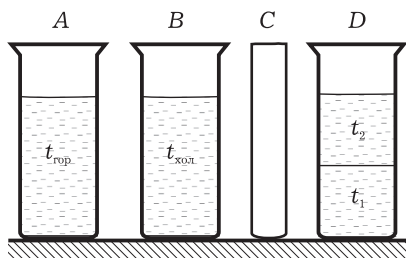


Рис. 2.6

после всех этих манипуляций в сосуде A вода имеет температуру t_2 , а вся вода из сосуда B оказалась в сосуде D и имеет температуру $t_{\text{кон}} > t_2$, что и требовалось доказать.

Например, если $t_{\text{гор}} = 100^\circ\text{C}$ и $t_{\text{хол}} = 0^\circ\text{C}$, то, разделяя холодную воду на две равные части и применяя к ней изложенную выше процедуру, мы имели бы

$$t_1 = \frac{2t_{\text{гор}} + t_{\text{хол}}}{2 + 1} = \frac{2 \cdot 100 + 0}{3} \approx 66,6^\circ\text{C};$$

$$t_2 = \frac{2t_1 + t_{\text{хол}}}{2 + 1} = \frac{2 \cdot 66,6 + 0}{3} \approx 44,4^\circ\text{C};$$

$$t_{\text{кон}} = \frac{t_1 + t_2}{2} = \frac{66,6 + 44,4}{2} = 55,5^\circ\text{C} > 44,4^\circ\text{C}.$$

В реальности из-за неизбежного рассеяния тепла во время процедуры нагрева значения t_2 и $t_{\text{кон}}$, конечно же, будут несколько меньше, но знак неравенства сохранится.

Второе начало термодинамики мы нигде не нарушаем, т.к. для получения требуемого результата нам приходится расплачиваться совершением работы по отношению к системе сосудов с водой.

Отметим, что, разделяя холодную воду не на две, а на большее количество частей, можно получить окончательную ее температуру еще более высокой. Действительно, разделив холодную воду на n равных частей, после первого теплообмена получаем температуру горячей воды

$$t_1 = \frac{nt_{\text{гор}} + t_{\text{хол}}}{n+1} = \frac{nt_{\text{гор}} - nt_{\text{хол}} + (n+1)t_{\text{хол}}}{n+1} =$$

$$= \frac{n}{n+1}(t_{\text{гор}} - t_{\text{хол}}) + t_{\text{хол}},$$

после второго

$$t_2 = \frac{nt_1 + t_{\text{хол}}}{n+1} = \frac{nt_1 - nt_{\text{хол}} + (n+1)t_{\text{хол}}}{n+1} =$$

$$= \frac{n}{n+1}(t_1 - t_{\text{хол}}) + t_{\text{хол}} =$$

$$= \left(\frac{n}{n+1}\right)^2 (t_{\text{гор}} - t_{\text{хол}}) + t_{\text{хол}},$$

после третьего

$$t_3 = \frac{nt_2 + t_{\text{хол}}}{n+1} = \left(\frac{n}{n+1}\right)^3 (t_{\text{гор}} - t_{\text{хол}}) + t_{\text{хол}},$$

и т. д., а после последнего n -го

$$t_n = \left(\frac{n}{n+1}\right)^n (t_{\text{гор}} - t_{\text{хол}}) + t_{\text{хол}}.$$

Окончательную температуру $t_{\text{кон}}$ воды в сосуде D можно найти, смешивая все ее n частей (одинаковых):

$$t_{\text{кон}} = \frac{t_1 + t_2 + \dots + t_n}{n}.$$

Однако еще проще ее найти из того условия, что при равенстве масс и теплоемкостей холодная вода нагреется на столько, на сколько остынет горячая (это следует из условия теплового баланса), т. е.

$$t_{\text{кон}} = t_{\text{хол}} + (t_{\text{гор}} - t_n).$$

Для примера, разделяя холодную воду на $n = 10$ частей и подставляя вышеприведенные значения $t_{\text{гор}} = 100^\circ\text{C}$ и $t_{\text{хол}} = 0^\circ\text{C}$, получим

$$t_{10} = \left(\frac{10}{11}\right)^{10} (100 - 0) + 0 \approx 38,5^\circ\text{C},$$

$$t_{\text{кон}} = 0 + (100 - 38,5) = 61,5^\circ\text{C}.$$

У многих, наверно, сейчас появился большой соблазн разделить холодную воду на еще бóльшее количество частей и, таким образом, «обменивать» температурами горячую и холодную воду «почти полностью». Однако можно показать, что это невозможно и существует вполне конкретный порог, выше которого температура холодной воды при данном способе нагрева не может подняться. Действительно, для $n \rightarrow \infty$ получим

$$\begin{aligned} t_{\infty} &= \lim_{n \rightarrow \infty} \left(\frac{n}{n+1} \right)^n (t_{\text{гор}} - t_{\text{хол}}) + t_{\text{хол}} = \\ &= \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{\left(\frac{n+1}{n} \right)^n} (t_{\text{гор}} - t_{\text{хол}}) + t_{\text{хол}} = \\ &= \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{\left(1 + \frac{1}{n} \right)^n} (t_{\text{гор}} - t_{\text{хол}}) + t_{\text{хол}} = \\ &= \frac{t_{\text{гор}} - t_{\text{хол}}}{e} + t_{\text{хол}}, \end{aligned}$$

где $(1+1/n)^n = e = 2,71828\dots$ — основание натурального логарифма, получаемое из второго замечательного предела. Итак, для нашего примера ($t_{\text{гор}} = 100^\circ\text{C}$, $t_{\text{хол}} = 0^\circ\text{C}$) окончательная температура горячей воды не может спуститься ниже $t_{\infty} = 100/e \approx 36,787^\circ\text{C}$, а холодной — подняться выше $t_{\text{кон}} = 100 - 36,787 = 63,213^\circ\text{C}$.

Вышеописанный способ теплообмена в более совершенном воплощении давно используется в теплотехнике при теплопередаче от одного жидкого (или газообразного) потока к другому. Если нагреваемую и нагревающую жидкости пустить по внутренней B и внешней A трубам попутно (рис. 2.7, *а*), то на выходе температура обеих жидкостей будет приблизительно одинаковой. Если же пустить жидкости по трубам навстречу друг другу (рис. 2.7, *б*), то при достаточно длинных трубах и правильно выбранных сечениях и скоростях жидкостей последние почти целиком обмениваются температурой. Это возможно, так как показанная на рис. 2.7, *б* система не замкнута (в рассказе о сосудах с водой система была замкнута). И не

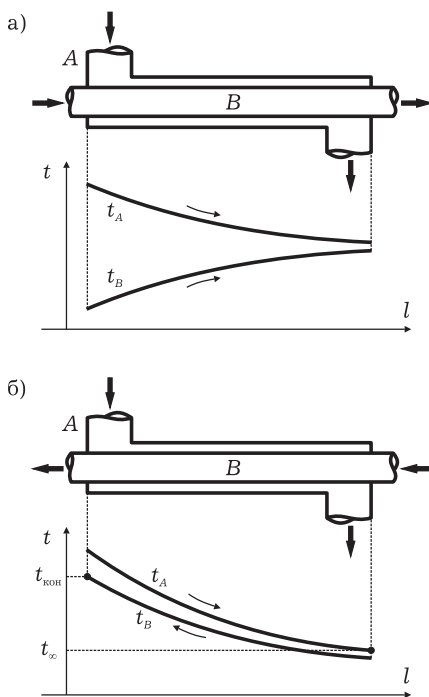


Рис. 2.7

следует забывать, что почти полный обмен температурами будет только в установившемся режиме — начальные и конечные порции воды, соответствующие переходным процессам включения и выключения установки, обмениваются температурами только частично.

Самое интересное в том, что природа давным-давно эксплуатирует подобные системы теплообмена. Например, это кровоснабжение конечностей у тюленей и моржей: вены, по которым кровь возвращается к сердцу, просто оплетают артерии, несущие кровь к конечностям. При этом тепло артериальной крови, текущей от сердца, отдается более холодной венозной крови, возвращающейся из отдаленной части лапы или хвоста, уменьшая теплотери организма через конечности (ведь на них нет жирового слоя) [11, 17, 70, 80].

2.26. ЭКОНОМНОЕ КИПЯЧЕНИЕ

Как известно, теплоемкость воды при 20°C равна $4190 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot^{\circ}\text{C})$. Это означает, что для нагрева 1 г воды на 1°C требуется $4,19 \text{ Дж}$ тепловой энергии. До недавнего времени эта величина являлась единицей (эталоном) для измерения тепловой энергии и называлась **калорией** (кал). Таким образом, для нагрева 1 г воды на 1°C требуется 1 кал тепла.

Теперь поставим такой вопрос: можно ли довести до кипения 100 л воды, имеющей температуру 20°C , затратив только $3 \cdot 10^6 \text{ кал}$ энергии?

Простой подсчет показывает, что 100 л воды имеет массу 100 кг или 10^5 г . Значит, с помощью $3 \cdot 10^6 \text{ кал}$ тепла 10^5 г воды можно нагреть на 30° , т.е. до 50°C . Таким образом, довести до температуры 100°C одновременно все 100 л воды с помощью отведенного нам тепла невозможно.

Однако заметим, что в постановке вопроса нет требования, чтобы вся вода кипела одновременно. Те, кто читал предыдущую статью, наверное, уже догадались, что воду можно доводить до кипения по частям, а недостающее для подогрева холодной воды тепло можно извлекать из уже прокипевшей. Остывая, она не перестанет быть кипяченой, т.е. не потеряет своего главного достоинства, ради которого ее обычно кипятят, — уничтожения микробов.

Задача легко решается небольшой переделкой устройства из рис.2.7, б. Холодная вода поступает в наружную трубу A (рис.2.8) и движется по ней вправо, постепенно нагреваясь. У правого конца устройства находится источник тепла T (например, электронагреватель), поэтому здесь вода закипает. Далее прокипевшая вода по внутренней трубе B идет влево, отдавая тепло движущейся навстречу холодной воде (для лучшей теплоотдачи внутреннюю трубу можно выполнить в форме змеевика). Таким образом, на вход трубы A подается холодная сырая вода, а с выхода трубы B снимается холодная кипяченая. На рис.2.8 также показано примерное распределение температур вдоль труб.

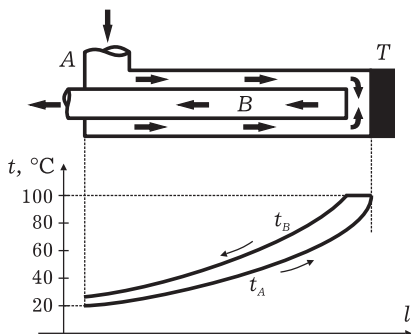


Рис. 2.8

Если правильно подобрать длину и сечение труб, а также скорость течения воды, то отпущенной энергии должно хватить для реализации замысла. Правда, необходимо учитывать еще то, что при кипении много тепла можно потерять на парообразование. Поэтому скорость движения воды в системе надо подобрать так, чтобы около источника тепла T вода только дошла до кипения, и тут же отправлять ее во внутреннюю трубу. Кроме того, последние литры воды, прокипев, будут возвращаться неостывшими (холодная вода кончилась), что тоже снижает эффективность нашего кипяtilьника. Впрочем, последние два недостатка незначительны, если устройство будет работать достаточно долго, т. е. будет кипятить, допустим, не 100 л с помощью $3 \cdot 10^6$ кал энергии, а 100 000 л с помощью $3 \cdot 10^9$ кал [80].

2.27. СРАВНЕНИЕ ТЕПЛОЕМКОСТЕЙ ВЕЩЕСТВ

Теплоемкость — количественная мера теплоты, необходимой для нагревания тела на 1 градус. В справочных таблицах обычно приводятся теплоемкости различных веществ, приведенные на единицу их массы — **удельные теплоемкости**. В этом случае теплоемкость как характеристика вещества не зависит от его количества в данном теле. Единицей измерения удельной теплоемкости является Дж/(кг·град). Для унификации теплоемкости как характеристики вещества можно также

пользоваться **молярной теплоемкостью**, т. е. теплоемкостью, приходящейся на 1 моль вещества.

Как уже указывалось в предыдущей статье, в качестве эталона теплоемкости может служить (и до недавнего времени служила) теплоемкость воды. Количество теплоты, необходимое для нагрева 1 г воды на 1°C , называется **калорией**. Таким образом, если удельная теплоемкость вещества равна, скажем, 5 кал/(г·град), то это означает, что его теплоемкость больше теплоемкости воды в 5 раз. Такое сравнение иногда намного нагляднее и удобнее. Предпочтение было отдано воде (на заре возникновения термодинамики) по вполне простым причинам: во-первых, вода широко распространена в природе; во-вторых, первые тепловые двигатели были паровыми. Кстати, удельная теплоемкость льда (воды в твердом состоянии) в 2 раза меньше теплоемкости воды (0,505 кал/(г·град)), а водяного пара — еще меньше (0,46 кал/(г·град)).

Подавляющее большинство твердых тел имеет теплоемкость меньшую, чем у воды. Из них больше всех требует теплоты для своего нагревания **литий** — его удельная теплоемкость равна 1,04 кал/(г·град).

Из жидкостей наибольшей удельной теплоемкостью обладает на самом деле не вода, как многие привыкли думать, а **жидкий водород** — его теплоемкость 6,4 кал/(г·град). **Сжиженный аммиак** также обладает теплоемкостью большей, чем вода (хотя и не намного).

Наибольшего количества теплоты для своего нагревания из всех тел природы — твердых, жидких и газообразных — требует **водород**. Его удельная теплоемкость в газообразном состоянии (при постоянном давлении) равна 3,4, а в сжиженном, как уже было сказано, — 6,4 кал/(г·град). **Гелий** в газообразном состоянии обладает более высокой удельной теплоемкостью (1,25 кал/(г·град)), нежели вода [66, 95].

2.28. ПРИМУС ВМЕСТО ОЧАГА

С древнейших времен единственным способом использования теплоты горения для приготовления пищи и других целей был открытый очаг (костер). Очаг имел множество недо-

статков, главными из которых были задымленность и неполное сгорание топлива и, соответственно, образование большого количества сажи. Поэтому открытый огонь догадались закрывать каменной или кирпичной кладкой (или металлом) — так получилась печка с плитой и дымоходной трубой. Первые печи-плиты из обожженного кирпича появились примерно в 2500 г. до н.э. в древних цивилизациях Шумера (в Ираке) и Египта. В плитах за счет хорошо организованной тяги (см. ст. 1.33 на с. 69) практически отсутствует задымленность и происходит более полное сгорание топлива. Топливом для плит вначале служили дрова, потом стали применять уголь, торф, сланцы, газ и т. д.

Несмотря на несомненные преимущества по сравнению с открытым очагом, печные плиты обладали и рядом недостатков: они являлись стационарными устройствами; топливо необходимо было или хранить в достаточном объеме (в случае твердых топлив), или прокладывать трубопроводы для его подвода (в случае газа и жидких топлив); у них был низкий КПД; к тому же для разогрева плиты требовался достаточно большой промежуток времени.

Приблизительно в 1880 г. шведский изобретатель **Ф. В. Лундквист** создал керосиновую горелку, работавшую без образования сажи. К тому же она обеспечивала лучший нагревательный эффект, чем другие известные тогда приборы. Возможность вскипятить воду за 3–4 минуты и поджарить мясо за 5 минут была сенсацией, сравнимой только с появлением микроволновых печей в наше время.

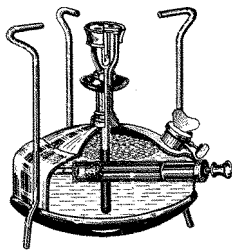


Рис. 2.9

Устройство представляло собой бесфитильный нагревательный прибор, работавший на жидком топливе — бензине или керосине. Для современного читателя можно сказать, что принцип работы изобретенного Ф. В. Лундквистом прибора похож на принцип работы паяльной лампы: горючее под давлением, создаваемым при розжиге с помощью встроенного насоса и затем поддерживаемого за счет нагрева, поступает

в трубчатую часть горелки, где нагревается до нужной температуры (рис. 2.9). Затем горючее поступает в форсунку, из которой распыляется в испарительную камеру. В ней пары горючего смешиваются с воздухом и сгорают в конфорке.

Лундквист стал продавать горелки друзьям и соседям, и вскоре дело выросло в большое предприятие, которому дали гордое название «Примус», что по-латыни означает «первый», «лучший».

Компания стала экспортировать свои изделия, и плиты фирмы «Примус» быстро завоевали мир. Вскоре название «Примус» стало нарицательным.

В Советской России примусы получили широкое распространение с 1922 г., когда их начал выпускать первый государственный меднообрабатывающий завод, расположенный в г. Кольчугино Владимирской обл. (ныне ЗАО «Кольчуг-Мицар»). В связи с тем, что в СССР были широко распространены коммунальные и просто неблагоустроенные квартиры, не имеющие газоснабжения, примус был наиболее удобным прибором для приготовления пищи (электричество было слишком дорогим, чтобы использовать электроплитки). После 50-х годов примусы стали вытесняться газовыми и электрическими плитами.

По производительности, экономичности и компактности примусы до сих пор являются самыми эффективными из всех нагревательных приборов, работающих на жидком топливе, поэтому они и ныне популярны среди туристов и дачников [50, 62, 191].

2.29. КАК ОБНАРУЖИТЬ ПОЖАР!

Суть любого метода предотвращения пожара — раннее обнаружение возгорания. Это можно сделать с помощью постоянных спутников пожара — высокой температуры и дыма. Поэтому в качестве детекторов пожара используют датчики, измеряющие температуру и/или уровень задымленности. Датчики эти помещают на потолке (если вы сидите в учебной аудитории, посмотрите наверх), т.к. горячий воздух от очага возгорания всегда устремляется вверх.

В качестве температурного датчика обычно используют **биметаллический контакт**, основой которого является стопка из двух спаянных между собой металлических пластин с разными коэффициентами теплового расширения (см. ст. 5.14 на с. 487). При повышении температуры пластины удлиняются в разной мере, что ведет к изгибанию биметаллического контакта, замыкающего электрическую цепь прибора и включающего таким образом пожарную сирену или другую систему оповещения (кстати, подобные же датчики стоят и в электрических утюгах и чайниках). Этот тип датчика пожарной сигнализации — один из самых старых, но у него есть существенный недостаток: он достаточно инертен и частенько срабатывает тогда, когда пожар уже успевает разрастись до угрожающих размеров. Однако в помещениях, где много пыли и дыма (например, в гаражах от работающих двигателей), это единственный вариант, т.к. детекторы дыма будут давать много ложных срабатываний.

Действие **дымового датчика** основано на том, что возгорание обычно сопровождается выделением большого количества дыма. По принципу действия эти датчики делятся на **ионизационные** и, наиболее распространенные, **фотоэлектрические**.

В ионизационных детекторах дыма основным элементом является слабый источник радиоактивного альфа-излучения (как правило, это америций ^{241}Am). (Опасности для человека это альфа-излучение не представляет, т.к. оно задерживается даже листом бумаги и полностью поглощается слоем воздуха толщиной в несколько сантиметров.) Он ионизирует воздух в пространстве между металлическими пластинами-электродами, к которым подано электрическое напряжение. За счет образующихся ионов электрическая цепь между электродами замыкается и возникает ток, величина которого отслеживается специальной схемой. Как только между пластинами оказываются микрочастицы дыма, они связываются с ионами и нейтрализуют их заряд, что ведет к уменьшению тока в цепи. На это реагирует специальная электрическая схема, которая подает сигнал тревоги. Датчики, устроенные на этом принципе, демонстрируют весьма впечатляющую чувствительность,

реагируя еще до того, как первые признаки дыма обнаруживаются людьми. Однако у этого датчика есть и недостаток, связанный с тем, что электропроводность воздуха зависит еще и от влажности. Это может приводить к ложным срабатываниям датчика при понижении влажности воздуха и, наоборот, к его нечувствительности при высоких влажностях.

Указанного недостатка лишен самый распространенный фотоэлектрический датчик дыма, использующий тот факт, что частицы дыма рассеивают свет, проходящий через воздух. Поэтому интенсивность рассеянного света может служить показателем задымленности воздуха. Изменение интенсивности рассеянного света при задымлении регистрируется фотоэлектрическим датчиком, включающим систему оповещения [11].

2.30. ЛАМПА ДЭВИ

Открытый огонь в шахтах очень опасен, так как в каких-то участках под землей может быть горючий газ — метан. Тем не менее вплоть до начала прошлого века шахтеры пользовались лампами с открытым огнем (пока их не вытеснили электрические лампы). Для этого они были окружены со всех сторон мелкой металлической сеткой. Такой экран, конечно, не препятствовал попаданию горючего газа внутрь лампы, но тем не менее он предотвращал взрыв. Каким образом?

Защитная сетка таких ламп хорошо проводит тепло, поэтому температура слоев горючего газа, прилегающих к сетке, ниже температуры его вспышки. Горючие газы, конечно, могут попасть внутрь лампы и дойти до открытого пламени, но при этом происходит всего лишь небольшой взрыв (вспышка, хлопок) и лампа гаснет.

Убедиться в справедливости вышесказанного можно на простейшем опыте. С помощью треноги поставьте над конфоркой газовой плиты металлическую сетку с узкими ячейками и зажгите газ над сеткой. Вы заметите, что горение происходит над сеткой и оно не распространяется под нее. Это происходит потому, что металлическая сетка отводит тепло в сторону и отдает его окружающему воздуху.

Лампа такой конструкции была изобретена в 1815 г. английским физиком и химиком **Гемфри Дэви** (1778–1829) и поэтому называется **лампой Дэви**. Лампа может быть любой — масляной, керосиновой или карбидной, главное, чтобы пламя было закрыто металлической сеткой, размер ячеек и теплоемкость материала которой должны быть подобраны таким образом, чтобы при воспламенении горючего газа, попадающего внутрь сетки, горение не распространилось наружу и не вызвало взрыва газовоздушной смеси в шахте.

Фактически, лампу Дэви можно назвать одним из первых **газоанализаторов**, сигнализирующих о присутствии в воздухе горючих газов своим неравномерным горением, сопровождающимся вспышками и хлопками. Значение этого изобретения, сохранившего множество человеческих жизней, до сих пор сложно переоценить. За свое изобретение Дэви был удостоен звания баронета (до этого в 1812 г. за свою научную деятельность он получил титул лорда), а богатые шахтовладельцы Англии подарили ему серебряный сервиз.

В настоящее время от открытого огня в шахтах отказались вовсе, заменив их электрическими светильниками, а для обнаружения горючих газов используются электрические газоанализаторы. Например, на рис. 2.10 изображен один из таких приборов, принцип работы которого основан на том, что горючие газы являются более легкими по сравнению с воздухом. Прибор состоит из сообщающихся сосудов, в которые налита ртуть.

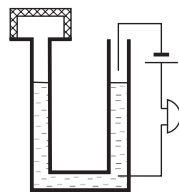


Рис. 2.10

Один сосуд оканчивается сверху пористым цилиндром, другой сверху открыт. Прибор включен в электрическую цепь со звонком. При появлении горючего газа в шахте его более легкие молекулы диффундируют через пористый цилиндр быстрее, чем из него выходят наружу более тяжелые молекулы воздуха (это явление **эффузии**; см. ст. 1.45 на с. 90). Вследствие этого давление под пористым цилиндром оказывается выше, чем снаружи, и ртуть, перемещаясь, касается электрода. Электрическая цепь замыкается (ртуть — хороший проводник электричества) и звонок начинает звенеть [55, 86, 138, 140, 191].

2.31. ТЕПЛОВАЯ ТРУБА

Среди новых теплообменных систем, созданных в последние годы, важное место занимают **тепловые трубы**. Один из простых вариантов тепловой трубы — это закрытый металлический цилиндр, внутренние стенки которого выложены слоем пористого капиллярного материала, пропитанного легкоиспаряющейся жидкостью. Именно с движением этой жидкости связана теплопроводность трубы: на горячем конце жидкость испаряется и отбирает тепло; пары сами перемещаются к холодному концу — это обычная **конвекция**; здесь пары конденсируются и отдают тепло; образовавшаяся жидкость по капиллярному материалу возвращается обратно к горячему концу трубы.

Тепловые трубы — непревзойденные проводники тепла. Действительно, через тепловую трубу диаметром в 1 см можно прогонять тепловую энергию порядка 10 кДж в каждую секунду при разности температур на концах трубы всего в 5 °С. Чтобы пропустить такую же тепловую мощность через медный стержень указанного диаметра, на его концах нужен был бы перепад температуры почти 150 000 °С.

Тепловые трубы сейчас получили широкое применение: их можно встретить в космической технике, ядерных реакторах, криогенных хирургических инструментах, в системах охлаждения двигателей, в строительстве и т. д., которые могут работать в очень широком диапазоне температур.

Например, в зонах вечной мерзлоты дома строят на сваях на некоторой высоте от поверхности земли. Это делается для того, чтобы тепло от жилища не растапливало замерзший грунт — иначе прочность основания дома резко снижается, что может привести к обрушению дома. В районах, где летом температура повышается на значительную величину, это представляет реальную угрозу. Поэтому строители догадались погружать в грунт под зданием аналог простейшей тепловой трубы. Он представляет собой металлическую трубу (или систему из нескольких труб), наполненную керосином и наглухо завинченную. Труба погружается в грунт на две трети своей длины, т. е. верхняя ее часть открыта полярным ветрам и сту-

жам. Зимой керосин, находящийся над поверхностью земли, имеет температуру окружающего воздуха — примерно минус 20–30 градусов. Плотность его верхних слоев гораздо выше, чем нижних. Поэтому охлажденные слои по закону гравитации опускаются вниз, гонят мороз в глубь земли, создавая там надежный запас прочности. С наступлением же тепла такая циркуляция прекращается. Благодаря зимнему запасу холода в радиусе 12 и более метров вокруг сваи-холодильника все лето держится температура в пределах минус два-пять градусов.

Аналог такого устройства, только не холодильника, а отопителя, вы можете легко устроить у себя в гараже. Для этого внутри гаража в грунт зарывается большая пустая металлическая емкость с двумя трубами, которые выводятся в пространство гаража. Одна труба должна быть на уровне пола, а другая — на уровне потолка. В зимний период грунт промерзает только до определенной глубины, ниже которой его температура выше температуры наружного атмосферного воздуха (см. ст. 3.53 на с. 363). Поэтому зимой холодный, а оттого тяжелый воздух внутри гаража по первой более низкой трубе опускается вниз, выдавливая оттуда более теплый (и потому легкий) воздух по другой трубе. Опустившийся холодный воздух, в свою очередь, нагревается и выдавливается следующей порцией опускающегося холодного воздуха — образуется устойчивый круговорот, поддерживающий температуру в гараже выше той, что на улице.

Нашли тепловые трубы применение и в быту. Например, в США продается специальное приспособление для жаренья мяса. Оно представляет собой систему закрытых с обоих концов вертикальных трубок, закрепленных над жаровней. Нижний конец трубок плоский, верхний — заостренный. Мясо нанизывается на эти трубки. Внутри каждой трубки проходит смоченный водой фитиль. Нижний (более широкий) конец трубки согревается теплом жаровни и вода, заключенная внутри нее, нагревается и превращается в пар, потребляя при этом большое количество тепла. Горячий пар поднимается в верхний конец трубки. Здесь пар конденсируется, высвобождая тепло, которое в свое время было затрачено на переход воды в

пар. Жидкая вода стекает по трубке вниз, и цикл начинается сначала. При использовании такого приспособления мясо получает в 100–1 000 раз больше тепла, чем в случае цельного стержня из того же металла, и время готовки мяса уменьшается почти вдвое [7, 11, 49, 140, 160].

2.32. ЛУЧШАЯ ПЕЧЬ — ЭТО ХОЛОДИЛЬНИК!

Это не шутка и не розыгрыш. Во многих домах для отопления используются электрические нагреватели (электрокамины). И действительно, в этом случае холодильник вместо электрокамина — самый экономичный и экологичный отопитель.

Для реализации такой печки необходимо иметь холодильник с отдельными агрегатами: компрессор и теплообменник в обогреваемом помещении, а испаритель (морозильная камера) — на улице, которые нужно соединить длинными металлическими (лучше — медными) трубками. При работе этой печки расход энергии для нагрева помещения будет намного меньше, чем при использовании одного только электрического нагревателя. Связано это с тем, что холодильник работает как **тепловой насос**, перекачивая теплоту в отапливаемое помещение:

$$\Delta Q_1 = \Delta Q_2 + A', \quad (2.16)$$

где ΔQ_1 — теплота, отдаваемая теплообменником воздуху комнаты; ΔQ_2 — теплота, отбираемая у воздуха с улицы; A' — внешняя работа компрессора, совершаемая за счет электрической энергии. Таким образом, как видно из формулы (2.16), выгода здесь в том, что мы не тратим электроэнергию на производство теплоты ΔQ_2 , а просто забираем ее с улицы. Иначе нам пришлось бы затратить еще некоторую порцию электрической энергии для производства теплоты ΔQ_2 .

Насколько выгоден такой отопитель? Если вместо реального холодильника взять идеальную тепловую машину, работающую по обратному циклу Карно, то ее КПД был бы $\eta = (T_1 - T_2)/T_1$ (см. ст. 2.12 на с. 116), где T_1 — требуемая температура в помещении; T_2 — температура на улице. С другой стороны, КПД холодильной машины (как разновид-

ности тепловой машины) по определению равен $\eta = A' / \Delta Q_1$. Приравнявая правые части выражений и преобразовывая результат, получим

$$\Delta Q_1 = A' \frac{T_1}{T_1 - T_2} = A' \frac{1}{1 - T_2/T_1}. \quad (2.17)$$

Мы заинтересованы в том, чтобы при минимуме затрачиваемой работы A' получить как можно большее количество теплоты ΔQ_1 для обогрева помещения. Из (2.17) видно, что при одной и той же работе A' мы получаем тем больше теплоты ΔQ_1 , чем меньше разница между температурами T_2 и T_1 . Если же $T_2/T_1 \ll 1$, то, как видно из (2.17), отопление с помощью холодильника не дает выигрыша: $\Delta Q_1 \approx A'$.

Для наших климатических условий можно считать, что зимой температура воздуха на улице $T_2 = -20^\circ \text{C} = 253 \text{ K}$, а требуемая температура в помещении $T_1 = 20^\circ \text{C} = 293 \text{ K}$. Тогда

$$\frac{T_1}{T_1 - T_2} = \frac{293}{293 - 253} \approx 7.$$

Другими словами, затрачивая одну единицу электрической энергии, мы бы получали в 7 раз большее количество теплоты для обогрева помещения!

На самом деле необходимо вспомнить, что этот результат относится к идеальной холодильной машине. Реальные холодильники являются неидеальными, поэтому и результат будет несколько скромнее. С другой стороны, имеется еще и экономический фактор: такой отопитель требует дополнительного обслуживания (из-за утечки хладагента, износа компрессора и т. д.), к тому же он несколько громоздок. Поэтому, может оказаться и так, что с точки зрения экономики выгоднее использовать классический электронагреватель.

Тем не менее, если у вас имеются исправные узлы старого холодильника, можете попытаться соорудить такой отопитель самостоятельно (чем выбрасывать — таким образом вы экономически несколько окупитесь).

Между тем, в мире в связи с подорожанием цен на энергоносители в настоящее время наблюдается самый настоящий

бум на тепловые насосы. Общий ежегодный объем продаж выпускаемых за рубежом тепловых насосов составляет более 100 млрд долларов (что превышает мировой объем продаж вооружения в несколько раз!). Например, Швеция уже сегодня 70% тепла для обогрева получает с помощью тепловых насосов мощностями от 2 кВт до 200 МВт. Россия в этом отношении пока сильно отстает (нас, как всегда, «портит» наличие богатых запасов углеводородного топлива).

Исторически впервые отопитель подобного рода предложил в 1852 г. английский физик **лорд Кельвин** (1824–1907) на основе анализа цикла Карно (см. ст. 2.12. на с. 2.12) [9, 11, 20, 43, 47, 102].

2.33. ПОЧЕМ ЧАШКА ЧАЯ?

Одна из формулировок II начала термодинамики гласит, что тепло нельзя полностью превратить в работу (см. ст. 2.13 на с. 119). Если такое было бы возможно, то у человечества исчезли бы все энергетические проблемы — ведь мы в буквальном смысле погружены в «тепловую среду».

Например, при остывании чашки горячего чая (250 г воды) со 100 до 20 °С (т.е. от температуры кипения до комнатной) он теряет не менее

$$\Delta Q = cm\Delta T = 4190 \cdot 0,25 \cdot 80 = 84 \text{ кДж}$$

энергии. Если бы была возможность полностью превратить эту энергию в электрическую, она смогла бы в течение часа обеспечить работу 25-ваттной лампочки. Если эту энергию полностью превратить в механическую работу, ее окажется достаточно, чтобы поднять груз в 8540 кг на высоту 1 м (или 854 кг на высоту 10 м). Такую же работу совершает 5-тонный груз, падая с высоты человеческого роста.

Вот еще более поразительное сопоставление. Такая же энергия заключается в 38 пулях, вылетевших из ствола ручного пулемета Калашникова (калибр 7,62 мм, масса пули 7,9 г, начальная скорость 745 м/с), или в 277 пулях, вылетевших из ствола пистолета Макарова (калибр 9 мм, масса пули 6,1 г,

начальная скорость 315 м/с). Вот какая энергия запасена в чашке горячего чая!

Но запас этот еще очень скромен по сравнению с энергией пара. Дело в том, что для превращения воды в пар (тоже 100-градусный) недостаточно нагреть ее до 100°C — необходимо подводить еще дополнительную теплоту, называемую **скрытой теплотой испарения** (более правильно называть **теплотой фазового перехода**). Скрытой теплоты требуется очень много: для полного превращения чашки горячего чая (250 г воды при 100°C) в 100-градусный пар надо сообщить воде 565 кДж теплоты — почти в семь раз больше, чем нужно теплоты для нагревания той же самой чашки воды от 20 до 100°C . Вот почему пар заключает в себе гораздо больший запас энергии, чем вода при той же температуре (100°C). Неудивительно, что энергия пара долгое время использовалась (и используется!) человечеством.

Однако не так-то просто заставить эту энергию работать нам на пользу — только ее малую часть с помощью тепловых машин можно превратить в полезную работу. В этом и состоит суть II начала термодинамики [62, 97].

2.34. ЧТО МОЖЕТ И НЕ МОЖЕТ ПЛАМЯ

Мы обычно недооцениваем такие, казалось бы, скромные источники тепла, как обыкновенная свеча или спички. Для многих поэтому является неожиданностью, что температура пламени в них достигает почти 1600°C (рис. 2.11). Тем не менее, если внести гвоздь, например, в пламя свечи, то он не плавится, хотя известно, что температура плавления железа 1535°C , т. е. ниже температуры пламени свечи. Почему?

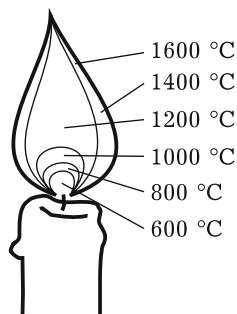


Рис. 2.11

Причина в том, что одновременно с получением тепла от пламени гвоздь теряет тепло путем излучения. Чем выше поднимается температура нагреваемого предмета по сравнению с

температурой окружающей среды, тем интенсивнее и теплопотеря (это так называемый **закон Ньютона** для теплопередачи). В конце концов наступает такой момент, когда потеря и приход тепла уравниваются, и дальнейшее повышение температуры гвоздя прекращается, не достигнув значения 1535°C .

В принципе, гвоздь можно было бы расплавить, если бы он целиком умещался в пламени. В этом случае температурная разность гвоздя и окружающей среды стала бы равной нулю и излучение энергии отсутствовало бы. Но так как обычно в пламени помещается только часть гвоздя и выступающие части беспрепятственно излучают тепло, то равенство притока и потери тепла наступает значительно раньше, чем гвоздь нагреется до температуры плавления железа. Таким образом, гвоздь не плавится в пламени свечи не оттого, что пламя недостаточно горячо, а оттого, что оно недостаточно объемно, т. е. не окружает гвоздь со всех сторон.

Не менее впечатляющей является и тепловая мощность, развиваемая при горении спички или свечи. Например, спичка весит около $0,1\text{ г}$, а ее (древесины) удельная теплота сгорания равна $13 \cdot 10^6\text{ Дж/кг}$. Можно определить по часам, что спичка сгорает секунд за 20. Значит, тепловая мощность при сгорании целой спички равна

$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = \frac{13 \cdot 10^6 \cdot 0,1 \cdot 10^{-3}}{20} = 65\text{ Вт}$$

и она по мощности превосходит 50-ваттную электрическую лампочку [11, 95].

2.35. КАК БЫСТРЕЕ!

Допустим, вы очень торопитесь на занятия, но перед уходом из дому хотите успеть выпить стакан чая со сливками. Как поступить, чтобы скорее остудить горячий чай: сразу долить в него холодные сливки, а затем выждать пять минут или вначале подождать пять минут, а после добавить сливки?

Давайте посчитаем. За одно и то же время тело отдает в окружающее пространство тем большее количество тепла, чем

сильнее его температура отличается от температуры окружающей среды (см. предыдущую статью). Поэтому остывание происходит вначале быстро, а затем все медленнее. Отсюда вывод: разумнее вначале выждать пять минут, когда теплота теряется остывающим телом быстрее, а затем добавить сливки [16, 70, 79].

2.36. ПЕРВЫЕ ТЕПЛОВЫЕ МАШИНЫ

Первый тепловой, а именно паровой, двигатель придумал работавший в Александрии древнегреческий ученый **Герон Александрийский** (I век до н.э.) почти 2 тысячи лет назад. Сам Герон назвал свою машину **эолипилом** в честь Эола — бога ветров в древнегреческой мифологии (древние думали, что вода при нагревании переходит в горячий воздух).

Машина Герона представляла собой сосуд с водой, шарнирно соединенный двумя трубками с полым шаром, содержащим два сопла, загнутых в одну и ту же сторону (рис. 2.12). Когда под сосудом разводили огонь, пар по трубкам попадал в шар и по соплам вырывался наружу. Шар начинал быстро вращаться и раскручивался до 1500 об/мин. Однако турбина не выполняла никакой полезной работы (хотя вполне могла бы это делать) — была дешевая сила животных и рабов, и машины тогда были лишь в качестве игрушек. Лишь в XVII в. аналог эолипила Герона нашел практическое применение — в 1629 г. римский архитектор **Дж. Бранка** опубликовал книгу «Различные машины», где рассказал об использовании такой же турбины, как и у Герона, для дробления руды. Интересно, что в середине XVIII в. эолипил был заново «переизобретен» венгерским ученым **Я. Сегнером** (1704–1777), от которого получил современное название «**сегнерово колесо**».

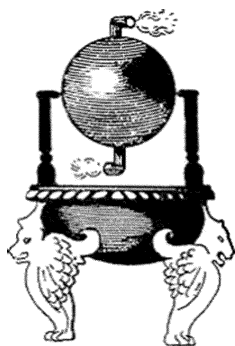


Рис. 2.12

Первые **поршневые машины** (подчеркнем это, так как вообще первая паровая машина — это все-таки эолипил Герона)

начали создаваться в XVII в., но они имели очень маленький КПД, были громоздкими и слабосильными. В этих машинах пар совершал работу при перемещении поршня только в одном направлении, в обратную же сторону поршень возвращался за счет атмосферного давления.

Самой первой машиной, работавшей по этому принципу, была модель французского ученого **Д. Папена** (1647–1712), созданная в 1690 г. Вода в цилиндре при нагревании превращалась в пар и двигала поршень вверх, после чего в цилиндр впрыскивалась холодная вода, а источник пламени перемещался в сторону. Пар конденсировался, в цилиндре создавалось разрежение и наружное атмосферное давление двигало поршень вниз. Опускаясь, поршень тянул за собой веревку с грузом. Машина была очень несовершенна, ее работу приходилось регулировать вручную специально поставленным для этого человеком.

После этого были предложены различные усовершенствованные варианты пароатмосферных машин.

В 1698 г. английский изобретатель **Т. Севери** (1650–1715) изобрел паровой насос для откачки воды из шахт, работавший без поршня. Всасывание воды происходило путем конденсации пара и создания разреженного пространства над уровнем воды в сосуде. Также Т. Севери отделил котел от сосуда, где производилась конденсация. Хотя его машина обладала низкой экономичностью, но все-таки нашла широкое применение. Примечательно, что впервые паровая машина Севери начала работать в России: она была заказана в Англии Петром I. Купленная машина качала воду для фонтанов в Летнем саду в Санкт-Петербурге.

В 1705 г. английский механик **Т. Ньюкомен** (1663–1729) предложил более совершенный паровой поршневого насос, который в общих чертах повторял машину Папена, но работал без участия человека. Основным недостатком машины Ньюкомена состоял в том, что рабочий цилиндр в ней являлся в то же время и конденсатором. Из-за этого приходилось поочередно то охлаждать, то нагревать цилиндр, и расход топлива оказывался очень велик. Последующие изобретатели внесли много

усовершенствований в насос Ньюкомена, но принципиальная схема оставалась неизменной на протяжении 50 лет.

Поэтому настоящим прорывом стала поршневая паровая машина, созданная **Джеймсом Уаттом** (1736–1819) в Англии в 1774 г. и получившая после этого широкое распространение (рис. 2.13). Именно в его машине пар своим давлением осуществлял полезную работу при обоих направлениях движения поршня 5 в цилиндре 2 — для этого Уатт использовал золотниковый распределитель пара 3. Сам пар создавался в отдельной емкости и поступал в цилиндр по специальной теплоизолированной трубе 13. Для более экономичной работы двигателя Уатт отделил паровой цилиндр от емкости для конденсации пара (конденсатора), благодаря чему не затрачивалась энергия на постоянный разогрев цилиндра. Постоянство работы двигателя обеспечивалось центробежным регулятором 12, который был связан с дросселем, увеличивающим или уменьшающим подачу пара в цилиндр.

Цикл машины Уатта, соответствующий процессам в цилиндре на одной из сторон от поршня, изображен на рис. 2.14. На нем изохора 0-1 соответствует почти мгновенному повышению давления пара в цилиндре при соединении его с котлом от значения $p_{\text{конд}}$, соответствующего давлению в конденсаторе, до значения $p_{\text{кот}}$ в котле. Изобара 1-2 соответствует движению поршня под действием давления $p_{\text{кот}}$ поступающего из котла пара. В состоянии 2 происходит отсечка пара и начинается его дальнейшее адиабатическое расширение (процесс 2-3). При этом пар совершает работу за счет своей внутрен-

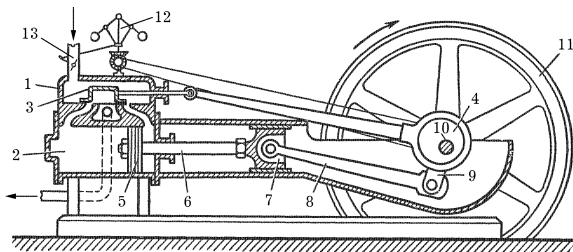


Рис. 2.13

ней энергии и, соответственно, его температура и давление понижаются. Когда поршень достигает конечного положения (состояние 3), открывается выпускной клапан и пар устремляется в конденсатор, при этом его давление почти мгновенно падает до давления в конденсаторе (изохора 3-4). При обратном движении (под действием пара с другой стороны поршня) поршень выталкивает остатки пара в конденсатор (изобара 4-0). Затем все процессы повторяются.

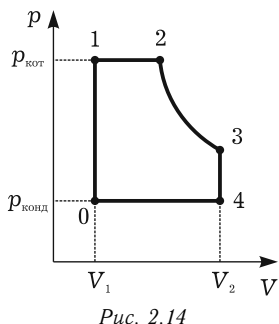


Рис. 2.14

КПД лучших машин Уатта достигал тогда фантастической величины в 2,7%! Нам эта цифра кажется смешной, но именно машины Уатта изменили промышленную энергетику, превратив XIX в. в век пара. За 1785–1795 годы в Англии было выпущено 144 паровых двигателей Уатта, а к 1800 г. работала уже 321 машина.

Творение Уатта было по достоинству оценено потомками: после смерти изобретателя английский парламент в честь него соорудил памятник в Вестминстерском аббатстве.

В России первая двухцилиндровая вакуумная паровая машина была спроектирована механиком **Иваном Ивановичем Ползуновым** (1728–1766) в 1763 г. и построена в 1764 г. для приведения в действие воздуходушных мехов на Барнаульских Колывано-Воскресенских заводах.

Но все-таки именно эолипилы, вернее **паровые турбины**, оказались победителями среди паровых машин. Они единственные и сейчас служат на тепловых и атомных электростанциях, мощных судах. Их КПД на порядок выше, чем у машин Уатта, не говоря уже о мощностях в сотни мегаватт.

Первую работающую паровую турбину создал в 1883 г. (практически через 100 лет после создания паровой машины Уаттом!) шведский инженер **Г. Лаваль** (1845–1913). Турбина представляла собой легкое колесо с лопатками, на которые направлялся пар. Принцип действия турбины был чрезвычайно прост: пар, разогретый до высокой температуры, поступал

из котла к соплу специальной формы (**сопло Лавала** в виде расширяющегося конуса), вырывался наружу и ударялся в лопатки турбины. В сопле пар расширялся до атмосферного давления. Благодаря увеличению объема, сопровождавшему это расширение, получалось значительное увеличение скорости вытекания пара (при расширении от 5 атм до 1 атм скорость паровой струи достигала 770 м/с). Таким образом заключенная в паре энергия передавалась лопастям турбины. Позже Лаваль усовершенствовал паровую турбину: отработанный пар выпускался не прямо в воздух, а как в паровых машинах — в холодный конденсатор, где он превращался в воду, что вело к значительному понижению давления пара. В таких условиях мощность турбины была наивысшей: например, при расширении пара от 5 атм до 0,1 атм скорость струи достигала сверхзвуковой величины. Именно после этого паровая турбина стала универсальным мощным двигателем с очень большим КПД [7, 43, 50, 67, 72, 98, 110, 148, 171].

2.37. ТЕПЛОВАЯ МАШИНА ДЛЯ ПОЛИВА ОГОРОДА

Совсем несложно самому изготовить остроумную тепловую машину для полива огорода, работающую на даровой тепловой энергии. Для этого обычную 200-литровую металлическую бочку надо окрасить снаружи в черный цвет для уменьшения ее отражательной способности. В отверстие бочки необходимо вставить резиновую пробку, через сквозные отверстия в которой пропущены два шланга. Отверстия в пробке после установки шлангов не должны пропускать воздух и воду, поэтому их необходимо загерметизировать. На одном из шлангов необходимо установить всасывающий клапан, а на другом — нагнетающий. Эти клапаны легко изготовить из «пальцев» от резиновой перчатки или снять со старых противогозлов. После этого бочку надо перевернуть и установить на подставку, например, из кирпичей (чтобы не зажать шланги). Шланг с всасывающим клапаном необходимо опустить в емкость с водой, а с нагнетающим — поместить, например, в теплицу, которую надо поливать.

Схема работы устройства следующая. Ночью бочка охлаждается, давление в ней падает, и она всасывает воду. Днем бочка нагревается, особенно если день солнечный, давление в ней растет и выталкивает одно-два и более ведра воды через нагнетающий клапан, поливая растения. Можно в середине недели не ездить на дачу — полив будет обеспечен!

Идея этой машины принадлежит все тому же Герону Александрийскому (см. ст. 2.36). Принцип получения полезной работы, основанный на периодическом изменении температуры окружающего воздуха, также широко использовался в средние века для создания самозаводящихся часов. В зависимости от конструкции в качестве чувствительного к температурным изменениям элемента использовались или металлические стержни, или жидкости (например, глицерин). Известен также случай конструирования часов, завод которых осуществлялся за счет изменения атмосферного давления [19, 43].

2.38. КОНВЕКЦИОННЫЙ ТЕПЛОВЫЙ ДВИГАТЕЛЬ

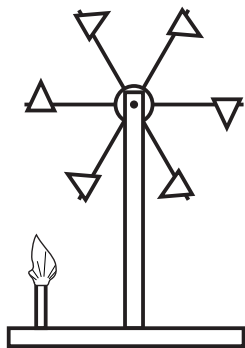


Рис. 2.15

На явлении конвекции (см. ст. 1.33 на с. 69) основан достаточно простой опыт, иллюстрирующий переход тепловой энергии в механическую. Созданное в этом опыте устройство можно назвать конвекционным тепловым двигателем.

Возьмите пробку в виде цилиндра и по его оси сделайте сквозное отверстие (вместо пробки можно взять дерево мягкой породы) (рис. 2.15). Закрепите в отверстии тонкую металлическую или стеклянную трубочку, такую, чтобы сквозь нее достаточно свободно могла проходить проволока в качестве оси вращения. Закрепите ось на стойках. По окружности пробки воткните шесть-восемь проволочных стержней, на концы которых закрепите бумажные конусы. Тщательно уравновесьте получившееся колесо.

Теперь поставьте кусок свечи так, чтобы пламя от нее не касалось бумажных конусов и они не загорелись. Двигатель начнет работать: теплый воздух заставит подниматься вверх один конус за другим, и колесо будет вращаться.

Если вы хотите, чтобы эта модель была не просто игрушкой, но и выполняла какую-то работу, можно крутящий момент передать на какой-нибудь механизм, например, с помощью гибкой или ременной передачи [118].

2.39. КАКИЕ ДРОВА ВЫГОДНЕЕ!

Весьма распространено мнение, что березовые дрова гораздо жарче хвойных и особенно осиновых. Это верно, если сравнивать равные объемы тех и других дров. Например, березовое полено при сгорании дает больше тепла, чем осиновое таких же размеров. Но в физике и технике теплотворную эффективность топлив оценивают в перерасчете не на единицу объема, а на единицу массы. Для этого используется величина, называемая **удельной теплотой сгорания** топлива: $q = \Delta Q / \Delta m$. Так как березовая древесина раза в полтора плотнее осиновой, то не следует удивляться, что удельная теплота сгорания березовых дров оказывается одинаковой с удельной теплотой сгорания осиновых. И вообще, килограмм любой древесины, независимо от породы, как вполне определенное химическое соединение выделяет при сгорании одинаковое количество теплоты (если только процент содержания в них влаги одинаков).

Итак, береза кажется нам жарче осины только потому, что в обиходе мы сравниваем неодинаковые массы этих горючих веществ: берем березовой древесины по массе больше, чем осиновой.

Однако если разные породы дров при одинаковой массе равноценны в смысле количества теплоты, выделяемой при горении, то они все же не вполне равноценны как топливо. В некоторых случаях важна не столько теплота сгорания топлива, сколько быстрота его сгорания. С этой точки зрения медленно горящие дрова тяжелых пород древесины греют лучше быстро сгорающих более легких пород [95].

2.40. ИЗГИБ ГОРЯЩЕЙ СПИЧКИ

Если зажженную спичку держать горизонтально, то по мере продвижения пламени ее сгоревшая часть будет изгибаться и подниматься вверх. Этого не происходит, если спичку держать вертикально. Почему?

Причиной изгиба сгоревшей спички служит вертикальное движение воздуха (тяги) в области горения, в результате которого устанавливается температурный градиент пламени, направленный вверх. Из-за этого градиента верхняя часть горящей спички нагревается до более высокой температуры, чем нижняя. При горении масса и объем спички уменьшаются, причем чем выше температура горения, тем более заметны эти изменения. Значит, верхняя часть горящей спички должна укорачиваться в большей степени, чем нижняя, и сгоревшая часть горизонтально горящей спички загибается вверх.

Кстати, этого не будет происходить в невесомости, например, на космической станции, обращающейся вокруг Земли. В этом случае отсутствует конвекция и, соответственно, тяга, поэтому процесс горения в невесомости может поддерживать только за счет диффузии. Из-за этого пламя имеет форму шара и меньшие размеры, а его температура будет ниже (т.к. нет достаточного притока свежего воздуха, содержащего кислород), так что спичка будет гореть в несколько раз дольше, чем на Земле. Все сказанное было экспериментально подтверждено в 1996 г. на бывшей российской космической станции «Мир» (в целях эксперимента было сожжено около 80 свечей) [11, 173].

2.41. УГОЛЬ

Во время своего пребывания в Китае итальянский путешественник **Марко Поло** (около 1254—1324) сделал удивительное открытие: для получения тепла китайцы широко использовали каменный уголь. Вот как Марко Поло описал это: «По всей стране Китай есть черные камни; выкапывают их в горах как руду, и горят они как дрова. Огонь от них сильнее, нежели от дров. Если вечером, скажу вам, развести хорошенько

огонь, он продержится всю ночь, до утра. Жгут эти камни, знайте, по всей стране Китай. Дров у них много, но жгут они камни, потому что и дешевле, да и деревья сберегаются».

Хотя уголь в Европе был известен с древнейших времен, единственным широко используемым топливом вплоть до XVII в. была древесина. В результате интенсивной вырубki древесины территория Западной Европы практически лишилась лесных массивов, хотя в пору Римской империи Западная Европа была сплошь покрыта лесами. Известно, что к 1500 г. доля древесины в энергетическом рационе Европы доходила до 90%. Лишь в XVII в. с началом промышленной революции в Англии уголь как топливо начал интенсивно использоваться сначала в металлургии, а потом (в XVIII в.) — в паровых двигателях.

Секрет того, почему как топливо уголь лучше древесины, состоит в следующем. Деревья и растения во время своего роста и развития поглощают лучистую энергию Солнца, которая содействует поглощению ими также углерода из углекислого газа, находящегося в воздухе, — это так называемый **фотосинтез** (см. ст. 2.2 на с.97). При этом растительностью из атомов углерода и других химических элементов синтезируются крупные органические молекулы, а энергия Солнца частично трансформируется в энергию химических связей этих молекул.

Так вот, уголь — это продукт глубокого разложения и изменения растительных остатков Земли, происходившего в течение более 300 млн лет, в результате чего энергия Солнца сконцентрировалась в виде залежей угля. Вот почему месторождения угля еще называют кладовыми Солнца.

В состав угля входят те же химические элементы, что и в древесину: углерод, водород, азот и кислород, но процентное соотношение между этими элементами неодинаково (табл. 2.4). И даже различные сорта угля (бурый, каменный, антрацит) отличаются друг от друга содержанием в них углерода и примесей других веществ.

В связи с развитием атомной, гидро- и биоэнергетики и уделению большего внимания воспроизводимым источникам энергии (ветра, морских волн, приливов, непосредственно

Таблица 2.4

**Химический состав
и удельная теплота сгорания q
некоторых топлив**

Топливо	Состав, %				q , МДж/кг
	С	Н	О	N	
Дрова	50	6	43,9	0,1	8,4–13
Торф	60	5	33,5	1,5	10,5–15,1
Бурый уголь	70	6	24,2	0,8	10,5–15,7
Каменный уголь	80	5	13,5	1,5	20,9–30,1
Антрацит	95	2	2,5	0,5	26,8–31,4

солнечной энергии) уголь как основной источник энергии отошел на второй план, но не потерял своего значения.

Во-первых, запасы угля во много раз превосходят запасы нефти и газа. По современным данным, мировые запасы угля составляют около 15 000 млрд. т, чего при нынешнем уровне добычи хватит на 3 570 лет (мировые запасы нефти — 500 млрд. т). Из этих запасов 4 450 млрд. т (29,7%) принадлежат России, чего ей хватит на 17 315 лет.

Во-вторых, уголь — не только превосходное топливо, но и сырье для многих химических производств: после переработки угля получают искусственный бензин, горючие газы, пластмассы, красители, лекарственные вещества и т. д. Технология переработки угля не отличается особой сложностью (другое дело — экономическая целесообразность) и состоит в его быстром нагреве до высоких температур при ограниченном доступе воздуха — это так называемый **скоростной пиролиз**. Быстрота нагрева угля достигается тем, что подается в камеру термического разложения в виде сухой угольной пыли, находящейся во взвешенном состоянии в потоке горячих газов. При этом уголь разделяется на три вида продуктов:

1) газообразные — их можно сжигать либо же использовать для химической переработки в высококачественный бензин для автотранспорта;

2) жидкие: смола и бензол (высококачественное котельное топливо и сырье для производства синтетических веществ);

3) твердые: полукокс и кокс — бездымные, высококалорийные топлива с теплотой сгорания 26–28 МДж/кг, годны и выгодны для перевозки на дальние расстояния (в сыром угле содержание влаги доходит до 40%, так что его транспортировка на большие расстояния экономически не выгодна; сухой же уголь растрескивается и превращается в летучий порошок, что обуславливает большие потери при транспортировке) [7, 9, 28, 37, 41, 62, 154, 162, 163, 191, 201].

2.42. ТОПЛИВА И ВЗРЫВЧАТЫЕ ВЕЩЕСТВА

Повседневный опыт подсказывает нам, что взрывчатые вещества (порох, тол, кордит и т. д.) при сгорании действуют намного сильнее, чем обычные топлива (дрова, уголь, природный газ, керосин, бензин и т. д.). Многие при этом предполагают, что сильное действие взрывчатых веществ обусловлено исключительно их большой удельной теплотой сгорания. Однако это неправильное предположение.

Удельная теплота сгорания многих взрывчатых веществ, напротив, поразительно мала по сравнению с теплотой сгорания промышленных видов горючего. Например, при сжигании 1 кг черного дымного пороха получается все-то около 3 МДж тепла. Между тем, теплота сгорания даже 1 кг дров (худшего из топлив по сравнению с углем, природным газом, нефтью, керосином, бензином и пр.) составляет свыше 13 МДж.

Впрочем, приведенное выше сравнение не совсем корректно. Дело в том, что взрывчатые вещества при сгорании потребляют свой собственный кислород, топлива же заимствуют его из окружающего воздуха. Поэтому для правильного сравнения необходимо подправить удельную теплоту сгорания дров, прибавляя к массе дров также и массу потребляемого кислорода. Эта добавочная масса раза в 3 больше, нежели масса самого топлива. Соответственно, удельная теплота сгорания дров после перерасчета уменьшится также в 3 раза и станет приблизительно равной 4,35 МДж/кг. Но и исправленное значение удельной теплоты сгорания дров все же превосходит теплоту сгорания пороха. Топить печи порохом было бы

невыгодно, так как он дает меньше тепла, нежели дрова и, тем более, уголь и газ.

Возникает вопрос: если взрывчатые вещества заключают в себе столь умеренное количество энергии, то чем же следует объяснить их страшное разрушительное действие? Ответ прост — это действие объясняется очень быстрым сгоранием, т.е. тем, что сравнительно небольшое количество энергии выделяется в ничтожно малый промежуток времени. Сгорая, взрывчатые вещества образуют сразу много газов, которые, оказавшись в сравнительно небольшом объеме, имеют громадные давления внутри. Например, в орудийном стволе пороховые газы оказывают на снаряд давление до 4 000 атм. Если бы порох горел медленно, то за время, пока снаряд скользит в канале орудия, успела бы сгореть лишь небольшая его доля, газов образовалось бы немного, напор их был бы невелик и скорость снаряда незначительна. На самом же деле порох сгорает в орудии почти мгновенно: менее чем в сотую долю секунды [95].

2.43. ПАРОВОЗЫ

Параллельно с разработкой паровых двигателей (см. ст. 2.36 на с. 171) и внедрением их в производство в качестве стационарных устройств разрабатывались и транспортные средства, использующие паровые машины. Первое упоминание об этом относится к 1769 г., когда **Жозеф Кюньо** (1725–1804) по заказу французского правительства соорудил машину с паровым двигателем для перевозки артиллерийских орудий. Правда, это был лишь прообраз паровоза, ездивший без рельс.

Первый настоящий паровоз на железнодорожном ходу был создан в 1803 г. англичанином **Ричардом Тревитиком** (1771–1833). Он представлял собой повозку на двух рельсах, приводимую в движение паровой машиной. Самое примечательное в том, что использовался придуманный изобретателем паровоз в качестве аттракциона: на радость публике он ездил по кругу словно огромная игрушка. Однако через год он построил другой паровоз для чугунной дороги одного из уэльских заводов. Проект оказался неудачным, так как машина была слишком

тяжелой для чугунной дороги, и разрушать заводские рельсы паровозу не позволили.

Куда успешнее оказался соотечественник Тревитика — **Джордж Стефенсон** (1781–1848), который создал несколько удачных паровозов и убедил владельцев одной из шахт в Британии построить для своего аппарата железную дорогу. Позже Стефенсон выиграл конкурс-аукцион и его паровоз «Ракета» стал главным локомотивом первой общественной железной дороги «Манчестер-Ливерпуль», которая открылась в 1830 г. Без вагонов локомотив «Ракета» мчался со скоростью 56 км/ч, но при прицепке основного состава замедлялся до 25 км/ч. К 1838 г. в Англии было построено 800 км железнодорожных путей, а спустя всего 10 лет — уже 8 000 км.

Кстати, именно английская «Ракета» стала прообразом первого русского паровоза, который в 1833 г. создали отец **Ефим Алексеевич** (1774–1842) и сын **Мирон Ефимович** (1803–1849) **Черепановы** на Урале. Но первая в нашей стране Царскосельская железная дорога, открытая в 1836 г., обслуживалась иностранными локомотивами. Паровозы отечественного производства в России появились в 1833–1835 гг., а в 1851 г. была закончена самая длинная по тем временам и почти идеально прямая железнодорожная магистраль, связавшая Петербург с Москвой.

Впоследствии паровозостроение получило мощный толчок и развивалось очень интенсивно. Самый мощный паровоз был построен в 1941 г. — это американский «Биг Бой» с мощностью около 8 000 л.с. Самым скоростным являлся английский паровоз «Маллард» — 202 км/ч. В СССР самым быстрым паровозом был локомотив серии 2-3-2, который на испытаниях в 1938 г. достиг скорости 178 км/ч.

В СССР же после Великой Отечественной войны конструктором **Л. Лебедянским** (1898–1968) был спроектирован и самый экономичный паровоз — это товарный локомотив серии ЛВ, имевший коэффициент полезного действия 9,27%. Этот рекордный для поршневых паровых двигателей коэффициент до сих пор не побит и вряд ли это уже случится, так как производство паровозов уже давно свернуто.

В середине XX в. на смену паровозам пришли тепловозы, а затем — электровозы, которые по мощности, скорости и экономичности сильно превосходят паровозы. Однако необходимо отметить, что паровоз до сих пор не превзойден по выносливости и неприхотливости. Паровоз способен выдерживать 400% перегрузок относительно расчетной мощности, а в качестве топлива можно использовать практически все, что горит, например, сырые осиновые дрова (которые в деревнях даже не считаются дровами). Говорят, что в России в годы Гражданской войны 1918–1920 гг. случалось, что в топку паровозов бросали и сухую воблу из-за недостатка угля. Ремонт паровоза стоит значительно дешевле, чем тепловоза или электровоза. И гораздо дешевле, чем электроэнергия и солярка, обходятся уголь и мазут. Именно эти качества паровозов во многом определили бесперебойность работы в СССР железных дорог во время Великой Отечественной войны [62, 67, 72, 110, 116].

2.44. ПАРОВАЯ ЛОДКА

Такие лодки-игрушки известны уже более 100 лет. Еще в 1891 г. этому изобретению была посвящена статья во французском журнале, а с 1900 г. такие лодки изготавливались и продавались во многих странах. Удивительно, что приводятся они в движение с помощью простого огня от свечи.

Сердцем лодочки является котел в виде плоской емкости-мембраны из меди, от которого к корме отходят две трубочки (рис. 2.16). Концы трубочек погружены в воду.

Перед запуском лодочки трубки и котел заполняют водой и, зажав пальцами отверстия трубочек, лодочку опускают на воду. Под котел ставится зажженная свеча. Под действием пламени вода в котле закипает и пар с силой выталкивает воду из трубочек — получилась реактивная тяга. Когда пар до-

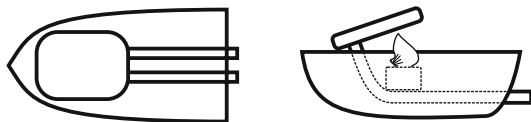


Рис. 2.16

стигает холодного (охлаждаемого водой) участка трубочек, он конденсируется и создается разрежение. Под действием перепада давления в трубочки поступает порция воды. Некоторая часть этой воды опять испаряется и пар начинает выдавливать воду. Циклы повторяются и лодочка толчками (от 5 до 10 импульсов в секунду) движется вперед, пока горит свеча. При нагревании и остывании из-за перепадов давления мембрана котла колеблется и производит громкие щелкающие звуки, которые придают подвижной игрушке еще большую привлекательность.

Может показаться, что втягиваемая обратно в трубочки вода должна вызывать движение лодочки назад. Однако скорость выбрасывания воды под действием пара больше скорости втягивания воды обратно, поэтому достаточно массивная лодка всегда будет двигаться вперед. Тем более, что лобовое сопротивление лодки меньше, чем при движении назад.

В домашних условиях аналог такой лодки достаточно легко сконструировать, если имеется металлическая трубка (лучше, конечно, медная — у нее хорошая теплопроводность). На карандаш или ручку намотайте несколько витков этой трубки в середине ее длины — это будет котел. В качестве корпуса для лодки можно взять обыкновенную пластиковую бутылочку емкостью 0,3 л и разрезать ее пополам вдоль высоты. Аккуратно согните концы трубки так, чтобы они после установки на лодку оказались под водой, и закрепите полученную систему на лодке. Лодка готова. Свечку лучше брать в алюминиевой оболочке (такие сейчас продаются повсеместно), тогда не нужно будет для нее готовить в лодке подставку [171].

2.45. «ПЬЮЩАЯ ПТИЧКА» — «ВЕЧНЫЙ» ДВИГАТЕЛЬ

Наверное, многие видели «Пьющую птичку» — самую популярную игрушку, действующую по законам физики (в России эту игрушку еще называют «птичкой Хоттабыча»). Она представляет собой стеклянную птичку, которая качается на оси и «пьет» из стаканчика с водой (рис. 2.17, а). Для того, чтобы птичка пришла в движение, ее головку нужно смочить



Рис. 2.17

водой. Птичка начинает медленно раскачиваться до тех пор, пока ее головка не опустится в воду. Тогда птичка выпрямляется, и теперь все повторяется без посторонней помощи. Так птичка может пить до бесконечности, пока при наклоне под ее клювом будет вода.

Принципиально игрушка состоит из двух полых стеклянных шариков, соединенных узкой трубочкой (рис. 2.17, б). Причем один из концов трубочки впаян в нижний шарик так, что заканчивается недалеко от дна шарика. При изготовлении игрушки система заполняется жидкостью и запечатывается. В качестве жидкости берется легко испаряющаяся жидкость с низкой температурой кипения, например, эфир, метанол или дихлорметан (фреон). Для большего эффекта жидкость подкрашивают. Наливают жидкости столько, чтобы конец трубочки в нижнем шарике был в нее погружен.

Нижний шарик — это «живот» птички, верхний — «головка». Сверху стекло разрисовывается и декорируется под птичку: перья, шляпка, хвостик (см. рис. 2.17, а). Обязательной частью птички является клюв достаточной длины, который часто обклеивают фетром. Игрушка закреплена чуть выше живота на вращающейся горизонтальной оси и опорах, в результате чего птичка может качаться, т. е. «клевать». Для приведения игрушки в действие перед ней ставят стакан с водой и один раз наклоняют ее, чтобы намочить клюв. А дальше все происходит без остановки...

Каковы же причины «самопроизвольных» наклонов? Изначально внутри игрушки между жидкостью и паром над ее поверхностью устанавливается термодинамическое равновесие, т. е. пар является насыщенным. Если обмакнуть клюв птички в поставленный перед ней сосуд с водой, то вода с намок-

шего фетрового клюва начинает испаряться, при этом верхний шарик будет охлаждаться. Снижение температуры ведет к понижению давления насыщенных паров, поэтому избыток пара конденсируется на внутренних стенках верхнего шарика (это так называемый «принцип холодной стены»; см. ст. 3.15 на с. 301). Таким образом, давление паров в верхнем шарике станет меньше, чем давление паров над жидкостью в нижнем шарике, и часть жидкости будет вытесняться в трубочку. Это приведет к поднятию центра тяжести над осью вращения и птичка наклоняется, снова макая клюв в воду. При этом нижний конец трубочки поднимается над поверхностью жидкости и жидкость из трубочки стекает вниз, а давление паров в верхнем и нижнем шарике выравниваются. Центр тяжести опускается, птичка возвращается в вертикальное положение, нижний конец трубки перекрывается жидкостью, нижний шарик нагревается от окружающего воздуха и в нем повышается давление насыщенных паров. Процесс повторяется заново, так как клюв птички уже мокрый...

Никакого противоречия со вторым началом термодинамики в этой игрушке нет — она работает на перепаде температуры за счет теплообмена с окружающей средой. Еще в 70-х годах XX в.

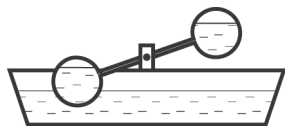


Рис. 2.18

американская корпорация «Рэнд» всерьез оценивала возможность использования машин такой конструкции для подачи воды в оросительные каналы в странах Ближнего Востока. Однако, видимо проект оказался экономически нецелесообразным и не был претворен в жизнь.

В домашних условиях можно изготовить и более простой вариант рассмотренного «вечного двигателя» (рис. 2.18). Его главной частью является так называемый **кипятильник Франклина**, придуманный американским политическим деятелем, дипломатом, ученым, журналистом **Б. Франклином** (1706–1790) — одним из авторов Конституции США. Кипятильник Франклина представляет собой систему из двух соединенных между собой емкостей, из которой откачан воздух. Система заполняется легкокипящей жидкостью (спирт, эфир).

Кипятильник Франклина необходимо закрепить над ванночкой с теплой водой на оси. Та емкость, в которой больше жидкости, перевешивает и, соприкасаясь с теплой водой, нагревается; при этом усиливается испарение жидкости и растет давление паров. Во второй же емкости, контактирующей с холодным воздухом, давление паров над жидкостью будет меньше. Это приводит к тому, что часть жидкости вытесняется в более холодную емкость и она перевешивает теплую. Затем процесс повторяется [8, 19, 71, 105, 140].

2.46. ЭНЕРГИЯ ВЕТРА

Использование силы ветра — один из самых древних способов производства энергии. Первые ветровые агрегаты применялись в Китае и Японии 2000 лет до н. э. В Древнем Вавилоне ветровые установки применялись для осушения болот. В I в. до н. э. появились ветроагрегаты в Египте и лишь через 12 столетий — в Европе, в основном для водоснабжения и размола зерна.

Практически вплоть до XIX в. ветровые (и водяные) турбины оставались основными источниками энергии. Например, в России в 1914 г. почти 50% урожая зерна было перемолото на более чем 250 тыс. (!) ветряных мельницах. Но вскоре машины, использующие энергию пара, вытеснили ветровые турбины.

Запасы ветровой энергии, по сути дела, безграничны. Общая мощность энергии ветра на земном шаре оценивается в $2,43 \cdot 10^{15}$ МВт. По оценке организации «Гринпис», за счет ветра в год можно получать около $2 \cdot 10^{21}$ Дж энергии — это в 8 раз превышает нынешнее мировое потребление электроэнергии или составляет почти 25% нынешней потребности человечества в энергии вообще. Дующие над территорией России ветры несут энергию, оцениваемую приблизительно в 10^{13} Вт, что равно мощности 1 800 таких энергетических гигантов, как Красноярская ГЭС!

Преимущества ветроэнергетики велики:

1) эта энергия возобновляема — в отличие от тепловых станций ветроэнергетика не использует богатства недр;

2) стоимость производства энергии на ветровых электростанциях ниже, чем на любых других, а добыча угля, нефти, газа связана с огромными затратами труда;

3) если тепловые станции загрязняют окружающую среду, а плотины ГЭС создают на реках искусственные моря, нарушая природное равновесие, то ветровые станции гармонично вписываются в природную среду.

Именно эти аргументы заставляют многие страны интенсивно развивать ветроэлектроэнергетику.

По данным на конец 2012 г., общая мощность ветроэлектрических установок в мире достигла 282 ГВт, что превышает суммарную мощность всех электростанций России и сопоставимо с мощностью всех атомных электростанций на планете. Первое место по использованию энергии ветра удерживает Европа (мощность европейских установок составляет 41% от мировой), на втором месте — Азия (в основном, Китай) (36%), третье место — Северная Америка (23%). Мировой рекорд по использованию энергии ветра до недавнего времени держала Германия: на конец 2002 г. там работало 13 759 ветроэнергетических установок общей мощностью более 12 000 МВт, что составляла более 10% всей потребляемой электроэнергии. Однако в последние годы вперед вырвалась Испания, где доля ветроэнергии в общем энергопотреблении превышает 20%. КПД ветроэлектрических установок достигает сейчас 50%.

Имеются у ветроэнергетики и недостатки. Ветер — стихия весьма капризная: его направление и скорость постоянно меняются, и чтобы ветроустановка постоянно «ловила» ветер и выдавала постоянную мощность, необходимо применять различные приспособления и технологии, удорожающие получаемую энергию. Не меньшей проблемой являются и слишком сильные порывистые ветра, способные сломать установку. С этой точки зрения особенно перспективны так называемые **тропопаузные ветростанции** — станции, размещенные на высоте 8–12 км (например, с помощью воздушных шаров или технологии воздушных змеев), где всегда дуют постоянные по скорости и направлению ветра, скорости которых в 3–7 раз выше, чем у земли, и составляют 80–100 м/с. Такие ветростанции решили бы и проблему нехватки площадей для их

постройки (это актуально для Европы). Но создание и установка тропопаузных станций еще связана с рядом технических трудностей [6, 37, 41, 62, 85, 102, 118, 122, 162, 166].

2.47. ОТОПЛЕНИЕ ПОМЕЩЕНИЙ ВЕТРОМ

Простейшая ветроэлектрическая станция (см. предыдущую статью) представляет собой воздушный винт (ветроколесо), на одной оси с которым расположен электрический генератор, вырабатывающий электрический ток. Однако если единственный результат, который требуется получить от ветроустановки, — это тепло для обогрева помещений, то можно вообще обойтись без электрических агрегатов. А именно, необходимо вал, передающий крутящий момент от лопастей ветроустановки, непосредственно соединить с **мешалкой Джоуля** — устройством, назначение которого — превращение механической энергии в тепловую.

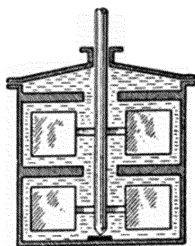


Рис. 2.19

Простейшая мешалка Джоуля представляет собой емкость, заполненную водой, внутри которой может вращаться ротор с лопатками (рис. 2.19). Устройство подобного рода было использовано английским физиком **Дж. П. Джоулем** (1818–1889) в опытах по доказательству эквивалентности теплоты и механической работы (см. ст. 2.4 на с. 102). Мешалку можно изготовить самостоятельно, например, из обычной 200-литровой бочки. Нагретую в ней воду по патрубкам можно направить в батареи отопления или использовать в других целях.

Если вам кажется, что это неэффективный способ получения тепла, проведите следующий опыт. Налейте в пластиковую бутылку наполовину воды и измерьте ее температуру (например, с помощью медицинского градусника). Затем в течение пары минут энергично встряхивайте бутылку. Вы обнаружите после этого, что температура воды в бутылке повысилась на несколько градусов.

Можно провести прикидочный расчет для мощности нашей ветряной теплостанции. Пусть радиус ветроколеса $R = 3$ м, а скорость ветра $v = 10$ м/с. Тогда мощность воздушного потока, проходящего через ветроколесо, равна

$$N_{\text{воз}} = \frac{\Delta E_{\text{кин}}}{\Delta \tau} = \frac{mv^2}{2\Delta \tau}.$$

Массу воздуха, проходящего через ветроколесо за время $\Delta \tau$, можно определить через его объем, считая плотность воздуха при нормальных условиях равной $\rho = 1,2$ кг/м³:

$$m = \rho V = \rho S v \Delta \tau = \rho \pi R^2 v \Delta \tau.$$

Тогда

$$N_{\text{воз}} = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 v^3.$$

Однако ветродвигатель использует только часть этой мощности (зависит от технического совершенства ветроколеса). Примем для **коэффициента ветроиспользования** ξ скромное значение 0,25. С другой стороны, мешалка Джоуля может превратить в тепло тоже только часть подведенной механической мощности (опять же, это зависит от совершенства технического исполнения мешалки). Примем КПД мешалки Джоуля равным $\eta = 0,2$. Тогда тепловая мощность нашей ветростанции

$$\begin{aligned} N &= \xi \eta N_{\text{воз}} = \frac{1}{2} \pi \xi \eta \rho R^2 v^3 = \\ &= \frac{1}{2} \cdot 3,14 \cdot 0,25 \cdot 0,2 \cdot 1,2 \cdot 3^2 \cdot 10^3 \approx 845 \text{ Вт.} \end{aligned}$$

Много это или мало? Если выразить полученный результат через калорию (см. ст. 2.26 на с. 156), то получим $N \approx \approx 200$ кал/с. Это означает, что за 1 с можно повысить температуру на 1 градус у 200 г воды (по емкости это 1 стакан). Если в системе отопления необходимо поддерживать температуру 70 °С, то с 20 °С до этой температуры можно за 1 с нагревать 4 г воды. Нетрудно подсчитать, что за 1 ч от 20 до

70 °С можно нагреть до 14 кг воды (полтора ведра). В дальнейшем эту температуру надо только поддерживать, т. е. возмещать расход тепла системой отопления, что потребует намного меньше энергии (теплоемкость воды несравненно больше теплоемкости воздуха).

Для расчета мы взяли очень скромные показатели коэффициента ветроиспользования ветроколеса и КПД мешалки Джоуля — их можно существенно повысить за счет технического совершенствования. В частности, вместо обычного (пропеллерного) ветроколеса можно использовать более перспективный роторный. Есть только один существенный недостаток такого отопителя — непостоянство скорости ветра [41, 44, 105].

2.48. ГОЛЬФСТРИМ И АЙСБЕРГ КАК ТЕПЛОВАЯ МАШИНА

Мировой океан — прекрасное и загадочное явление нашей планеты. В нем таится много неразгаданного, интересного и необычного. Одно из таких потрясающих явлений — теплое течение **Гольфстрим** (от англ. *gulf stream* — течение из залива) в Атлантическом океане, которое начинается возле Багамских островов, а завершает свой путь возле Европы; его общая длина превышает 10 000 км (рис. 2.20).

Гольфстрим — удивительное явление: во-первых, оно теплое, во-вторых, своими водами обогревает Восточную Европу и формирует там теплый климат. Именно благодаря Гольфстриму в Восточной Европе простирается не тундра (как должно было бы быть), а растут лиственные леса и даже пальмы. Например, в Норвегии из-за влияния Гольфстрима температура воздуха в январе выше того, что должно быть, на 15–20 °С, а в Мурманске — в среднем на 11 °С.

Существование Гольфстрима обусловлено тем, что горячие и холодные воды Атлантического океана образуют своеобразный конвейер: горячие экваториальные воды в виде океанского течения поднимаются в верхние широты, постепенно отдавая свое тепло атмосфере, а дойдя до конца пути, окончательно

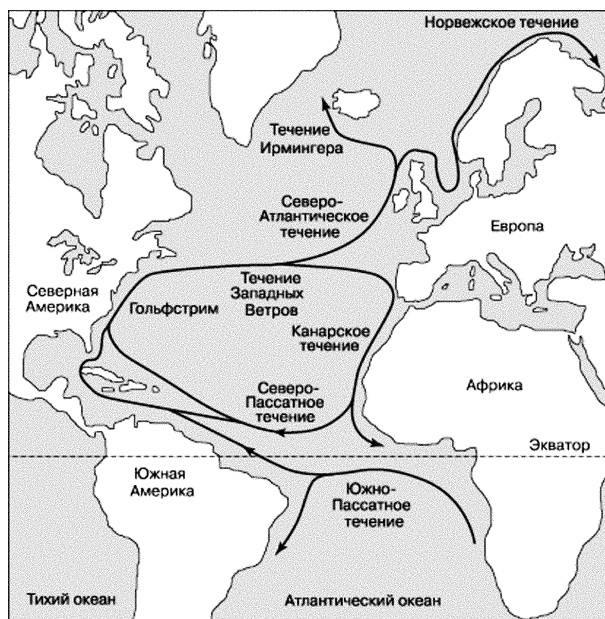


Рис. 2.20

охлаждаются. Мощность выделяемой Гольфстримом теплоты составляет примерно $1,4 \cdot 10^{15}$ Вт. Охладившись, соленая вода Гольфстрима становится тяжелее, чем более пресная вода Ледовитого океана, и опускается на глубину. Там Гольфстрим превращается в глубоководное холодное Лабрадорское течение, которое начинает свой обратный путь на юг, к экватору.

При своем течении Гольфстрим ежесекундно перемещает около $50\,000\,000\text{ м}^3$ воды, что в 20 раз больше, чем расход всех рек мира, вместе взятых. Скорость течения доходит до 10 км/ч, ширина — 110–120 км. Фактически это означает, что Гольфстрим обладает громадным запасом механической энергии. По расчетам специалистов, электротурбины, установленные на глубине от 30 до 130 м, позволят получать мощность до 25 тыс. МВт, что в 5 раз превышает мощность Красноярской ГЭС. Другое дело, что все это потребует огромных капиталовложений.

С помощью Гольфстрима в верхние широты Земли попадают **айсберги** (от нем. *айс* — лед, *берг* — гора). Айсберг представляет собой крупную глыбу пресного льда, отломившегося от ледника, спускающегося в море (обычные **плавучие льдины** и **паковые льды** образуются при замерзании поверхности моря). Основными источниками айсбергов служат фиордовые ледники Гренландии и шельфовые ледники Антарктиды. В зависимости от формы айсбергов их подводная часть в 7–9 раз больше надводной. Некоторые айсберги возвышаются над поверхностью воды более чем на 60 м. Оказавшись в воде, айсберг отправляется в плавание, постепенно теряя в массе за счет своего таяния. Направление дрейфа айсбергов зависит главным образом от океанических течений, поэтому айсберги часто движутся против ветра.

Самые крупные айсберги рождаются из льдов шельфового ледника моря Росса в Антарктиде. Самый большой айсберг был обнаружен в 50-х годах XX в.: он имел длину в 350 км и ширину в 40 км, т. е. был лишь в половину меньше Бельгии и в пять раз превышал площадь Люксембурга.

Айсберги являются настоящими хранилищами пресной воды. Даже относительно небольшая ледяная гора, например, толщиной 150 м, длиной 2 км и шириной 0,5 км, содержит в себе почти 150 млн т пресной воды, причем очень высокого качества. Этого количества воды хватило бы на целый месяц такому гигантскому городу, как Москва.

Другая заманчивая мысль, которая приходит в голову, это использование айсберга вкупе с теплым течением Гольфстрима в качестве тепловой машины. Для этого рассмотрим следующую задачу.

Пусть айсберг массой $m = 10^{10}$ кг дрейфует в Гольфстриме, температура воды которого $T_1 = 22^\circ\text{C} = 295\text{ К}$. Какую максимальную работу A может произвести тепловая машина, использующая Гольфстрим как нагреватель и айсберг как холодильник, за время, пока айсберг не растает?

Будем считать температуру айсберга равной $T_2 = 0^\circ\text{C} = 273\text{ К}$. Удельная теплота плавления льда равна $\lambda = 340\text{ кДж/кг}$. Следовательно, тающий айсберг сможет по-

глотить количество теплоты

$$\Delta Q_2 = m\lambda = 10^{10} \cdot 340 \cdot 10^3 = 3,4 \cdot 10^{15} \text{ Дж.}$$

Принцип Карно (см. формулу (2.4) на с. 120), определяющий максимальную работу A , которая может быть совершена тепловой машиной, с учетом $A = \Delta Q_1 - \Delta Q_2$ выразим через ΔQ_2 :

$$A = \Delta Q_2 \frac{T_1 - T_2}{T_2}.$$

Тогда

$$A = 3,4 \cdot 10^{15} \cdot \frac{295 - 273}{273} = 2,74 \cdot 10^{14} \text{ Дж.}$$

Такую работу производит современная электростанция мощностью 1 000 МВт примерно за три дня.

Однако рассмотренная задача в данном случае имеет чисто академический интерес. Необходимо иметь в виду, что нам нужна не просто работа — эту энергию необходимо довести до потребителей. В случае айсберга в океане это не представляется возможным. К тому же монтаж тепловой машины на айсберге и поддержание ее в рабочем состоянии при таянии льда в настоящее время являются совершенно нерентабельными [11, 41, 115, 142, 172, 191, 196].

2.49. «ВЕЧНЫЙ» СОЛЕННЫЙ ДВИГАТЕЛЬ

У поверхности тропических и экваториальных морей и океанов вода теплая, достигая температуры 28 °С. С глубиной же вода становится холоднее, достигая на глубине 2 км температуры 4 °С. К тому же и содержание растворенных солей с глубиной значительно уменьшается. А не позволяют ли такие условия соорудить нечто вроде «вечно действующего» теплового двигателя?

Это действительно возможно. Для этого надо опустить трубу до дна моря и первоначально насосом накачать в нее холодную и более пресную воду. После этого фонтан будет действовать и без насоса. Действительно, холодная малосоленая вода, поднимаясь по трубе со дна, согревается и становится

легче, чем соленая вода на поверхности. Это приводит к тому, что теперь для восстановления равновесия более легкой воде необходимо увеличить свою высоту относительно нижнего конца трубы, что приводит к фонтанированию воды у верхнего конца трубы. Так как необходимый столб воды (относительно нижнего конца трубы) при этом никогда не достигается (вода разбрызгивается), то и поток воды со дна не будет прекращаться. Остается только встроить в трубу электрогенератор подобно тому, как это делается в речных гидроэлектростанциях, только наоборот.

Если вы думаете, что такая гидроэлектростанция — это всего лишь чьи-то фантазии, то ошибаетесь. В 50-е годы XX в. подобная термогидроэлектростанция довольно большой мощности (1,4 МВт) была построена у Атлантического побережья Африки. Но станции подобного рода пока еще сложны и экономически себя не оправдывают. Но это еще «пока». В будущем все может быть иначе! [41, 140]

2.50. КАК ПОЯВИЛИСЬ ДВИГАТЕЛИ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ

После создания Уаттом паровой поршневой машины делалось много безуспешных попыток создать двигатель, в котором топливо сжигалось бы внутри рабочего объема машины — цилиндров (у паровых машин топливо сжигается вне цилиндров). Это должно было резко повысить КПД тепловой машины. Первая такая попытка принадлежит французу **Лебону** (1769–1804), который в 1801 г. запатентовал двигатель, работающий на светильном газе (светильный газ получается сильным нагреванием древесины без доступа воздуха). Но только в 1860 г. бельгийскому инженеру **Ж. Ленуару** (1822–1900) удалось создать работоспособный и используемый в промышленности двигатель внутреннего сгорания на светильном газе. Однако изготовленный Ленуаром двигатель все-таки напоминал паровую машину — он был с золотниковым распределителем (см. рис. 2.13). Вращался двигатель Ленуара с частотой порядка 100–150 оборотов в минуту, мощность его была около

0,5 кВт. Но КПД был всего 3%, т. е. меньше, чем у тогдашних паровых машин.

В 1867 г. немецкие инженеры **Н. Отто** (1832–1891) и **Э. Ланген** (1833–1895) создали более эффективный двигатель на газе, его КПД достигал 15% — цифры в то время неслыханной. Тот же Н. Отто в 1876 г. построил четырехтактный двигатель, явившийся родоначальником так называемого **двигателя с циклом Отто**, который теперь является наиболее распространенным двигателем внутреннего сгорания (рис. 2.21). Однако и этот двигатель работал только на газе, а применение двигателей внутреннего сгорания на транспорте могло быть реальным только при жидком топливе, которое можно компактно хранить в баках. Именно эту проблему решил созданный в 1885 г. немецкими инженерами **Г. Даймлером** (1834–1900) и **В. Майбахом** (1846–1929) двигатель, работавший на бензине — бензин легко испарялся в воздухе и образовывал горючие смеси. Для образования горючей смеси использовалось специальное устройство — карбюратор, а для поджига смеси — электрическая искра. После этого бензиновые двигатели начали завоевывать мир.

Двигатели с циклом Отто работают следующим образом (см. рис. 2.21). В момент, когда поршень П находится в верхней мертвой точке (ВМТ) (состояние 0 на pV -диаграмме), открывается впускной клапан ВпК (выпускной клапан ВыпК закрыт). За счет запасенной кинетической энергии маховика М поршень П движется вниз (процесс 0-1) и в цилиндре Ц создается разрежение, в результате чего давление в нем оказывается ниже атмосферного $p_{\text{атм}}$. За счет перепада давления через впускной клапан ВпК в цилиндр Ц начинает поступать горючая смесь из бензина и воздуха, вырабатываемая карбюратором (на рисунке не показан; см. следующую статью). В момент, когда поршень П достигает нижней мертвой точки (НМТ) (состояние 1), впускной клапан ВпК закрывается и поршень П начинает движение вверх, сжимая горючую смесь (процесс 1-2). Так как происходит это достаточно быстро, то, пренебрегая незначительным теплообменом, процесс сжатия 1-2 можно считать адиабатическим. В момент, когда поршень П достигает ВМТ (состояние 2), на свечу зажига-

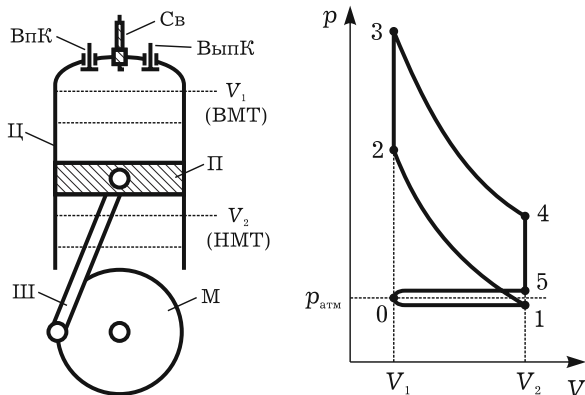


Рис. 2.21

ния $Cв$ подается напряжение и в ней проскакивает искра, поджигающая смесь, — происходит очень быстрое сгорание смеси, при котором ее объем практически не меняется, поэтому процесс 2-3 можно считать изохорическим. В результате сгорания смеси резко повышается температура и, соответственно, давление продуктов сгорания (состояние 3). Под действием высокого давления поршень $П$ начинает движение вниз (процесс 3-4), который тоже происходит без значительного теплообмена и в силу этого является практически адиабатическим. В НМТ (состояние 4) открывается выпускной клапан $ВыпК$ и давление практически мгновенно понижается до атмосферного (процесс 4-5) — происходит выхлоп отработавших газов. При дальнейшем движении поршня $П$ вверх он выталкивает остатки продуктов сгорания, при этом давление в цилиндре $Ц$ чуть выше атмосферного (процесс 5-0). В ВМТ выпускной клапан $ВыпК$ закрывается, открывается впускной $ВпК$ и начинается новый цикл.

Рассмотренный двигатель называется четырехтактным, так как за полный цикл Отто поршень $П$ четырежды движется от ВМТ к НМТ и обратно. Полезная работа совершается только в одном такте (процесс 3-4), в остальных тактах движение поршня $П$ обеспечивается за счет запаса кинетической энергии маховика $М$ — массивного диска, соединенного с помо-

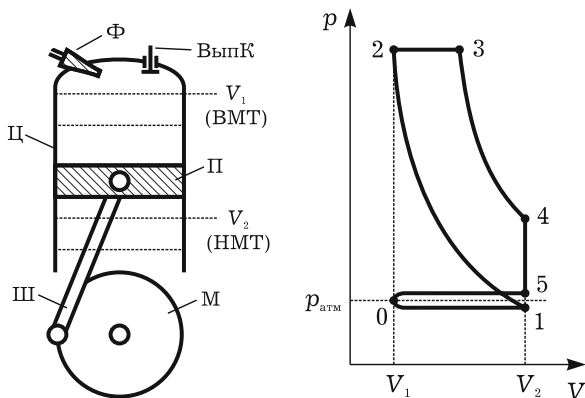


Рис. 2.22

щью шатуна Ш с поршнем П. С помощью этой же системы (поршень — шатун — вал маховика) от двигателя отбирается полезная мощность.

Однако бензиновые карбюраторные двигатели имели все-таки небольшой КПД, который принципиально нельзя было повысить. Дело в том, что когда начинали повышать степень сжатия, т. е. все больше и больше сжимать горючую смесь в цилиндрах для повышения КПД, смесь паров бензина с воздухом не выдерживала нагревания и возгоралась (без электрической искры) совсем не тогда, когда ей было положено. Этого недостатка был лишен двигатель, созданный в 1892 г. немецким инженером **Р. Дизелем** (1858–1913). Новизна этого двигателя заключалась в том, что в цилиндре при помощи поршня сжимался чистый воздух, причем до давлений, в несколько раз превышающих давление сжатия в бензиновых двигателях (рис. 2.22). При этом температура воздуха в цилиндре повышалась до $500\text{--}700^\circ\text{C}$ и впрыснутое через форсунку Ф под большим давлением топливо тотчас же загоралось. Дизельное топливо горит значительно медленнее, поэтому процесс 2-3 можно считать практически изобарическим (в карбюраторных двигателях процесс 2-3 изохорический). Кроме высокого КПД, **двигатели с циклом Дизеля** были выгодны еще и тем, что в качестве топлива можно было использовать низкосортные

нефтепродукты, которые намного дешевле. В настоящее время дизельные двигатели нашли широкое применение в первую очередь там, где нужны большие мощности при малых экономических издержках эксплуатации.

Напоследок необходимо отметить, что первый бензиновый двигатель был на самом деле все-таки построен русским человеком, но его постигла печальная участь. В 1884 г. русский инженер сербского происхождения **И. С. Костович** (1851–1916) для созданного им же дирижабля разработал бензиновый двигатель мощностью около 50 л.с. (сравните с мощностью в 0,5 л.с. двигателя Даймлера и Майбаха). Однако дирижабль сгорел, а новый двигатель так и остался неиспользованным, и вскоре о нем уже никто не вспоминал. Увы... [7, 43, 47, 110, 126, 191]

2.51. КАК РАБОТАЕТ КАРБЮРАТОР

В самых первых бензиновых двигателях, работавших по циклу Отто, для создания горючей смеси бензин испаряли с помощью специальных испарителей. Так как для испарения бензина его надо было подогревать (а заодно и смешиваемый с ним воздух), то двигатели получались сложными, дорогими и капризными. Поэтому настоящую революцию в двигателестроении произвело изобретение в 1893 г. **карбюратора** венгерским инженером **Д. Банки** (1859–1922) (хотя независимо от него и даже несколько раньше ту же конструкцию карбюратора разработал немецкий инженер В. Майбах; о нем см. предыдущую статью).

Схема Банки стала прообразом всех современных карбюраторов.

В отличие от своих предшественников Банки предлагал не испарять бензин, а мелко распылять его в воздухе. Это обеспечивало его равномерное распределение по цилиндру, а само испарение происходило уже в цилиндре под действием тепла сжатия. Распыление бензина происходило в потоке воздуха из-за пониженного в нем давления (этот принцип с точностью до наоборот работает в самодельном насосе; см. ст. 1.39 на с. 80).

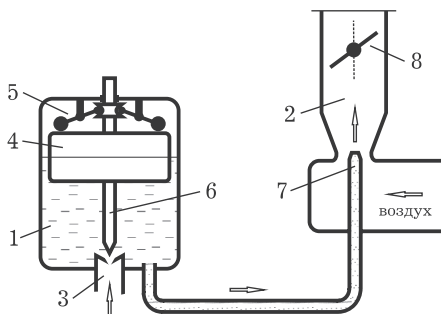


Рис. 2.23

Схематически устройство карбюратора показано на рис. 2.23. Он состоит из двух основных частей: поплавковой камеры 1 и смесительной камеры 2. В камеру 1 бензин поступает из бензобака по трубке 3 и держится на постоянном уровне с помощью поплавка 4. Если уровень бензина поднимается выше, то поплавок упирается на рычаг 5 и спускает иглу 6, тем самым закрывая доступ бензину. Из поплавковой камеры 1 бензин свободно перетекает в смесительную камеру 2 и его уровень в жиклере 7 одинаков с уровнем в камере 1. Смесительная камера 2 с одной стороны сообщается с атмосферным воздухом, а с другой — с впускным клапаном в цилиндр двигателя. Количество доставляемой в цилиндр смеси регулируется поворотом дроссельной заслонки 8 (она связана с педалью газа автомобиля). При всасывающем ходе поршня двигателя воздух устремляется в смесительную камеру 2, засасывая из жиклера 7 бензин, распыляя и испаряя его, и получившаяся горючая смесь попадает в цилиндр.

Современные карбюраторы устроены немного сложнее, но основной принцип работы подобен рассмотренному [110].

2.52. МОЩНОСТЬ ДВИГАТЕЛЯ И ЛОШАДИНАЯ СИЛА

Для оценки мощности двигателей мы практически всегда используем внесистемную единицу «лошадиная сила» (л.с.) и привыкли к ней, хотя стандартная единица мощности —

ватт (Вт). Поэтому мало кто отдает себе отчет в том, что применение слова «сила» в названии единицы совершенно неправильно. Лошадиная сила — это не сила, а мощность, и притом даже не лошадиная. Мощность в 1 л.с. — это мощность двигателя, совершающего ежесекундно 735 Дж работы. Такая мощность эквивалентна поднятия 1 кг груза на высоту 75 м (или 75 кг на высоту 1 м) в течение 1 с. Как видно, такая информация ничего не говорит о силе, развиваемой двигателем.

Может ли реальная лошадь совершать в каждую секунду 735 Дж работы (т.е. развивать мощность в 735 Вт)? В действительности на короткое время она способна развить и бо́льшую мощность. Например, перепрыгивая через препятствие, лошадь в течение 1–2 с поднимает груз своего веса (около 300–400 кг) на высоту метра. Но работать так в течение длительного времени (как работает двигатель) живая лошадь не может. Поэтому средняя мощность лошади далеко не достигает даже и 1 л.с. Откуда же в таком случае взялось название «лошадиная сила», если нет соответствия с мощностью лошади?

Название это родилось случайно и вот при каких обстоятельствах. После изобретения **Д. Уаттом** (1736–1819) паровой машины (см. ст. 2.36 на с. 171) один английский пивовар пожелал поставить у себя машину Уатта для приведения в действие водяного насоса. До этого водяной насос работал на конной тяге, и пивовар поставил Уатту условие: паровая машина должна быть не менее производительной, чем лошадь. Чтобы в случае чего аргументированно предъявить Уатту претензии, пивовар приказал своим работникам выбрать для водяного насоса самую сильную лошадь и стегать ее не жалея. При таких ненормальных условиях лошадь через некоторое время упала замертво, но успела накачать столько воды, что было эквивалентно поднятию в каждую секунду груза 70 кг на высоту 1 м.

Уатт был уверен в своих паровых машинах. Поэтому, узнав о погибшей лошади и объеме накачанной ею воды, он поднял мощность поставляемой пивовару паровой машины до значения, эквивалентного поднятию в каждую секунду груза 75 кг

на 1 м. С тех пор и установился обычай оценивать мощность в «лошадиных силах», хотя мощность живой лошади едва достигает $2/3$ этой величины [72, 97, 98, 155].

2.53. ТОПЛИВО ДЛЯ ДВИГАТЕЛЕЙ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ

Для работы двигателей внутреннего сгорания используют различные типы топлива, наиболее традиционными из которых являются бензин, дизельное топливо и керосин. Необходимо отметить, что все они были синтезированы задолго до появления автомобилей.

Еще в 1745 г. на Ухтинском нефтяном промысле в России проводились технологические манипуляции с нефтью с целью получения более чистого топлива и именно там был построен первый завод по очистке нефти. Перегонка нефти производилась очень просто: в печь ставили закрытый котел, наполненный нефтью. Из котла выходила труба, которая проходила через теплообменник (бочку с водой) и заканчивалась в пустой бочке, где накапливались продукты перегонки (это всем известная конструкция самогонного аппарата). Очищенную таким образом нефть использовали преимущественно в бытовых целях: в то время многие помещения освещались лампадами, в которые наливалась смесь очищенной нефти с растительным маслом.

А вот бензин официально первым получил в 1825 г. английский физик-испытатель **Майкл Фарадей** (1791–1867). Из всех соединений углерода и водорода он выделил одно, способное быстро загораться. А так как он синтезировал его из нефти, добытой где-то в Малой Азии, то и назвал его арабским словом «бензин», что в переводе означает «благовонное вещество».

В качестве горючего бензин стал широко использоваться только к концу XIX в. после усовершенствования немецким инженером **Г. Даймлером** (1834–1900) карбюраторного двигателя внутреннего сгорания, после которого они стали основной движущей силой на автомобилях (см. ст. 2.50 на с. 196). Как раз после этого и начались проблемы с бензином.

К примеру, есть письменные свидетельства автомобилистов, путешествовавших по Германии в 1905 г. Автотуристы в одном из городов никак не могли найти место для заправки и они обратились за советом к местным жителям. Те предложили поискать бензин в городской аптеке (бензин продавался в аптеках как чистящее средство). Однако там выяснилось, что запас этого «снадобья» иссяк, и аптекарь посоветовал обратиться к врачу. И, о счастье, дома у врача нашлись несколько бочек нужного «лекарства»!

В 1891 г. русский инженер **В. Г. Шухов** (1853–1939) со своим помощником **С. П. Гавриловым** изобрел способ разложения нефти на более легкие углеводородные соединения — **крекинг** (от англ. *cracking* — расщепление), и запатентовал свое открытие (патент Российской империи № 12 926 от 27.11.1891 г.). В 1915–1918 гг. научные и инженерные решения В. Г. Шухова и С. П. Гаврилова были повторены американским инженером **У. М. Бартоном** при сооружении в США первой промышленной установки по переработке нефти, после чего возник патентный спор. Однако Международный патентный суд в Гааге в 1923 г. признал В. Г. Шухова и С. П. Гаврилова единственными изобретателями термического крекинга-процесса. (Кстати, В. Г. Шухов был не только хорошим химиком, но и блестящим архитектором. Именно по его проекту в 1920–1922 гг. в Москве была построена знаменитая **Шуховская радиобашня** — новаторская для своего времени гиперболоидная конструкция, выполненная в виде несущей стальной сетчатой оболочки.)

Крекинг позволил значительно увеличить производство бензина из нефти, а также появилась возможность приобрести его более-менее централизованно на специализированных складах, но — в ведрах или бутылках. Из-за этого процесс заправки был крайне трудоемким и длительным, и на заправку автомобиля запросто можно было потратить часа полтора. Проблема решилась с появлением бензоколонок. История автозаправочных станций (АЗС) как специализированных магазинов началась в 1907 г., когда в Сиэтле (США) компанией *Standard Oil of California* (сейчас *Chevron Texaco*) была открыта первая станция. В двадцатых годах XX в. появились

первые механические бензоколонки, а в тридцатых — электрические. Своеобразна история магазинов при АЗС: в нашей стране они рассматривались (и рассматриваются до сих пор) как приложения к заправочному бизнесу, а на Западе ситуация развивалась с точностью до наоборот — АЗС начинались при магазинах.

Но не бензином единым жило человечество в начале XX в. Альтернативой и конкурентом бензину было **дизельное топливо** — в современном обиходе «солярка», «дизель».

Понятие «дизельное топливо» произошло от названия двигателя, созданного в 1892 г. немецким инженером **Р. Дизелем** (1858–1913) (см. ст. 2.50 на с. 196). Изначально двигатель Дизеля по сути своей не имел никакого отношения к дизельному топливу — по замыслу изобретателя он должен был работать на дешевой угольной пыли. Однако эксперименты показали невозможность использования ее в качестве горючего по причине проблемной подачи в цилиндры. Тогда было решено попробовать вместо нее тяжелые фракции нефти типа керосина и мазута, и первый работоспособный двигатель Дизеля заработал на керосине.

Дизельное топливо же двигатель стал потреблять с подачи российского «нефтяного короля» **Э. Нобеля** (1859–1932) — племянника **А. Нобеля** (1833–1896), основателя знаменитой и престижной научной премии. Э. Нобель потратил большие деньги на покупку лицензии у Дизеля, чтобы организовать производство моторов на своем машиностроительном заводе в Петербурге. Правда, его не устраивало, что двигатель работал на керосине, и он заставил своих конструкторов переработать его. После этого тот стал работать на сырой нефти, а позже — на настоящем дизельном топливе — солярке.

До конца своей жизни все попытки Дизеля оснастить автомобили двигателем своего производства были тщетны — они по всем параметрам проигрывали карбюраторным бензиновым двигателям. После смерти инженера (1913 г.) только в 1922 г. с появлением топливных насосов высокого давления стало возможным создание высокооборотистых дизельных двигателей. И в 1923 г. был выпущен первый в мире дизельный грузовик *Benz 5K3*, а в 1936 г. — первый легковой автомобиль с

дизельным двигателем *Mercedes-Benz 260D*. Главным достоинством дизельных машин стала их экономичность.

Сейчас может показаться, что бензин и дизельное топливо всегда были неизменными попутчиками автомобильных двигателей. Но это далеко не так. В начале XX в. бензин долгое время соревновался со спиртом и растительным маслом в борьбе за любовь автолюбителей. Еще немецкий инженер **Н. Отто** (1832–1891) — автор первого в мире четырехтактного двигателя внутреннего сгорания (см. ст. 2.50 на с. 196) — заправлял свое детище спиртом (этанолом). Да и Р. Дизель поначалу экспериментировал с арахисовым маслом в качестве топлива. Главный аргумент в пользу биотоплива последовал в 1908 г. от американского промышленника **Г. Форда** (1863–1947), который выпустил в продажу свою знаменитую машину *Model T*, которая могла работать на бензине, этаноле или их смеси.

Во время Первой мировой войны автомобили большинства стран мира использовали этанол в качестве топлива и после войны позиции этанола были сильны как никогда. Казалось, что вот-вот бензин исчезнет навсегда из обихода автолюбителей. Но Вторая мировая война спутала все карты — произошло резкое снижение цен на нефть и бензин, которые вытеснили спирт из баков.

До 1973 г. в мире мало кто задумывался о стоимости бензина. Все вернулось на круги своя после масштабного топливного кризиса, возникшего в 1973 г. Тогда арабские государства-экспортеры ввели эмбарго на поставку нефти в США, Японию и Западную Европу, из-за чего цены на бензин выросли в пять раз. Возник новый всплеск интереса к этанолу, а в последние годы эта идея стала актуальной как никогда. В мире четко прослеживается тенденция перехода на горючее биологического типа, наиболее перспективными из которых являются этанол и биодизель, получаемые из сахарного тростника и кукурузы.

Передовой страной в производстве **биотоплива** является Бразилия — там с 1975 г. функционирует целая отрасль по выращиванию сахарного тростника. В течение последних 10 лет почти 90% выпускаемых бразильских автомобилей могут ра-

ботать и на спирте, и на бензине, можно также смешивать эти виды в любой пропорции — электроника, управляющая двигателем, самостоятельно распознает состав горючего, адаптируя под него двигатель.

Есть и другие менее популярные, но от этого не менее эффективные альтернативы, например, превращение угля в жидкое топливо для автотранспорта (см. ст. 2.41 на с. 178). Эту технологию немцы изобрели еще перед Второй мировой войной.

Другой альтернативой традиционным топливам является набирающий популярность **природный газ**. Следует отметить, что первые двигатели внутреннего сгорания изначально создавались как раз для работы на газе (светильном) (см. ст. 2.50 на с. 196). Однако после того, как двигатели обосновались в автомобилях, предпочтение было отдано бензину. О газе вспомнили лишь в 30-е годы XX в. Сначала это были газогенераторные двигатели на светильном газе. Топливом для них выступали древесные чурки — их сжигали в специальных газогенераторах при ограниченном доступе воздуха, в результате чего образовывалось большое количество недоокисленных продуктов, которые с успехом могли гореть в цилиндрах двигателя. Газогенераторные установки были довольно громоздкими и тяжелыми, их розжиг занимал 10–14 мин, расход древесных чурок равнялся около 53 кг на 100 км пути, а запас хода — всего 60–70 км. Поэтому немедленно развернулись работы над газобаллонными автомобилями, и первым в этом деле выступил Советский Союз. В конце 30-х годов с конвейеров советских автозаводов начали сходить газобаллонные грузовики ЗИС-30 и ГАЗ-44, в двигателях которых применялся газ, вырабатываемый не газогенераторами, а подаваемый из баллонов. А в западных странах об использовании газа всерьез задумались после нефтяного кризиса середины 70-х годов. Сейчас природный газ уверенно завоевывает себе место в ряду топлив для автомобилей.

Из экстраординарных способов получения топлива можно отметить старания японцев — разработчики из японской компании *Genepax* изобрели автомобиль, который можно заправлять водой. Правда, технологию они держат в секрете.

Этот обзор неполон — сегодня уже существуют сотни разновидностей топлива для автомобилей. Правда стоит заметить, что большинство из них используются единично и относятся больше к эксклюзивам, и вряд ли когда-либо станут массовыми [102, 191, 201].

2.54. ОКТАНОВОЕ ЧИСЛО БЕНЗИНА

В начале XX в. конструкторы двигателей внутреннего сгорания столкнулись с проблемой **детонации бензина** в цилиндре, суть которой состояла в следующем. Чтобы повысить мощность двигателя, стали увеличивать степень сжатия горючей смеси. Эффект оказался неожиданно обратным: бензин сгорал настолько быстро (взрывообразно), что поршень за это время почти не успевал переместиться и поэтому оказывался под огромной нагрузкой, что вело к падению мощности и разрушению деталей двигателя (на слух детонация воспринимается как металлический стук в двигателе). К тому же бензиновая смесь возгоралась совсем не тогда, когда это было нужно, а раньше (причем без помощи электрической искры). Это обусловило потребность в количественной характеристике различных бензинов противостоять детонации. Такой характеристикой стало **октановое число**.

Октановое число определяется сравнением исследуемого бензина с эталонными топливами. В качестве эталонов служат два углеводородных топлива: **гептан** и **изооктан**. Гептан очень легко воспламеняется, поэтому его детонационная стойкость принята за нуль. Изооктан, наоборот, обладает высокой детонационной стойкостью, которая условно принята за 100 пунктов шкалы октанового числа. Таким образом, например, бензин АИ-95 с октановым числом 95 по своей способности противодействовать детонации соответствует смеси 95% изооктана и 5% гептана.

Фактически от октанового числа зависит скорость сгорания бензина — при более высоких октановых числах происходит более длительное (т. е. плавное) сгорание бензина. При этом, соответственно, продукты сгорания бензиновой смеси

не оказывают ударной нагрузки (детонации) на поршни двигателя — двигатель работает более равномерно, плавно и четко. Поэтому в современной автомобильной промышленности имеется тенденция к выпуску двигателей, рассчитанных для работы на высокооктановом бензине.

На нефтеперерабатывающих заводах используют два метода определения октанового числа бензина: **моторный** и **исследовательский**. Моторный метод имитирует движение автомобиля по шоссе при работе двигателя на максимальной мощности, причем для испытаний используется реальный двигатель. При исследовательском методе используется специальный испытательный одноцилиндровый двигатель, причем условия для его работы создаются более мягкие, соответствующие городской езде на малых и средних оборотах двигателя. Естественно, что октановое число, определенное исследовательским методом, для одного и того же бензина оказывается бóльшим, чем определенное моторным методом. До недавнего времени на бензоколонках указывалось октановое число, полученное исследовательским методом. Об этом говорила сама маркировка бензинов: АИ-92, АИ-95, АИ-98 и т. д., где буква «И» как раз и означает определение октанового числа исследовательским методом. В наши дни буква «И» в обозначении марок бензина исчезает, но, тем не менее, надо иметь в виду, что, скорее всего, это те же октановые числа, которые определены исследовательским методом (так выгоднее продавать бензин).

Таблица 2.5

Соответствие между октановыми числами бензинов, определенными разными методами

Исследовательский метод	Моторный метод
А-80	А-76
АИ-91	А-82,4
АИ-92	А-83
АИ-95	А-85
АИ-93	А-87
АИ-98	А-89

Соответствие между октановыми числами (марками бензинов), определенными исследовательским и моторными методами, указано в табл. 2.5.

Из вышесказанного, кстати, следует, что при дальних поездках целесообразно в бак заливать бензин с более высоким октановым числом (например, АИ-98), а для городской езды — достаточно бензина и с меньшим октановым числом (например, АИ-95 или даже АИ-92), т.к. детонация начинает проявляться в первую очередь при высоких нагрузках на двигатель, когда увеличивается подача бензиновой смеси [62, 142, 191, 202].

2.55. РЕАКТИВНЫЕ ДВИГАТЕЛИ

Реактивный двигатель — это тепловая машина, создающая необходимую для движения силу тяги посредством преобразования внутренней энергии топлива в кинетическую энергию реактивной струи. Любой реактивный двигатель должен иметь, по крайней мере, две составные части:

- **камеру сгорания** — в ней происходит сгорание топлива;
- **реактивное сопло** — в нем тепловая энергия продуктов сгорания топлива переходит в их кинетическую энергию.

Продукты сгорания с большой скоростью истекают из двигателя и, в соответствии с законом сохранения импульса, образуются реактивная сила, толкающая двигатель в противоположном направлении. Таким образом, реактивный двигатель создает тягу только за счет взаимодействия с продуктами сгорания топлива, без опоры или контакта с другими телами (как в других двигателях). По этой причине чаще всего он используется для приведения в движение самолетов, ракет и космических аппаратов.

Вообще говоря, все реактивные двигатели можно разделить на два основных класса:

- **воздушно-реактивные (ВРД)** — тепловые машины, в которых для горения топлива используется кислород из атмосферного воздуха и, соответственно, они могут работать только в земной атмосфере. Основными типами двигателей это-

го класса являются **прямоточные** (ПВРД), **пульсирующие** (ПуВРД) и **турбореактивные** (ТРД);

— **ракетные** (РД) — машины, которые содержат в себе все необходимые для своей работы компоненты и способные работать в любой среде, в том числе и в безвоздушном пространстве (космосе). РД делятся на широко распространенные **химические** и на более экзотичные (существующие только в виде проектов или единичных прототипов) **ядерные** и **электрические**. В свою очередь, химические РД делятся на **жидкостные** (ЖРД) и **твердотопливные** (ТТРД).

Оба указанных класса реактивных двигателей (и ВРД, и РД) в настоящее время нашли широкое применение, созданы различные их конструкции.

Принцип реактивного движения известен человечеству очень давно. В сущности, родоначальником реактивного двигателя можно считать эолипил Герона Александрийского (см. ст. 2.36 на с.171). Твердотопливные ракетные двигатели (ТТРД) в виде пороховых ракет появились в Китае в X в. н. э. На протяжении сотен лет такие ракеты применялись сначала на Востоке, а затем в Европе как фейерверочные, сигнальные и боевые. Первые проекты самолетов с ВРД (точнее, с ПуВРД) были созданы в 60-е годы XIX в. **П. Маффиотти** (Испания), **Ш. де Луврье** (Франция) и **Н.А. Телешовым** (Россия). В 1903 г. русский исследователь **К.Э. Циолковский** (1857–1935) впервые в мире выдвинул основные положения теории жидкостных ракетных двигателей (ЖРД), а в 1909 г. русским инженером **Н. Герасимовым** была предложена первая схема турбореактивного двигателя (ТРД). В 1913 г. француз **Р. Лорен** получил патент на прямоточный воздушно-реактивный двигатель (ПВРД).

Мы более подробно рассмотрим воздушно-реактивные двигатели (ВРД), так как по своей природе все они являются чисто тепловыми, использующими химическую энергию углеводородных топлив (в частности, **авиационного керосина**), а кислород для горения забирают с атмосферы.

Полезная работа в ВРД (т.е. формирование реактивной струи) осуществляется в сопле двигателя за счет адиабатического расширения рабочего тела (воздуха с продуктами

сгорания топлива). В результате такого расширения давление продуктов сгорания выравнивается с атмосферным. Это означает, что давление продуктов сгорания топлива перед адиабатическим расширением должно превышать атмосферное, и чем больше, тем лучше для КПД двигателя. Это можно сделать, в первую очередь, за счет использования более качественного топлива, но по экономическим соображениям такие ВРД не приемлемы для повсеместного использования. Кроме того, температуру сгорания топлива нельзя увеличивать безгранично — имеет естественный барьер в виде ограниченной жаростойкости материалов двигателя. Поэтому распространение получил второй вариант повышения давления рабочего тела — это предварительное нагнетание атмосферного воздуха в камеру сгорания. Основные типы ВРД — прямоточный (ПВРД), пульсирующий (ПуВРД) и турбореактивный (ТРД) — различаются, в первую очередь, способом, которым достигается необходимое повышение давления рабочего тела.

Самыми простыми по устройству являются **прямоточные воздушно-реактивные двигатели** (ПВРД) (рис. 2.24). Необходимое для работы двигателя повышение давления достигается за счет торможения встречного потока воздуха в двигателе. При сжигании топлива в камере сгорания его температура значительно повышается, и из сопла двигателя он вместе с продуктами сгорания топлива истекает со скоростью большей, чем скорость встречного потока, что и создает реактивную тягу. По сравнению с другими типами ВРД эти двигатели на дозвуковых скоростях имеют низкий КПД из-за маленького повышения давления при торможении воздуха. Поэтому основное применение ПВРД нашли в сверхзвуковых летательных аппаратах: на скоростях 3–5 Маха* ПВРД превосходят по эффективности ВРД всех других типов. Однако при скоростях свыше 5 Махов температура тормозящегося воздуха начинает превышать 1 500 °С, что становится естественным ограничите-

* 1 Мах численно равен скорости звука в воздухе при данных условиях. При нормальных условиях 1 Мах равен 320 м/с или 1 152 км/ч. Название происходит по имени австрийского ученого-философа **Э. Маха** (1838–1916), внесшего значительный вклад в гидро- и аэродинамику, но, тем не менее, отрицавшего существование атомов (см. ст. 2.19 на с. 136).

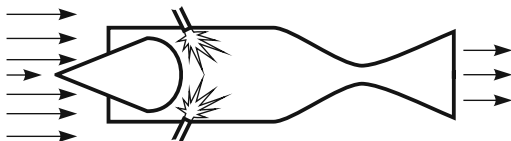


Рис. 2.24

лем для применения ПВРД, так как последующее нагревание воздуха в камере сгорания приводит к температурам, при которых двигатель начинает разрушаться.

Термодинамика процессов в ПВРД описывается **циклом Брайтона** (рис. 2.25, а) по имени американского инженера **Дж. Брайтона** (1830–1892), придумавшего поршневой двигатель внутреннего сгорания, работавший по этому циклу. (Иногда этот цикл называют также **циклом Джоуля** — в честь английского физика Дж. Джоуля (1818–1889), измерившего механический эквивалент тепла (см. ст. 2.4 на с. 102).) В этом цикле процесс 0-1 соответствует адиабатическому сжатию воздуха при его торможении в двигателе, а процесс 1-2 — его изобарическому нагреву с соответствующим увеличением объема при сгорании топлива в камере сгорания. Далее в сопле происходит дальнейшее адиабатическое расширение рабочего тела (процесс 2-3) — таким образом образуется мощная реактивная струя. Выброшенные из двигателя продукты сго-

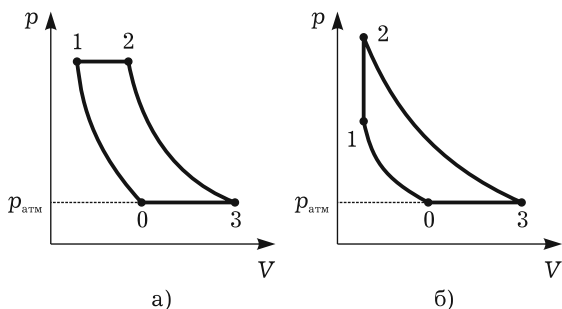


Рис. 2.25

рания при атмосферном давлении остывают, достигая температуры окружающей среды (процесс 3-0).

Пульсирующий воздушно-реактивный двигатель (ПуВРД), как следует из его названия, работает в режиме пульсаций, т. е. тяга развивается не непрерывно, как у ПВРД, а в виде серии импульсов, следующих друг за другом с частотой от десятков герц (для крупных двигателей) до 250 Гц (для малых двигателей)*. Конструктивно ПуВРД представляет собой цилиндрическую камеру сгорания с длинным (это обязательно!) соплом меньшего диаметра (рис. 2.26). Передняя часть камеры сгорания сообщается с атмосферой с помощью клапанов, но, в принципе, ПуВРД способен работать и без них (но при этом снижается КПД двигателя).

Принцип действия ПуВРД состоит в следующем. Когда воздушные клапаны открыты, воздух поступает в камеру сгорания и форсунка впрыскивает топливо — в результате в камере образуется горючая смесь. Смесь воспламеняется и сгорает, давление в камере сгорания резко возрастает и закрывает воздушные клапаны и клапан на форсунке. Продукты сгорания, расширяясь в сопле, создают реактивную тягу. При этом падает давление в камере сгорания, что ведет к открыванию воздушных клапанов и клапана на форсунке — начинается новый цикл работы двигателя.

Для инициирования работы ПуВРД в камере сгорания устанавливается свеча зажигания, создающая электрические разряды для воспламенения смеси. Однако через несколько десятков циклов работы двигателя стенки камеры сгорания нагреваются настолько, что топливная смесь воспламеняется от них, и необходимость в свече зажигания отпадает.

Таким образом, повышение давления в камере сгорания ПуВРД достигается двумя путями: во-первых, за счет торможения набегающего потока воздуха при открытых воздушных клапанах; во-вторых, за счет сжигания топлива в объеме, замкнутость которого на короткое время обеспечивается закрытыми воздушными клапанами и инерцией воздушного столба

* По способу работы ПуВРД несколько напоминает работу паровой лодки, описанной в ст. 2.44 на с. 184.

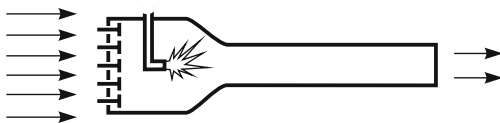


Рис. 2.26

в длинном узком реактивном сопле. Замечательной особенностью ПуВРД является возможность его работы даже при нулевой скорости летательного аппарата и практически на любом топливе.

Процессы в ПуВРД описываются **циклом Хамфри** (рис. 2.25, б) по имени английского инженера **Г. А. Хамфри** (1868–1951), в 1909 г. предложившего водяной насос, работавший по этому циклу. В этом цикле процесс 0-1 соответствует адиабатическому сжатию горючей смеси в камере сгорания за счет напора потока воздуха при открытых воздушных клапанах, а процесс 1-2 — изохорическому ее нагреву при сгорании топлива при закрытых клапанах. Далее происходит адиабатическое расширение продуктов сгорания в реактивном сопле (процесс 2-3). Процесс 3-0 соответствует изобарическому (при атмосферном давлении) охлаждению выброшенных соплом продуктов сгорания до атмосферной температуры.

В настоящее время существуют и другие модификации ПуВРД:

- **бесклапанные** — в них отсутствуют механические воздушные клапаны, а чтобы обратное движение рабочего тела не приводило к уменьшению тяги, двигатель выполняется в форме латинской буквы U, концы которой обращены назад по ходу движения аппарата (см. следующую статью);

- **детонационные** — двигатели, в которых горение топливной смеси происходит в режиме детонации (как взрыв).

ПуВРД характеризуется как шумный и неэкономный, зато простой и дешевый. Наиболее известным летательным аппаратом с ПуВРД является самолет-снаряд Фау-1, разработанный во время Второй мировой войны в фашистской Германии для бомбардировки Англии. В настоящее время ПуВРД устанавливается на беспилотные летательные аппараты одноразового применения с рабочими скоростями до 0,5 Маха. Благодаря

простоте и дешевизне, маленькие двигатели этого типа также очень популярны среди авиамоделистов.

В **турбореактивном двигателе (ТРД)** для дополнительного сжатия набегающего воздуха используется компрессор, размещенный перед камерой сгорания (рис. 2.27). Компрессор приводится в движение турбиной, смонтированной сразу же после камеры сгорания на одном валу с компрессором. Из камеры сгорания нагретое рабочее тело поступает на турбину, расширяется, приводя ее в движение и отдавая ей часть своей энергии, а после нее расширяется в сопле и истекает из него, создавая реактивную тягу. Благодаря компрессору ТРД может стартовать с места и работать при низких скоростях полета. ТРД эффективен при скоростях, меньших 3 Махов, при больших скоростях эффективность ТРД падает, отдавая пальму первенства ПВРД.

Термодинамика внутренних процессов в ТРД описывается циклом Брайтона (как у ПВРД; см. рис. 2.25, а выше).

ТРД активно применялись до 60–70-х годов XX в. в качестве двигателей для военных и коммерческих самолетов. После этого они были вытеснены более экономичными **двухконтурными ТРД**, в которых воздух после компрессора разделяется на два потока: первый поток, минуя камеру сгорания, подается непосредственно в реактивную струю в сопле, а второй поступает в камеру сгорания (как у обычных ТРД). Такая конструкция обеспечивает более высокие КПД по сравнению с обычными ТРД; кроме того, в целях кратковременного повышения мощности она позволяет двигателю работать **в режиме форсажа** за счет дополнительного впрыскивания топлива непосредственно в сопло. В настоящее время двухконтурные ТРД являются наиболее распространенным типом

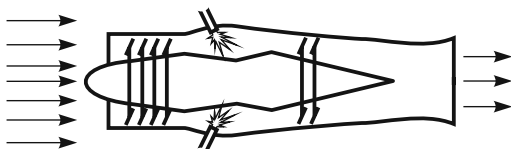


Рис. 2.27

ВРД, используемых как на высокоскоростных истребителях-перехватчиках, так и на гигантских коммерческих и военнотранспортных самолетах [1, 29, 172, 191].

2.56. САМОДЕЛЬНЫЙ РЕАКТИВНЫЙ ДВИГАТЕЛЬ

В предыдущей статье уже отмечалось, что хотя в авиации пульсирующие воздушно-реактивные двигатели (ПуВРД) нашли ограниченное применение, благодаря простоте они очень популярны среди авиамоделистов. Элементарный принцип работы ПуВРД делает его относительно безразличным к точности изготовления, поэтому сборка различных конструкций ПуВРД стала излюбленным занятием для людей, неравнодушных к техническим хобби. В этой статье будет описана конструкция **бесклапанного ПуВРД**, в котором нет движущихся частей.

Принцип работы бесклапанного ПуВРД приведен на рис. 2.28. При сгорании горючей смеси образовавшиеся продукты горения вырываются из обеих труб (именно поэтому они направлены в одну сторону) (рис. 2.28, а). Но за счет разницы в длинах в тот момент, когда давление в камере сгорания падает, по длинной трубе по инерции еще движутся выхлопные газы (рис. 2.28, б). Это обеспечивает дополнитель-

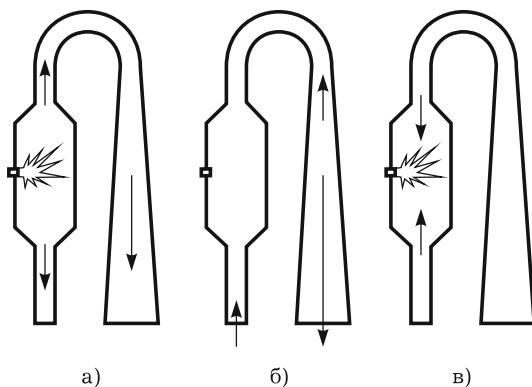


Рис. 2.28

ное разрежение в камере сгорания и всасывание в него через короткую трубу наружного воздуха. Под действием этого же разрежения часть горячих газов из длинной трубы также направляется в камеру сгорания. Эта часть сжимает горючую смесь и поджигает ее — цикл повторяется (рис. 2.28, в). Единственный момент, когда необходима система зажигания и принудительный надув, — это запуск двигателя.

Как вы, наверное, интуитивно понимаете, КПД такого двигателя очень маленький. И действительно, давление горючей смеси до возгорания превышает атмосферное давление всего лишь в 1,2 раза. Тем не менее, у такого ПуВРД очень хорошее отношение силы тяги к массе, ведь он имеет в своем составе минимум деталей.

Схема бесклапанного ПуВРД, предлагаемого вам для сборки, приведена на рис. 2.29. В ней передняя часть, из которой торчит «отросток» трубы, и есть камера сгорания. В качестве топлива будет использоваться природный газ из баллона. Рекомендуется придерживаться указанных на рисунке пропорций, ведь они всецело определяют частоту пульсаций — если не соблюдать их, двигатель может не запуститься. Однако никто не запрещает вам экспериментировать с размерами.

Корпус двигателя изготавливается из листового металла. С точки зрения термостойкости для наших целей лучше всего подходит нержавейка, но для первого раза лучше использовать черную низкоуглеродистую сталь: ее проще формовать и варить. Минимальная толщина листа, способного выдержать температуру сгорания топлива, — 0,6 мм, однако лучше выбрать лист толщиной 1 мм, так как ее легче сваривать.

Первое, что необходимо сделать, это начертить развертки будущих деталей двигателя на бумаге в натуральную величину. Развертки затем вырезаются, чтобы в последующем

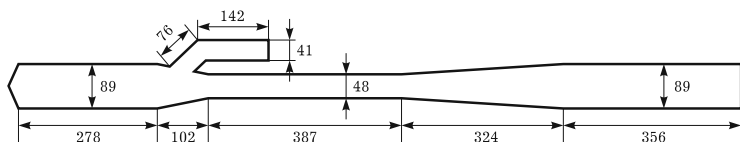


Рис. 2.29

использовать их в качестве шаблонов при нарезке из металлического листа. Для резки железных листов лучше пользоваться электрическими ножницами для металлов — они дают ровные незагибающиеся края, удобные для последующей стыковки и сварки.

Вырезанные из металла развертки необходимо формировать в трубы и конусы, для этого можно воспользоваться тисками, а лучше — другой металлической толстостенной трубой меньшего диаметра и киянкой. Для сварки разверток лучше пригласить хорошего профессионального сварщика, так как это требует некоторого мастерства (легко прожечь в заготовке дыру).

После того, как корпус двигателя полностью сварен, необходимо внутри входной трубы («отростка» в камере сгорания) закрепить топливный инжектор, подающий в камеру сгорания газ. В качестве такого инжектора можно использовать сварочную газовую горелку, соединенную с помощью трубки с газовым баллончиком.

Далее на камере сгорания двигателя необходимо установить свечу зажигания (она нужна только для запуска двигателя). Можно воспользоваться системой зажигания (свеча, высоковольтный провод и магнето) от бензопилы, мотоблока или мопеда. Правильный способ крепления свечи к камере сгорания — проделать в ней дырку и на эту дырку приварить гайку, в которую и вкручивается свеча. Только учтите, свечи зажигания имеют резьбу с мелким шагом, и надо найти соответствующую гайку. Магнето можно приводить в движение с помощью электрической дрели.

В принципе, ПуВРД готов. Остается только закрепить его вместе с газовым баллоном на какую-нибудь тележку, например, от старой детской коляски.

Отдельную сложность представляет запуск двигателя. Из рис. 2.28 видно, что весь цикл начинается с интенсивного расширения воспламенившейся горючей смеси. Другими словами, чтобы двигатель начал работать, уже первая порция смеси должна иметь рабочее соотношение газа и воздуха — в противном случае газ загорится, но не расширится, и вся конструкция превратится в подобие огнемета. Чтобы добиться

нужного состава смеси на старте, опытные моделисты придумали специальную последовательность запуска. Сначала в двигатель подается газ, который полностью заполняет камеру сгорания. Затем включается искровое зажигание, но оно не в силах поджечь переобогащенную смесь в камере сгорания. И лишь затем во впускную трубу подается сжатый воздух из какого-нибудь компрессора (например, из пылесоса, работающего в обратном направлении). Как только в камере становится достаточно воздуха, чтобы газ воспламенился, происходит запуск. Затем компрессор можно убрать, а систему зажигания выключить — двигатель вполне может работать без их помощи.

И, напоследок, предупреждение: необходимо соблюдать предельную осторожность во время запуска двигателя, а также во время его работы (камера сгорания раскаляется до красна). Еще один недостаток ПуВРД — это оглушительный шум от пульсаций (до 140 дБ), так что, если вам удастся запустить его, об этом незамедлительно узнают все в радиусе пары километров. Вам же лучше воспользоваться защитными наушниками [1].

2.57. ТЕПЛОВЫЕ ПОТЕРИ

Основным признаком увеличения жизненного уровня в настоящее время является увеличение потребления энергии на душу населения. К примеру, энергии на одного человека в виде электричества больше всего приходится в США — примерно 12–14 кВт. В Европе и в нашей стране этот показатель почти вдвое меньше, а в развивающихся странах — во много раз меньше. Однако тенденция к увеличению потребления электроэнергии сохраняется, и в настоящее время она составляет не менее 0,2 кВт на каждого человека на Земле.

Для современной цивилизации основными источниками энергии являются энергия сжигания углеводородных топлив, энергия падающей воды и атомная энергия. Хотя в последнее время активно развивается альтернативная энергетика (см., например, ст. 2.46 на с. 188), ее доля в общем энергопроизводстве незначительна.

В конечном итоге побочным эффектом производства энергии является рассеяние ее части в окружающую среду в виде низкотемпературной (деградированной) теплоты (см. ст. 2.13 на с. 119). По данным статистики электроэнергетика выбрасывает в окружающую среду не менее 9,8 млрд кВт тепловой энергии. Почти столько же выбрасывается промышленностью. Еще 25 млрд кВт тепловой энергии рассеивают имеющиеся в настоящее время на Земле около миллиарда автомобилей. Таким образом, общий выброс тепловой энергии в окружающую среду по самым скромным оценкам достигает почти 45 млрд кВт!

Для сравнения, Земля получает от Солнца где-то 167 000 млрд кВт тепловой энергии и из них около 0,1% запасается растительностью Земли, т.е. на Земле остается 167 млрд кВт. Если сравнить значения 45 и 167 млрд кВт, видно, что человечество высвобождает энергию, соизмеримую с поступающей на Землю энергией Солнца! И если за миллиарды лет существования Земля приспособилась поддерживать тепловой баланс, то энергия, поступившая за последние десятилетия в окружающую среду от деятельности человека, уже нарушает существовавший ранее баланс, что может грозить глобальными катастрофами. Уже сейчас в некоторых районах локальная скорость рассеяния теплоты достаточно велика и создает заметный эффект (см. ст. 2.61).

Наибольшее заметное тепловое загрязнение создают тепловые электростанции, использующие паровые турбины и потребляющие углеводородные топлива. Экономические факторы, обусловленные современной системой «свободного предпринимательства», поощряют развитие централизованных станций все больших размеров. Но такое строительство в экологическом плане, наоборот, дает отрицательный эффект. Причиной этого является то, что существует верхний температурный предел, при котором еще могут функционировать детали парового котла — ведь при высоких температурах прочность металлов снижается. На сегодня максимальная рабочая температура тепловых электростанций близка к $T_1 = 880$ К. Температура T_2 , при которой отводится теплота в окружающую среду, в среднем равна 300 К. Подставив эти

величины в уравнение для КПД идеальной тепловой машины, получим

$$\eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1} = \frac{880 - 300}{880} \approx 0,66 = 66\%.$$

Однако это — максимально возможный КПД для таких температур. Если принять во внимание все потери, то реальный КПД снижается до 40%. Значит, тепловая электростанция рассеивает в окружающую среду около 60% всей подведенной к ней теплоты, т.е. она рассеивает на 50% больше энергии, чем производит в виде электричества.

Однако дальнейшая судьба 40% полученной в виде электричества полезной энергии еще печальнее, о чем свидетельствует табл. 2.6 на примере передачи энергии для обработки детали на токарном станке.

Если речь идет об атомной электростанции, то проблема становится еще сложнее. Соображения безопасности наряду с ограничениями на передачу теплоты и особенностями строения реактора приводят к тому, что эффективная температура T_1 для АЭС значительно ниже, чем для обычной тепловой электростанции. Несмотря на то, что АЭС не имеет значительных тепловых потерь, ее общий КПД так низок, что в окружающую среду рассеивается в два раза больше энергии (т.е. на 200% больше!), чем поступает в линии электропередачи в виде электричества. Поэтому принципы работы АЭС в настоящее время активно модернизируются. В частности, предлагается в АЭС совмещать две системы: магнетогидродинамические генераторы и газовые турбины.

В некоторых странах проблему теплового загрязнения пытаются решать повторным использованием выбрасываемого тепла для отопления жилых домов и предприятий. Такие меры в первую очередь целесообразны в густозаселенных районах и в районах с холодным климатом. По мере обострения проблемы могут появиться и другие решения, однако ясно, что решение этой проблемы потребует больших затрат времени и средств [60, 102, 142, 154, 181].

Таблица 2.6

**Потери при передаче к конечному потребителю
100 условных единиц энергии топлива**

Потери	Кол-во	Поступило	Кол-во
На собственные нужды при добыче топлива; при транспортировке топлива	10	На электростанцию	90
При сжигании в виде дымовых газов	5	В высокотемпературный пар	85
При работе паровой турбины в виде низкотемпературного тепла, отдаваемого холодильнику	53	В электрогенератор в виде механической энергии вращения ротора	32
Во время работы электрогенератора	2	В трансформаторы для преобразования в виде энергии электрического тока	30
В виде отведения электроэнергии на собственные нужды электростанции	2	В линию электропередачи	28
При передаче электроэнергии	3	На электропривод станка	25
В электроприводе станка	6	На вал станка в виде механической энергии вращения	19
На преодоление сил трения с последующим превращением в тепло	1,5	Для обточки детали (для преодоления межмолекулярных сил в детали)	17,5

2.58. ЭФФЕКТИВНОСТЬ ДВИЖЕНИЯ

Привыкнув видеть в автомобилях и самолетах некий символ технического прогресса и считая запасы энергии практически неограниченными, мы часто не представляем себе

энергетическую рентабельность «быстрой езды», которую, как оказалось, любят не только русские, но и практически все народы мира. Какая же величина характеризует эффективность (рентабельность) нашего движения?

С одной стороны, ясно, что эффективность движения K должна быть пропорциональна скорости — ведь мы стремимся проводить в пути как можно меньше времени. В то же время, экономя горючее, мы заинтересованы в том, чтобы сила сопротивления нашему движению была как можно меньше, поэтому K должна быть обратно пропорциональна силе сопротивления. При всем при этом мы также хотим перевезти как можно больше полезного груза, поэтому K должна быть пропорциональна и массе груза. Таким образом,

$$K \sim \frac{vm}{F_{\text{сопр}}(v)},$$

где v — скорость передвижения; $F_{\text{сопр}}(v)$ — сила сопротивления для данной скорости передвижения; m — масса полезного груза. Для наглядности, однако, вместо скорости v удобнее пользоваться величиной $\tilde{v} = v/v_{\text{пеш}}$ — отношением скорости v перевозки к скорости пешехода $v_{\text{пеш}}$, и величиной $f(\tilde{v}) = F_{\text{сопр}}(\tilde{v})/mg$ — отношением силы сопротивления к весу груза при заданной скорости $\tilde{v}$. Тогда

$$K \sim \frac{\tilde{v}}{f(\tilde{v})}.$$

Очевидно, что значение K тем выше, чем больше скорость перемещения и чем меньше преодолеваемое сопротивление. Отсюда следует, что наиболее рентабельный способ повышения числа K состоит в наращивании скорости перемещения, но с одним важным условием: сопротивление движению должно при этом расти как можно медленнее. При сухом трении, как известно, сила трения не зависит от скорости: $F_{\text{тр}} = \mu N = \mu mg$, соответственно $f(\tilde{v}) = \mu$. Это означает, что выгодно всячески увеличивать скорость перемещения $\tilde{v}$. Но при внутреннем ламинарном трении в газообразной или жидкой среде сила сопротивления пропорциональна скорости: $F_{\text{сопр}} \sim v$, и,

соответственно, $f(\tilde{v}) \sim \tilde{v}$, т. е. число K при увеличении скорости движения сохраняется постоянным. Наконец, при турбулентном внутреннем трении в газообразной или жидкой среде сила сопротивления пропорциональна уже квадрату и более высоким степеням v : $F_{\text{сопр}} \sim v^n$ ($n \geq 2$), поэтому число K с ростом скорости перемещения резко уменьшается.

К сожалению, именно последний случай типичен для основных видов нашего транспорта: поездов, автомобилей, теплоходов и самолетов. В итоге каждый новый скоростной рубеж, достигаемый на транспорте и вызывающий всеобщее ликование, оплачивается все более непомерными расходами топлива! Это отчетливо видно из приведенной табл. 2.7, в которой с помощью числа K сопоставляется рентабельность средств перемещения, используемых на разных этапах развития нашей цивилизации.

Таблица 2.7

**Эффективность
различных видов транспорта**

Вид транспорта	$\tilde{v}$	$f(\tilde{v})$	K
Волок	1,0	0,300	3,5
Повозка с лошадей	1,5	0,075	20
Гребное судно	3,0	0,006	500
Парусное судно	4,0	0,003	1300
Железная дорога	15	0,006	2500
Теплоход	10	0,004	2500
Автомобиль	15	0,075	200
Самолет	200	1,100	180

Оказывается, что лучшие показатели отнюдь не у автомобиля и самолета — этих признанных королей транспорта, по праву считающихся гордостью нашего века. Оба они сильно уступают старым добрым парусным судам, от которых (не слишком ли легкомысленно?) мы поспешили отказаться. Показатели парусника выглядели бы еще более впечатляющими, если бы мы учитывали стоимость затрачиваемой энергии, которая, очевидно, здесь чрезвычайно низка, хотя и не

равна нулю, поскольку необходимо считаться с использованием какой-то другой энергии при полном безветрии.

Далее, мы видим, что наибольшая эффективность перевозок достигалась при использовании таких сравнительно тихих средств, как обычный железнодорожный локомотив и морской теплоход, после чего с появлением автомобилей и самолетов число K резко пошло на убыль. Объясняется это, как легко догадаться, быстрым ростом сопротивления среды при увеличении скорости движения. В самом деле, при скорости 80 км/ч на преодоление сопротивления воздуха затрачивается половина мощности современного автомобиля, в то время как при 130 км/ч этот показатель близок уже к 2/3. Еще более разительна картина у «королей воздуха». Современный реактивный лайнер, имея на борту 150 пассажиров и двигаясь со скоростью 700–900 км/ч, сжигает ежедневно 46 т горючего. Только для подъема на крейсерскую высоту 9000 м авиалайнер «Боинг-747» затрачивает около 12 т горючего, не считая огромного количества атмосферного кислорода.

Из всего сказанного следует, что дальнейшее убыстрение наземного транспорта уже немыслимо без радикального решения проблемы трения и, прежде всего, трения о воздух [116].

2.59. МАШИНА СТИРЛИНГА

Современным перспективным направлением развития тепловых машин являются **двигатели Стирлинга** (или **стирлинг-машины**). Это — тепловые машины, в которых одно и то же рабочее тело (жидкое или газообразное) совершает термодинамические процессы в замкнутом объеме, без периодического выброса в атмосферу отработавшего рабочего тела. Таким образом, в стирлинг-машинах отсутствует клапанный механизм — все процессы, происходящие в двигателе, протекают с изменением давления, температуры и объема, но при постоянном количестве рабочего тела в системе.

Работа двигателя Стирлинга основана на периодическом нагреве и охлаждении рабочего тела с извлечением энергии из возникающего при этом изменения объема рабочего тела. В отличие от двигателей внутреннего сгорания, в которых го-

рючее сначала поступает снаружи во внутренний объем (цилиндр) машины, а потом там сгорает, совершает полезную работу и выбрасывается в атмосферу, в двигателях Стирлинга сгорание топлива происходит непрерывным образом снаружи машины. Из-за этого машину Стирлинга можно назвать **двигателем внешнего сгорания**. Паровая машина тоже является двигателем внешнего сгорания, однако в ней рабочее тело (водяной пар), в отличие от стирлинг-машины, периодически выбрасывается в атмосферу. Обычно в роли рабочего тела стирлинг-машин выступает воздух, но также могут использоваться водород, гелий, фреоны, двуокись азота, сжиженный пропан-бутан и вода.

Двигатель Стирлинга может работать не только от сжигания топлива, но и от любого перепада температур (даже маленького). К основным преимуществам стирлинг-машин следует отнести малый уровень шума и малую степень загрязнения воздуха выхлопными газами при значениях эффективного КПД и удельной мощности, сравнимых или лучших, чем у бензиновых двигателей и дизелей. Они достаточно экономны и часто оказываются самыми эффективными видами двигателей для утилизации некоторых видов тепловой энергии, особенно при небольшой разнице температур. Например, в случае преобразования солнечной энергии в электричество стирлинги дают бóльший КПД, чем паровые машины. Стирлинг-машины не расходуют рабочее тело и их экологичность обусловлена только экологичностью источника тепла, которая очень высока из-за того, что обеспечить полноту сгорания топлива при внешнем сгорании проще, чем в двигателях внутреннего сгорания. Именно это сочетание характеристик усилило внимание к использованию двигателей Стирлинга в настоящее время — проводимые интенсивные исследования и разработки направлены на создание более совершенного прототипа двигателя для транспорта и связанных с ним систем.

Двигатель Стирлинга впервые был запатентован шотландским физиком и священником **Р. Стирлингом** (1790–1878) в 1816 г. (английский патент № 4081). С тех пор создано много модификаций этой машины, иногда совсем не похожих на оригинальную конструкцию Р. Стирлинга. Однако циклы работы

всех этих модификаций являются разными видоизменениями одного базового цикла — **цикла Стирлинга** (рис. 2.30). Как видно из рисунка, цикл Стирлинга состоит из двух изотерм и двух изохор, и намного проще цикла Карно (штриховая линия на рис. 2.30), а тем более, — циклов Отто и Дизеля (см. ст. 2.50 на с. 196). Цикл Стирлинга (вернее — идеальный цикл Стирлинга) имеет тот же максимально возможный КПД, что и цикл Карно при данных температурах: $\eta = (T_{\max} - T_{\min})/T_{\max}$. Однако по сравнению с машиной Карно совершаемая за цикл работа больше (сравните площади циклов), поэтому реальная стирлинг-машина может функционировать при более низких давлениях, обеспечивая, тем не менее, ту же работу, что и машина Карно. Именно этим обусловлена возможность работы стирлинг-машины даже при маленьких перепадах температуры.

Простейшая машина на основе идеального цикла Стирлинга приведена на рис. 2.31. В цилиндре с двух сторон расположены поршни с **регенератором** R между ними. Регенератор — это специфичная деталь машины Стирлинга, которую можно рассматривать как некую тепловую «губку», обладающую способностью поочередно поглощать и отдавать теплоту. Он представляет собой пористую структуру, объем которой заполнен металлической проволокой, гранулами, гофрированной фольгой или металлическими полосками. Одна сторона объема цилиндра (слева от регенератора на рис. 2.31) находится при высокой температуре $T_{\max}$ и называется **полостью расширения**. Объем по другую сторону от регенератора находится при низкой температуре $T_{\min}$ и называется **полостью**

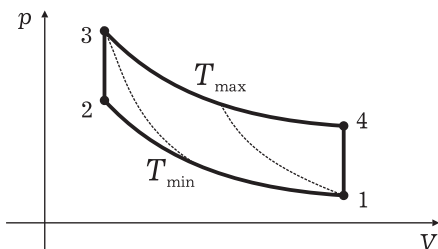


Рис. 2.30

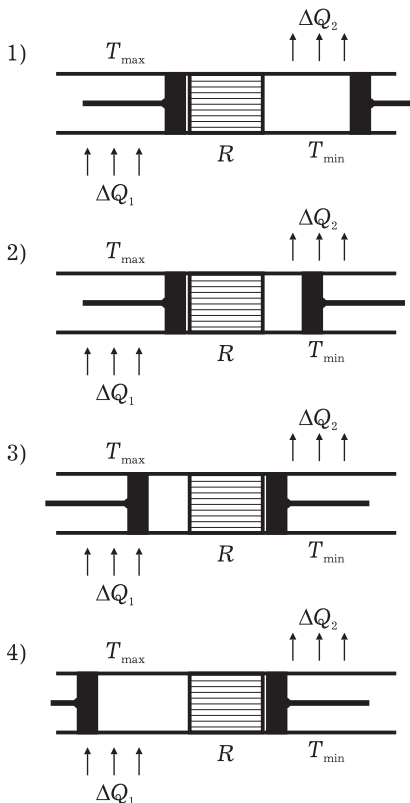


Рис. 2.31

сжатия. Следовательно, температурный градиент между торцевыми поверхностями регенератора равен $T_{\max} - T_{\min}$.

В начале цикла объем полости сжатия максимален, а полости расширения — равен нулю (рис. 2.31, 1). В таком положении все рабочее тело находится в холодной полости сжатия, объем которой максимален, а давление и температура — минимальны. Это соответствует состоянию 1 на рис. 2.30. Во время процесса изотермического сжатия 1-2 правый поршень сжимает объем полости сжатия, а поршень полости расширения остается неподвижным (рис. 2.31, 2), при этом давление

рабочего тела увеличивается, однако его температура остается постоянной, так как теплота ΔQ_2 все время отводится в окружающую среду. В изохорическом процессе 2-3 оба поршня движутся одновременно, так что объем между ними остается постоянным, но рабочее тело через регенератор переходит в полость расширения (рис. 2.31, 3). При прохождении через регенератор температура рабочего тела повышается от $T_{\min}$ до $T_{\max}$, одновременно с этим повышается и его давление. В процессе изотермического расширения 3-4 левый поршень продолжает двигаться от регенератора, а правый поршень остается неподвижным вблизи регенератора (рис. 2.31, 4). Именно во время этого такта извлекается полезная работа. Поскольку это процесс расширения, то с увеличением объема рабочего тела давление его уменьшается, но температура остается постоянной, поскольку теплота ΔQ_1 все время подводится к системе от внешнего источника. Во время последнего процесса цикла 4-1 поршни движутся одновременно так, чтобы рабочее тело при постоянном объеме через регенератор возвращается в полость сжатия. При этом теплота от рабочего тела передается регенератору и его температура уменьшается до $T_{\min}$.

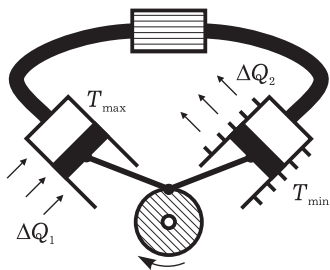


Рис. 2.32

Необходимо отметить, что технически рассмотренное выше устройство в чистом виде реализовать достаточно сложно, т.к. во время работы двигателя имеются промежутки времени, в течение которых поршни остаются в неподвижном состоянии. Поэтому любое реальное устройство соблюдает рассмотренные выше такты лишь приблизительно, из-за чего их КПД ниже КПД идеальной стирлинг-машины.

Один из вариантов технической реализации двигателя Стирлинга (двухцилиндрового) приведен на рис. 2.32.

Работа современных машин Стирлинга во многом отличается от принципа работы рассмотренной выше идеальной ма-

шины Стирлинга. Условно все стирлинг-машины делят на три группы: альфа-, бета- и гамма-стирлинги.

Альфа-стирлинг конструктивно содержит два отдельных цилиндра со своими поршнями, один из которых — горячий, другой — холодный (см. рис. 2.32). Регенератор находится в соединительной трубке между горячим и холодным цилиндрами. У данного типа двигателя удельная мощность достаточно велика, но, к сожалению, высокая температура горячего поршня создает определенные технические проблемы.

Бета-стирлинг технически очень похож на рассмотренную выше идеальную машину на рис. 2.31. Отличие заключается в том, что регенератор может быть внешним (как часть теплообменника) или может быть совмещен с поршнем полости сжатия. Кроме того, механическая система рычагов и шатунов, призванная обеспечить согласованный ход поршней, является достаточно сложной.

Гамма-стирлинг, как и альфа-стирлинг, также имеет два цилиндра: один холодный, с поршня которого снимается мощность, а второй — горячий с одного конца и холодный с другого.

Регенератор также может быть как внешним (в этом случае он соединяет горячую часть второго цилиндра с холодной и одновременно с первым холодным цилиндром), так и внутренним (в этом случае он является частью поршня второго цилиндра).

Также существуют разновидности двигателя Стирлинга (например, роторные), не попадающие под указанную классификацию.

Кроме преимуществ, у машин Стирлинга имеются и недостатки, основными из которых являются громоздкость и материалоемкость. Связано это с тем, что рабочее тело необходимо периодически охлаждать, а это приводит к существенному увеличению массо-габаритных показателей за счет увеличенных радиаторов. Кроме того, в стирлинг-машинах горячий теплообменник работает в очень напряженных условиях теплопередачи и при очень высоких давлениях, что требует применения высококачественных и дорогих материалов [139, 191, 212].

2.60. ТЕРМОЯДЕРНАЯ ЭНЕРГЕТИКА

Атомная энергетика основана на выделении энергии при ядерных реакциях деления тяжелых ядер (в основном, ядер урана $^{235}_{92}\text{U}$) на более легкие. При таких реакциях продукты деления по массе оказываются меньше, чем массы исходных ядер — это так называемый **дефект масс**. Согласно **формуле Эйнштейна** $E = mc^2$, т.е. масса и энергия эквивалентны друг другу, что означает выделение недостающей массы при ядерных реакциях в виде энергии. Эта энергия сообщается продуктам деления ядер в виде кинетической энергии, что означает получение **высокотемпературной теплоты**. С помощью теплообменников эта теплота передается воде и та превращается в пар, приводящий в действие паровую турбину с электрогенератором. Вот, в основном, упрощенная схема работы атомной электростанции.

Хотя в последние годы атомная энергетика развилась в сильнейшей степени, нельзя забывать, что она потребляет невозобновляемый источник энергии — уран, запасы которого не безграничны. К тому же эксплуатация атомных станций сопряжена со многими опасностями, хотя в современных станциях они сведены к минимуму. Продуктами переработки урана являются радиоактивные отходы, и здесь возникает проблема их захоронения, которая затрагивает экологию и будущее человечества.

Выход из этой ситуации ученые видят в развитии **термоядерной энергетике**, основанной не на ядерных реакциях деления, а на реакциях синтеза (соединения) легких ядер. Оказывается, существует определенный класс ядерных реакций синтеза, при которых выделяется огромное количество энергии. Именно такие реакции происходят внутри нашего «благодетеля» — Солнца, да и вообще внутри любой «нормально живущей» звезды (есть также звезды, внутри которых термоядерная «топка» угасла). Основой термоядерной энергетике является самый простой и самый распространенный элемент Вселенной — **водород**.

Атомы водорода в природе встречаются в виде трех изотопов:

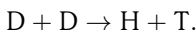
— обычный водород ${}^1_1\text{H}$ (другое название — **протий**, обозначается просто H), ядра которого содержат только один протон;

— тяжелый водород ${}^2_1\text{H}$ (**дейтерий D**), в ядрах которого один протон и один нейтрон;

— сверхтяжелый водород ${}^3_1\text{H}$ (**тритий T**), в ядрах которого один протон и два нейтрона.

На Земле на каждые 6 700 атомов протия в среднем приходится один атом дейтерия. Радиоактивный тритий в естественных условиях может образоваться только в стратосфере под действием космического излучения.

Так вот, одной из выгодных термоядерных реакций является синтез дейтерия:



Так как относительная атомная масса протия 1,007825, дейтерия 2,014102, трития 3,016049, то дефект масс для этой реакции составляет

$$\begin{aligned}\Delta m &= 2m_D - (m_H + m_T) = \\ &= 2 \cdot 2,014102 - (1,007825 + 3,016049) = 0,00433.\end{aligned}$$

Учитывая, что 1 атомная единица массы — это $1,66 \cdot 10^{-27}$ кг (см. ст. 1.4 на с. 15), то

$$\Delta m = 0,00433 \cdot 1,66 \cdot 10^{-27} = 7,1878 \cdot 10^{-30} \text{ кг}.$$

Получается, что при синтезе двух ядер дейтерия выделяется энергия

$$\begin{aligned}E_0 &= \Delta mc^2 = 7,1878 \cdot 10^{-30} \cdot (3 \cdot 10^8)^2 = \\ &= 6,46902 \cdot 10^{-13} \text{ Дж}.\end{aligned}$$

Много это или мало? Чтобы сделать результат более наглядным, вычислим энергию, выделяющуюся при реакции двух молей дейтерия:

$$E = N_A E_0 = 6,02 \cdot 10^{23} \cdot 6,46902 \cdot 10^{-13} \approx 3,9 \cdot 10^{11} \text{ Дж}.$$

Так вот, чтобы получить такое количество энергии, надо сжечь 13 500 кг (!) превосходного угля. Между тем масса двух молей дейтерия составляет всего около 4 г.

Первая трудность состоит в том, что дейтерий в больших количествах в природе не встречается — его надо добывать. К счастью, помощь нам в этом оказала (в который раз!) вода, запасы которой на Земле практически неисчерпаемы.

Вообще говоря, вода в природе должна быть трех видов (без учета того, что и кислород имеет три природных изотопа): обычная протиевая H_2O , тяжелая дейтериевая D_2O и сверхтяжелая тритиевая T_2O . По химическим свойствам эти виды ничем не отличаются друг от друга, а по физическим свойствам отличаются лишь незначительно (например, плотность тяжелой воды составляет 1104 кг/м^3). В естественных условиях, однако, любая вода — это смесь указанных, правда с большим преобладанием протиевой. В одной тонне природной воды в среднем содержится всего около 150 г тяжелой, а доля сверхтяжелой воды вообще исчезающе мала. Так вот, учеными разработана методика обогащения обычной воды, в результате которого доля тяжелой воды значительно увеличивается.

Вторая трудность состоит в том, что для того, чтобы два ядра дейтерия могли вступить в ядерную реакцию, их надо сблизить (столкнуть) до расстояния порядка 10^{-14} м . А это не просто: ведь положительно заряженные протоны в ядрах взаимно отталкиваются. Для того, чтобы все-таки их сблизить, ядра дейтерия надо предварительно разогнать. Начальную скорость разгона можно оценить из того факта, что кинетическая энергия ядер должна быть как минимум равна потенциальной энергии электростатического взаимодействия на расстоянии 10^{-14} м :

$$E_{\text{кин}} = E_{\text{пот}} = K \frac{q_1 q_2}{r}.$$

Заряд протона равен $q = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$, а коэффициент $K = 9 \cdot 10^9 \text{ (Н} \cdot \text{м}^2)/\text{Кл}^2$, тогда

$$E_{\text{кин}} = 9 \cdot 10^9 \frac{(1,6 \cdot 10^{-19})^2}{10^{-14}} = 2,304 \cdot 10^{-14} \text{ Дж}.$$

Мерой кинетической энергии молекул является температура: $E_{\text{кин}} = (3/2)kT$, откуда

$$T = \frac{2}{3} \frac{E_{\text{кин}}}{k} = \frac{2 \cdot 2,304 \cdot 10^{-14}}{3 \cdot 1,38 \cdot 10^{-23}} = 1,1 \cdot 10^9 \text{ К.}$$

Именно при этой температуре должна идти реакция, и именно это является камнем преткновения на пути человечества к энергетическому изобилию. Миллиард градусов — это вам не шутки!

На самом деле, однако, не нужно, чтобы до такой температуры был нагрет весь газ — достаточно, чтобы только некоторые молекулы дейтерия обладали столь чудовищной энергией. А это всегда возможно и при более низких температурах, так как в любом газе имеется распределение молекул по скоростям (энергиям) и некоторая доля молекул всегда имеет очень большие значения скорости. Кроме того, существует такое явление как **туннельный эффект**, благодаря которому всегда есть некоторая вероятность, что реакция между ядрами произойдет, если даже их кинетическая энергия будет ниже требуемой. Поэтому для осуществления термоядерной реакции достаточно довести дейтерий до температуры 40 000 000 К.

Осуществление термоядерной реакции при таких температурах для человечества не проблема, вернее сказать, такие реакции уже осуществлены — это взрыв водородной бомбы. В них для начала термоядерной реакции вначале взрывается обычная атомная бомба, которая и разогревает дейтерий до требуемой температуры. Однако это неуправляемый взрывной процесс, используемый, к тому же, не в мирных целях. А человечеству нужен **управляемый термоядерный процесс**.

Вся трудность в том, что ни одно вещество на свете не выдерживает таких высоких температур и нужны совершенно другие оригинальные подходы и технологии. Одним из таких перспективных направлений является **токамак** — тороидальная установка для магнитного удержания и электрического нагрева плазмы. Первый токамак был построен еще в 1956 г. в Советском Союзе. В 1968 г. на Токамаке-3 (СССР) была достигнута температура 10 000 000 градусов, и с этого момента

в мире начался настоящий бум токамаков — разными странами до настоящего времени их построено несколько десятков. На данный момент токамаки разрабатываются и координируются в рамках международного научного проекта ITER. Уже достигнуты необходимые температуры для термоядерного синтеза, но остаются проблемы устойчивого удержания высокотемпературной плазмы в канале токамака.

Другим направлением является осуществление так называемого **холодного термояда**, но здесь достижения не так явны и весьма туманные перспективы.

Если удастся реализовать идею управляемого термоядерного процесса, то у человечества наступила бы «эра энергетического рая» — энергии дейтерия должно хватить как минимум на миллиард лет! [60, 101, 191]

2.61. ГОРОД — «ОСТРОВ ТЕПЛА»

Знаете ли вы, что температура воздуха в городе на 3–5 °C выше, чем в окрестности? Метеорологи, составляя температурные карты городов, всегда обнаруживают в них «острова тепла», центр которых расположен вблизи городского центра. Так, например, в Манхэттене — центральной части Нью-Йорка, расположенной на одноименном острове, — тепловые выбросы составляют почти 120 Вт/м². Представьте только: с каждого квадратного метра может питаться 120-ваттная электролампа! По мере удаления от центра температура воздуха понижается. По этой причине, кстати, в центре города цветы весной начинают распускаться раньше, чем на окраинах и в пригородах.

В первую очередь, очевидно, это связано с тем, что в городе большое количество тепла выделяется промышленными объектами и транспортом. Кроме этой, имеются еще несколько причин: 1) из-за быстрого стока дождевой воды в городе меньше испарение (а оно сопровождается поглощением значительного количества тепла); 2) большие площади мостовых и зданий накапливают больше тепла, чем почва; 3) из-за большой высоты строений и их специфического расположения ветер в городе слабее. Наличие же пыли в воздухе, частые туманы

ны и городской смог сопутствуют возникновению парникового эффекта.

Давным-давно древнегреческий философ **Платон** (428–348 до н.э.) вычислил, что численность идеального города должна составлять 5040 граждан. Конечно, по нашим меркам это были наивные подсчеты, но, тем не менее, современные города расплываются подобно масляному пятну — ныне городом с миллионным населением никого не удивить. Из-за этого «тепловые острова» имеют тенденцию к глобализации. Например, вся Япония (территория 600×600 км²) представляет собой очаг сплошной тепловой интенсивности. Такой «остров тепла» уже в состоянии повлиять на динамику региональных атмосферных процессов и существенно изменить местный климат [140, 154].

2.62. ПАРНИКОВЫЙ ЭФФЕКТ

В основе парникового эффекта для Земли лежит тот факт, что Солнце с температурой поверхности около $5\,000^\circ\text{C}$ излучает главным образом видимый свет. Земная атмосфера в значительной степени прозрачна для видимого света и солнечное излучение легко проникает к поверхности Земли и поглощается ею. Поглощенная энергия излучается Землей обратно, но уже в инфракрасном диапазоне. Однако инфракрасное излучение не может легко проходить сквозь атмосферу: молекулы различных веществ в атмосфере, важнейшими из которых являются углекислый газ и вода, поглощают его. Из-за способности углекислого газа и паров воды поглощать инфракрасные лучи их называют **парниковыми газами**. Парниковые газы сами вторично излучают поглощенную энергию, причем они могут излучать ее как в сторону космоса, так и внутрь, обратно к поверхности Земли. Таким образом, присутствие парниковых газов в атмосфере создает эффект укрывания Земли одеялом и позволяют сохранить тепло около поверхности более длительное время. Без атмосферы средняя температура поверхности составляла бы всего -20°C , что намного ниже точки замерзания воды.

Важно понимать, что парниковый эффект на Земле был всегда. Без него океаны давно бы замерзли и высшие формы жизни не появились бы.

В настоящее время научные дебаты о парниковом эффекте идут по вопросу глобального потепления: не слишком ли мы, люди, нарушаем энергетический баланс планеты в результате сжигания ископаемых видов топлива и прочей хозяйственной деятельности, добавляя при этом излишнее количество углекислого газа в атмосферу? Сегодня ученые сходятся во мнении, что мы ответственны за повышение естественного парникового эффекта на несколько градусов, что существенным образом сказывается на природных процессах.

Парниковый эффект имеет место не только на Земле. В действительности самый сильный парниковый эффект, о котором мы знаем, — на соседней планете Венере (см. ст. 1.25 на с. 54). Атмосфера Венеры почти целиком состоит из углекислого газа, в результате чего поверхность планеты разогрета до 475°C . Климатологи полагают, что мы избежали такой участи благодаря наличию на Земле океанов: они поглощают атмосферный углерод и он накапливается в осадочных породах, таких как известняк. На Венере нет океанов и весь углекислый газ, который выбрасывают в атмосферу вулканы, там и остается.

Садоводы хорошо знакомы с этим физическим явлением: внутри парника всегда теплее, чем снаружи, и это помогает выращивать растения, особенно в холодное время года. Только роль парникового газа в парниках играет стекло (или, в последнее время, полиэтиленовая пленка), которое также прозрачно для видимого света, но не пропускает инфракрасное излучение [11, 136].

2.63. МЕДИЦИНСКИЙ ТЕРМОМЕТР

Для измерения температуры человеческого тела в медицине используются ртутные термометры (градусники). В процессе измерения между термометром и человеческим телом должно установиться тепловое равновесие, поэтому процесс измерения длится достаточно долго — до 10 мин. При этом

тепло от человеческого тела заставляет ртуть в градуснике расширяться и при достижении теплового равновесия уровень ртути на соответствующим образом отградуированной шкале покажет температуру.

После того, как произведено измерение, казалось бы, из-за неизбежного рассеяния тепла показания термометра должны уменьшаться до тех пор, пока снова не установится тепловое равновесие с окружающей средой. Однако, как мы знаем, медицинский градусник сохраняет свое значение неограниченно долго и лишь перед следующей процедурой измерения встряхиванием градусник сбрасывается до более низкой температуры. Почему же градусник хранит измеренное значение и почему перед очередным измерением мы обязательно должны «стряхнуть» его?

Хотя медицинский термометр и бытовой градусник для измерения температуры воздуха работают по одному и тому же принципу установления теплового равновесия с измеряемым телом, у них имеется одно существенное конструктивное различие — у медицинского градусника в нижней части капилляра расположено **сужение** капилляра. Диаметр сужения настолько мал, что ртуть проходит через него только под давлением, которое возникает либо в результате теплового расширения ртути, либо под действием центробежной силы (она создается, когда градусник встряхивают, совершая им дугообразные движения). При остывании ртуть в месте сужения разрывается, так как молекулярные силы в ртути недостаточно сильны, чтобы втянуть верхнюю часть столбика обратно сквозь сужение трубки. Такая конструкция медицинского градусника очень удобна для работы врачей и называется **максимальным термометром** [140, 155].

2.64. ТЕРМОМЕТР НА ВЕТРУ

Некоторые люди думают, что бытовой термометр, установленный в незащищенном от ветра месте, показывает температуру более низкую, чем защищенный термометр. Однако это заблуждение — никакого влияния на термометр ветер оказать не может, если только термометр сухой.

Люди, думающие, что ветер должен его охлаждать, думают так по аналогии с действием ветра на человеческий организм. Действительно, в ветреную погоду мороз переносится нами гораздо хуже, чем в тихую. Это объясняется тем, что ветер постоянно сгоняет слои воздуха, нагреваемые нашим телом, заменяя их холодными (см. по этому поводу ст. 3.26 на с. 318). Это вызывает усиленный расход тепла нашим телом, а следовательно, и резкое ощущение холода. Таким образом, человеческий организм (и вообще, организм любого теплокровного животного) **не находится (!)** в термодинамическом равновесии с окружающей средой. Термометр же по определению должен находиться в равновесии с окружающими телами и на него ветер никакого действия произвести не может. Соответственно показания термометра в морозный день не меняются оттого, стоит ли погода тихая, или дует сильный ветер.

Другое дело, если термометр смочен водой, например, от дождя. В ветреную погоду это приводит к усиленному испарению воды, при этом температура поверхности термометра понижается вследствие поглощения теплоты на испарение. Поэтому термометры надо защищать не от ветра, а от попадания на них воды [95].

2.65. ПАРАДОКСЫ АДИАБАТИЧЕСКОГО РАСШИРЕНИЯ

В жизни вам может встретиться (или уже встречалась) следующая (или аналогичная этой) ситуация. Допустим, вы выпустили из автомобильного баллона часть воздуха, чтобы понизить в нем давление до определенного значения. Однако когда вы через несколько минут снова измеряете в баллоне давление, то оказывается, что оно выше нужного значения. В чем дело?

А дело здесь в том, что давление в баллоне при выпуске воздуха падает достаточно быстро, поэтому такой процесс можно считать приблизительно адиабатическим (т.е. протекающим без теплообмена с окружающей средой: $\Delta Q = 0$). А адиабатическое расширение газа сопровождается уменьшением его температуры, так как при этом совершается работа

за счет запасов внутренней энергии (это следует из I начала термодинамики):

$$A = -\Delta U. \quad (2.18)$$

Поэтому когда вы закрываете баллон после выпуска воздуха, его температура ниже температуры окружающей среды. А дальше все просто: через некоторое время температура воздуха в баллоне сравняется с температурой окружающей среды и, соответственно, его давление изохорически повысится на некоторую величину (т.к. для изохорического процесса $p/T = \text{const}$). Таким образом, в реальности никакого парадокса нет.

Кстати, указанный выше процесс адиабатического расширения широко используют для получения низких температур и сжижения газов. Устройства, в которых периодическим образом совершается адиабатическое расширение газов, называются **детандерами**, фактически представляющие собой систему «цилиндр-поршень» с соответствующими клапанами (т.е. фактически это пневмодвигатель). Однако детандер обладает существенным недостатком, заключающимся в том, что при низких температурах возникают проблемы со смазкой движущихся частей. Поэтому в модифицированной машине, предложенной русским академиком **П. Л. Капицей** (1894–1984), поршневая система детандера заменена турбиной, вращающейся в потоке охлаждаемого газа, — это так называемый **турбодетандер**.

Поставим теперь другой вопрос. Пусть имеются два соединенных краном сосуда, в одном из которых содержится идеальный газ, а во втором — вакуум. Если открыть кран, то газ из первого сосуда, расширяясь, очень быстро заполнит второй сосуд с вакуумом. Однако при этом обнаружится, что газ при расширении не охлаждается. Как объяснить этот парадокс?

На самом деле, опять же, никакого парадокса нет. Все дело в том, что идеальный газ может охлаждаться, если при расширении он совершает работу (см. формулу (2.18)). При расширении же в вакуум идеальный газ никакой работы не совершает, поэтому не меняется и внутренняя энергия газа, а следовательно, и его температура.

Следует, однако, отметить, что при расширении в вакуум **реальных газов**, у которых взаимодействия между молекулами существенны, они все-таки охлаждаются, т.к. при этом совершается работа на преодоление сил молекулярного притяжения [20, 95, 137].

2.66. РАСШИРЕНИЕ ИЗОТЕРМИЧЕСКОЕ И АДИАБАТИЧЕСКОЕ

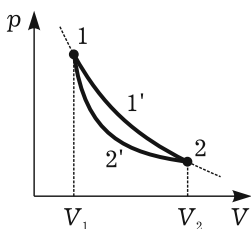


Рис. 2.33

Некоторое вещество расширяется от объема V_1 до объема V_2 . В первый раз это делается изотермически, во второй раз — адиабатически (рис. 2.33). Вопрос: существует ли в природе такое вещество, которое можно и адиабатически, и изотермически перевести из некоторого начального состояния 1 в одно

и то же конечное состояние 2?

Представьте только, если бы такое вещество существовало, то можно было бы построить вечный двигатель второго рода — машину, работающую без перепада температуры! Действительно, циклом такой машины можно было бы взять цикл 1-1'-2-2'-1.

Во время изотермического расширения 1-1'-2 рабочее тело получало бы теплоту ΔQ_1 от окружающей среды, а при адиабатическом сжатии 2-2'-1 теплообмен отсутствовал бы. За весь цикл машина совершала бы положительную работу, равную количеству полученной за цикл теплоты ΔQ_1 , т.е. полученная теплота целиком превратилась бы в работу.

Однако, как вы понимаете, существование такой машины запрещено вторым началом термодинамики (формулировка Кельвина: невозможно создать периодически действующую тепловую машину, которая всю полученную теплоту целиком превращала бы в работу) и это является ответом на поставленный вопрос: вещества с такими свойствами в природе не существует [20].

2.67. ТЕМПЕРАТУРА АТМОСФЕРЫ

Известно, что с повышением высоты температура атмосферы падает. Экспериментально определено, что на каждые 100 м подъема температура понижается примерно на 1°C . На заре авиации, когда кабины самолетов были еще открытыми, для первых летчиков это было настоящим испытанием — попробуйте-ка продержаться на морозе -40°C целый час в неподвижности, да еще при сильнейшем встречном ветре. Поэтому для летчиков шили специальную утепленную одежду и обувь, не продуваемую ветром. И лишь когда самолеты стали оснащаться герметичными кабинами, надобность в специальной теплой одежде отпала.

Каковы же причины понижения температуры атмосферы с высотой? С одной стороны, вроде бы, понятно, что поверхность Земли нагревается Солнцем сильнее, чем воздух. Но, с другой стороны, приповерхностный слой воздуха должен нагреваться Землей и вытесняться вверх опускающимися холодными массами воздуха — это известное всем явление конвекции. И действительно, в атмосфере всегда существуют теплые восходящие и холодные нисходящие воздушные потоки. Такое перемешивание атмосферы как минимум должно выравнивать температуру по высоте. Но все же температура не выравнивается. Почему?

Действительная причина охлаждения атмосферы с высотой заключается в том, что теплые восходящие потоки воздуха, поднимаясь в более разреженные слои и, соответственно, попадая в область пониженного давления, расширяются. Это расширение происходит с такой скоростью, что теплообмен с окружающей средой пренебрежимо мал (воздух — плохой проводник тепла), соответственно такой процесс можно считать **адиабатическим**. При адиабатическом расширении воздух совершает работу за счет своего запаса внутренней энергии ($A = -\Delta U$; см. ст. 2.65), что и приводит к понижению температуры.

Количественная сторона явления такова. Пусть у поверхности Земли ($h_0 = 0$) температура и давление воздуха равны соответственно T_0 и p_0 , а на некоторой высоте h_1 —

соответственно T_1 и p_1 . Тогда из уравнения адиабатического процесса (уравнения Пуассона) следует, что

$$T_1 = \left(\frac{p_0}{p_1} \right)^{\frac{1-\gamma}{\gamma}} T_0,$$

где γ — коэффициент Пуассона, для сухого воздуха равный 1,4.

В качестве примера вычислим понижение температуры воздуха на известной высоте 5,5 км, где давление атмосферы вдвое ниже, чем у земной поверхности. (Для определения приблизительного значения этой высоты вполне годится и барометрическая формула, хотя она, вообще говоря, выведена в предположении об изотермичности атмосферы.) Тогда

$$T_1 = 2^{\frac{1-1,4}{1,4}} T_0 = 0,82 T_0.$$

Если у поверхности Земли температура равна 273 К (0°C), то для высоты 5,5 км получим 224 К (−49°C), т. е. температура понижается как раз приблизительно на 1 градус на каждые 100 м поднятия.

Необходимо заметить, что присутствие водяных паров, от которых воздух почти никогда не бывает свободен, ослабляет понижение температуры с высотой почти на полградуса на каждые 100 м поднятия.

Итак, перемешивание воздушных масс при нагревании атмосферы снизу не может уравнивать их температуры: воздух, поднимающийся вверх, вследствие адиабатного расширения охлаждается; воздух, опускающийся вниз, вследствие адиабатного сжатия нагревается. В итоге верхние слои всегда имеют более низкую температуру, нежели лежащие близ земной поверхности.

Однако сказанное выше справедливо только в пределах зоны, называемой **тропосферой**, которая непосредственно прилегает к земле (рис. 2.34). Толщина тропосферы доходит до 17 км над тропиками и до 10 км — над полярными областями (верхняя границы тропосферы зависит от географической

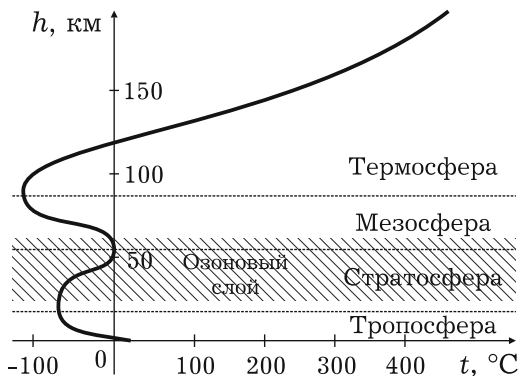


Рис. 2.34

широты). Температура воздуха на верхней границе тропосферы соответственно составляет над тропиками около -75°C , а над полюсами — около -60°C .

К тропосфере примыкает **стратосфера**. В стратосфере температура воздуха при подъеме сначала остается постоянной (до высот 25–30 км), а затем начинает возрастать вплоть до высоты 55 км, отвечающей верхней границе стратосферы; при этом температура достигает значений, близких к 0°C .

В следующем атмосферном слое — **мезосфере** — температура снова начинает уменьшаться по мере подъема: она падает до -100°C и даже до -150°C на уровне верхней границы мезосферы, имеющей высоту около 80 км.

Еще выше начинается **термосфера**; здесь температура по мере подъема возрастает.

Итак, в тропосфере температура воздуха с высотой уменьшается, в стратосфере температура сначала не меняется, а затем растет, в мезосфере она снова уменьшается и, наконец, в термосфере снова начинает расти. Атмосфера напоминает слоеный пирог: слои, где температура понижается, чередуются со слоями, где она повышается.

Происхождение такого «слоеного пирога» нетрудно объяснить. Понижение с высотой температуры в тропосфере было объяснено в начале этой статьи. Повышение же температуры в области стратосферы вызвано поглощением ультрафиолетовой

составляющей солнечного излучения в **слое озона**, который занимает интервал высот примерно от 20 до 60 км (см. следующую статью). Выше озонового слоя температура опять начинает падать из-за адиабатического расширения поднимающегося вверх теплого воздуха. В термосфере давление атмосферы падает настолько сильно, что для молекул становятся существенными столкновения с «солнечным ветром» и другими космическими частицами, несущимися с огромными скоростями. При этом увеличивается энергия молекул и, соответственно, повышается температура (см. ст. 1.18 на с. 40) [95, 130].

2.68. ОЗОНОВЫЙ СЛОЙ

Упомянутый в предыдущей статье озоновый слой является «щитом» Земли от вредного для живых существ ультрафиолетового солнечного излучения.

Озон — это трехатомная молекула кислорода O_3 , химически очень активная. Он образуется под действием солнечного ультрафиолетового излучения из атмосферного кислорода. Чем больше озона в атмосфере — тем больше УФ-излучения он поглощает. Немного озона проникает с потоками воздуха в нижние слои атмосферы.

В малых количествах озон полезен, т.к. обладает сильным бактерицидным свойством, но в больших количествах может вызвать смертельный исход. Когда солнечный свет реагирует с веществами, содержащимися в выхлопных газах и промышленных выбросах, то в результате фотохимических реакций образуется так называемый **приземный озон**. Обычно такая ситуация складывается в больших городах при антициклоне. Дыхание таким озоном очень опасно, т.к. он разрушает легкие. Озон выделяют и некоторые деревья — например, дуб или ива, — что может отравлять окружающую растительность.

В последнее время озон активно используется для уничтожения бактерий в питьевой воде на водоочистительных станциях как менее ядовитая альтернатива хлорке. Технологически производство озона не представляет особых трудностей — для этого достаточно высоковольтного разряда в воздухе. Именно этим объясняется специфичный запах во время

и после грозы. С запахом озона вы наверняка знакомы, если работали с электрическим оборудованием, в котором используется высокое напряжение (например, телевизоры с электронно-лучевой трубкой, копировальные аппараты и др.). Для производителей оборудования принят стандарт, в соответствии с которым при работе электрооборудования выработка озона не должна превышать определенную норму. Для этих же целей высоковольтное оборудование, как правило, снабжается озоновыми фильтрами, которые должны периодически меняться.

По современным данным, озоновый слой Земли постепенно разрушается и утоньшается, что связывают в первую очередь с промышленной деятельностью человека. Исследования показали, что в настоящее время в озоновом слое имеются дыры, сквозь которые ультрафиолетовое излучение Солнца беспрепятственно проникает к Земле. Причиной разрушения озонового слоя является атомарный хлор, выступающий в роли катализатора реакций превращения озона в простой кислород O_2 . Каждый атом хлора разрушает около миллиона молекул озона до того, как он удалится из атмосферы под действием других химических реакций.

В 1987 г. в Монреале (Канада) состоялась международная конференция, на которой промышленно развитые страны договорились о сокращении производства хлорированных углеводородов — основных веществ, являющихся источниками разрушения озонового слоя. К 1992 г. замена этих веществ на безопасные проходила так успешно, что было принято решение о полном их уничтожении к 1996 г. Хотя это обязательство не было выполнено в полной мере, сегодня ученые верят, что лет через пятьдесят озоновый слой восстановится полностью [5, 136, 148, 171].

2.69. «ВЕЧНЫЙ» ТЕРМОАТМОСФЕРНЫЙ ДВИГАТЕЛЬ

А нельзя ли как-то использовать перепад температуры атмосферы, описанный в статье 2.67, для создания теплового двигателя? Ведь перепад температуры в толще океанских вод позволяет это делать (см. ст. 2.49 на с. 195).

Это действительно возможно. Проект такого двигателя впервые был предложен в 1926 г. французским инженером **Бернардом Дюбо**. Однако прошло более 50 лет, прежде чем удалось построить первую работающую конструкцию такой системы. Только в 1979 г. в Испании заработала удивительная ветроустановка, сама создававшая для себя ветер! Обширный круг земли диаметром 244 м в основании трубы высотой 195 м и радиусом 5 м покрыли полиэтиленовой пленкой на каркасных опорах (что-то похожее на наши теплицы). Жаркое испанское солнце нагревало и землю, и воздух под пленкой. В результате в трубе за счет перепада температур возникала ровная постоянная тяга (см. ст. 1.33 на с. 69). Встроенная в трубу крыльчатка вращала электрогенератор, который выдавал до 50 кВт электроэнергии. Тяга не прекращалась даже ночью и в пасмурные дни — земля долго хранит тепло.

Однако эксплуатация установки оказалась довольно дорогой. Постепенно металлическая труба проржавела, а пленка разрушилась; после очередного урагана в 1989 г. ремонтировать систему не стали.

Но как знать, не обратится ли в будущем человечество снова к этой системе получения энергии от Солнца? Ведь не обязательно возводить дорогую металлическую трубу, к тому же имеющую естественное ограничение по высоте (чем выше, тем тяжелее установка и тем дороже ее эксплуатация). Можно использовать склоны гор для прокладки по ним воздухопроводов из более легких и дешевых материалов, и таким образом многократно увеличить высоту канала и, соответственно, перепад температуры.

Другой вариант атмосферной тепловой машины придумали американцы: в пустыне штата Аризона будет построена колоссальная открытая сверху стальная башня высотой 1 200 м и диаметром 400 м, в верхней части которой морская вода будет распыляться в искусственный туман. Испаряя капли морской воды, пустынный воздух будет охлаждаться и, соответственно, опускаться вниз, достигая скорости 22 м/с. Внизу башни будут находиться ветровые турбины. Обычный горизонтальный ветер, дующий в пустыне, тоже не будет теряться: особыми ветроуловителями он также будет нагнетаться к низу

башни. После отработки холодный воздух будет возвращаться в окружающую среду, а неиспарившиеся капли воды — собираться в отстойниках и использоваться повторно. Расчетная мощность такой станции составляет 2500 МВт, что значительно эффективнее современной ветровой и солнечной энергетики. В настоящее время (2013 г.) ведутся работы по согласованию проекта с властями и привлечению финансовых средств [85, 186].

2.70. СВЕЧЕНИЕ МЕТЕОРА

Метеоры до контакта с земной атмосферой представляют собой холодные, несамосветящиеся тела и только в атмосфере нашей планеты раскаляются до яркого свечения. Они, конечно же, не горят, так как на тех высотах, где происходит их свечение (около 100 км и более над земной поверхностью), воздух разрежен в миллионы раз (давление порядка 0,000001 атм). Отчего же, тем не менее, метеоры раскаляются?

Самой распространенной ошибкой при ответе на этот вопрос является указание на трение. Действительно, атмосфера, как бы она не была разрежена, оказывает движению метеора сопротивление. Но при этом забывают, что это трение является внутренним, при котором метеор просто увлекает за собой непосредственно прилегающий слой воздуха. Следствием внутреннего трения является изменение упорядоченного движения других слоев воздуха, но не его нагревание (т.е. не увеличение интенсивности хаотического движения молекул). И действительно, часть кинетической энергии метеора теряется на завихрение воздуха, непосредственно прилегающего к метеору.

Несостоятельным (вернее, неполным) является и другое объяснение: метеор нагревается потому, что потерянная им вследствие сопротивления воздуха кинетическая энергия превращается в теплоту. Однако, если бы утраченная кинетическая энергия метеора прямо превращалась в теплоту, то метеор нагревался бы целиком во всей его массе. Между тем наблюдения показывают, что нагревается только поверхностный слой метеора, внутри же он остается холодным.

На самом деле, кинетическая энергия метеора действительно переходит в тепловую, но не самого метеора, а воздуха, сжатого им впереди себя при движении сквозь атмосферу. Понять, почему воздух нагревается при сжатии, можно, рассматривая физическую картину на молекулярном уровне. Все дело в том, что молекулы воздуха, наталкивающиеся на метеор, который движется им навстречу, отскакивают назад со скоростью большей, нежели до столкновения, приобретая часть энергии метеора (точно так же, как увеличивается скорость теннисного мяча после встречного удара ракеткой). Возрастание же кинетической энергии молекул и есть повышение температуры.

Воздух сжимается метеором так стремительно, что теплота не успевает рассеиваться вовне, т. е. фактически происходит адиабатическое сжатие. Этот нагретый при сжатии воздух и передает свою теплоту поверхностному слою метеора. При этом сжатый метеором воздух все время сносится в сторону, а новые его порции снова сжимаются и так продолжается до тех пор, пока метеор полностью не разрушится от высокой температуры. Видимая на ночном небе яркая метеоритная линия — это фактически высокотемпературные остатки метеора. (Мы обычно говорим, что «упала звездочка» и загадываем желание.)

Не претендуя на точность, можно сделать прикидочный расчет температуры, до которой может нагреться воздух, сжимаемый вторгшимся в атмосферу метеором. Из уравнения адиабатического процесса (уравнения Пуассона) получаем

$$T_2 = \left(\frac{p_1}{p_2} \right)^{\frac{1-\gamma}{\gamma}} T_1, \quad (2.19)$$

где p_1 , T_1 — давление и температура воздуха до адиабатического сжатия; p_2 , T_2 — после сжатия; γ — показатель адиабаты (коэффициент Пуассона). Для воздуха $\gamma = 1,4$. Примем температуру T_1 воздуха в его верхних слоях равной 200 К. Прикидочно будем считать, что воздух при адиабатическом сжатии уплотняется от 0,000001 до 100 атм, т. е. отношение p_1/p_2 равно 10^{-8} . Подставляя эти значения в формулу,

получим

$$T_2 = (10^{-8})^{\frac{1-1,4}{1,4}} 200 \approx 39\,000 \text{ К.}$$

Итак, воздух, уплотняемый метеором, должен нагреться до нескольких десятков тысяч градусов. Экспериментальная оценка, основанная на измерении яркости метеоров, приводит к подобному же результату: от 10 000 до 30 000 градусов. Наблюдая метеор, мы, собственно говоря, видим не его самого — он обычно величиной с орех или горошину, — а раскаленный им воздух, объем которого в несколько тысяч раз больше.

Если же метеор достаточно крупный (метеорит), то он может и не сгореть полностью, и долететь до поверхности Земли. Что самое интересное (и которое подтверждает вышесказанное), хотя поверхность упавшего метеорита, как правило, оплавлена, в его глубине сохраняется температура космического пространства (ниже -200°C ; см. ст. 1.19 на с. 42). Как уже говорилось выше, связано это с тем, что за время падения (порядка нескольких секунд), тепло не успевает распространиться вглубь метеорита. Это может привести к парадоксальной ситуации: при падении в воду поверхностный слой только что раскаленного метеорита очень быстро охлаждается и он покрывается коркой льда. Это документально зарегистрированный факт: в 1860 г. в Индии, прочертив на небе огненный след, раскаленный метеорит упал в болото. Каково же было удивление подбежавших людей, когда на месте падения метеорита они обнаружили глыбу льда!

Сказанное можно распространить и к нагреванию пуль и артиллерийских снарядов после выстрела: они также уплотняют воздух впереди себя, нагревают его и нагреваются от него сами. Разница лишь в том, что скорость метеора в 50 раз больше. Что же касается различия давлений воздуха на большой высоте и близ земной поверхности, то, как видно из (2.19), величина нагревания зависит только от отношения начального и конечного давлений, а не от абсолютной их величины.

Кстати сказать, за счет метеоритов и космической пыли Земля ежедневно прибавляет в весе на 400 т [5, 70, 95].

2.71. ПИЩА — ИСТОЧНИК ЭНЕРГИИ

Пища — это топливо для людей и животных. Принимая пищу, мы фактически снабжаем свой организм запасом химической энергии (см. ст. 2.2 на с. 97). Эти запасы энергии, попадая в желудок, потоками крови переносятся к нуждающимся в ней органам, в том числе — мышцам. Мышцы часть получаемой химической энергии могут преобразовывать в механическую и совершать работу.

Все основные компоненты пищи синтезируются растениями — это углеводы и целлюлоза. Энергия химических связей, которая содержится в этих гигантских молекулах, была «почерпнута» растениями из энергии солнечного света в результате **фотосинтеза** (см. ст. 2.2 на с. 97). При фотосинтезе растения поглощают воду и углекислый газ. Из атомов этих веществ — углерода, кислорода и водорода — и некоторых других атомов образуются молекулы крахмала, сахаров, жиров и белков, которые, в свою очередь, соединяются в более сложные молекулярные комплексы — углеводы и целлюлозу. Животные (в том числе и люди), поедая растительную пищу, расщепляют содержащиеся в ней компоненты и перераспределяют их части так, чтобы образовывались нужные молекулы в нужном месте. Однако сами животные не могут синтезировать эти части, и все плотоядные животные (в том числе и человек), поедая мясную пищу, фактически потребляют уже расщепленные до этого компоненты растительной пищи.

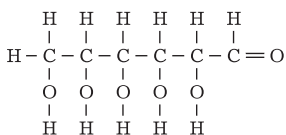


Рис. 2.35

Например, молекулы глюкозы (простейшего сахара), поддерживающие работу головного мозга и мышц, выглядят так, как показано на рис. 2.35. В процессе работы мышц молекулы глюкозы расщепляются пополам, затем от них

отщепляются шесть молекул воды H_2O , а атомы углерода, соединяясь с кислородом, поступающим из легких, образуют шесть молекул углекислого газа CO_2 . В этих процессах и высвобождается энергия химических связей атомов и молекул, необходимая для функционирования мышц.

Как видно из вышесказанного, процесс, посредством которого химическая энергия превращается в теплоту тела или работу мышц, — **горение** (см. ст. 2.2 на с. 97), но с существенным отличием — процесс идет гораздо медленнее и более хитрым путем, нежели простое горение в пламени. Соединяясь с кислородом (т. е. сжигаясь), топливо-пища превращается в углекислый газ и воду, выделяя при этом определенное количество энергии, причем независимо от характера промежуточных процессов.

Это позволяет измерить энергосодержание пищи простым ее сжиганием в лаборатории. Исследованиями установлено, что 1 г белков при сгорании (окислении) дает 4 ккал энергии, 1 г жиров — 9 ккал, а 1 г углеводов — 3,75 ккал. Как правило, определенная подобным образом калорийность пищевого продукта, предназначенного для продажи, приводится на его упаковке (табл. 2.8).

Химическая энергия, получаемая нами с пищей, идет, главным образом, на четыре главные цели:

- 1) поддержание температуры тела;
- 2) поддержание жизнедеятельности организма;
- 3) выполнение механической работы;
- 4) создание запасов химической энергии.

Минимальный жизненный уровень энергии при полной неподвижности человека, при котором поддерживается температура тела, обеспечивается работа сердца, легких, органов пищеварения и т. д. (т. е. для достижения первых двух из вышеназванных целей), называется **энергией основного обмена**. Приблизительно можно считать, что при основном обмене человек тратит 1 ккал ($\approx 4\,200$ Дж) энергии на 1 кг массы тела за 1 час.

В холодную погоду на нагревание тела требуется несколько больше энергии, а физическая деятельность требует еще больше; например, при ходьбе — 4,2 ккал на 1 кг массы тела за 1 час, при спокойной езде на велосипеде — 4,8 ккал, при беге — 9,3 ккал. С другой стороны, умственный труд требует небольших затрат [108, 155].

Таблица 2.8

**Энергетическая ценность 100 г
некоторых пищевых продуктов**

Продукты	Энергия, ккал	Содержание, г		
		белки	жиры	углеводы
Картофель, овощи, бобовые и др.				
Фасоль стручковая	332	21,4	1,6	61,6
Горох	332	23,8	1,4	60,2
Чечевица	329	25,0	1,0	59,5
Томат (паста)	110	1,8	0,5	25,1
Картофель	88	2,4	0,2	20,1
Хрен	86	2,7	0,4	18,7
Петрушка (корень)	83	3,3	0,4	18,3
Кукуруза	56	2,7	1,2	9,5
Сельдерей	42	1,4	0,3	8,8
Лук	42	1,3	0,1	9,4
Свекла свежая	42	1,6	0,1	9,6
Морковь	41	1,1	0,2	9,1
Тыква	34	1,3	0,2	2,8
Брюква	33	2,1	0,2	6,2
Цветная капуста	28	2,4	0,2	4,9
Дыня	26	0,7	0,2	6,0
Перец сладкий	26	1,2	0,2	5,3
Грибы свежие	26	2,6	0,4	3,8
Помидоры свежие	25	1,0	0,3	4,8
Капуста кочанная	25	1,8	0,4	4,2
Шпинат	24	2,2	0,3	3,9
Томатный сок	21	1,0	0,2	4,0
Редис	21	1,1	0,1	4,2
Огурцы свежие	15	0,8	0,1	3,0
Сахар, сладости				
Шоколад	530	4,9	4,9	60,5
Карамель	415	2,8	10,3	81,1
Сахар	383			99,5
Конфеты шоколадные	381			99,2
Мед пчелиный	301	0,2		77,9
Сироп фруктовый	278	0,3	0,3	71,2
Мороженое	230	3,9	15,4	20,2

Продолжение табл. 2.8

Продукты	Энергия, ккал	Содержание, г		
		белки	жиры	углеводы
Птица, рыба, дичь				
Гусь	366	16,0	33	0,2
Сардины в масле	335	21,1	27	1,0
Утка	230	17,6	17,1	0,4
Индейка	178	23,7	8,5	0,5
Кролик	161	21,2	7,9	
Карп	107	16,2	4,2	
Кура	101	20,4	1,4	0,6
Судак	82	18,4	0,3	0,6
Треска (филе)	74	16,5	0,4	
Мясо, мясные продукты				
Салами	502	25,0	44,0	
Свинина	306	15,5	26,7	
Жаркое	299	22,1	22,8	
Сосиски	220	14,1	16,7	2,1
Говядина	158	20,8	7,8	0,1
Телятина	101	21,8	3,0	0,5
Молоко, яйца и др.				
Сыр эментальский	377	26,8	27,8	2,4
Сыр плавленый	188	19,6	11,5	0,8
Яйца куриные	156	13,0	11,0	
Творог твердый	153	28,6	0,9	6,2
Сливки	141	3,2	12,6	4,0
Молоко	48	3,2	2,0	4,4
Мучные и крупяные изделия				
Печенье	454	7,2	14,8	73,7
Геркулес	388	13	7,5	67,8
Макаронные изделия	364	11,8	2,7	72,7
Мука мелкого помола	354	10,4	1,3	74,3
Рис	354	6,7	0,7	78,9
Манная крупа	351	9,7	0,7	75,6
Рогалики	292	8,6	1,1	61,2
Хлеб	248	7,7	1,1	51,5

Продолжение табл. 2.8

Продукты	Энергия, ккал	Содержание, г		
		белки	жиры	углеводы
Фрукты, ягоды				
Изюм	268	2,3	0,5	71,2
Чернослив сушеный	268	2,3	0,5	71,2
Инжир сушеный	266	4,0	1,2	68,4
Банан	88	1,2	0,2	23,0
Малина	66	1,3	1,3	14,2
Виноград	66	0,8	0,4	16,8
Яблоко	57	0,3	0,4	14,7
Курага	51	0,9	0,2	12,9
Персик	47	0,8	0,2	11,8
Апельсин	45	0,9	0,2	11,3
Крыжовник	42	1,0	0,4	9,8
Лимон	35	0,3		10,5
Жиры				
Сало свиное топленое	897	0,3	99,3	
Масло растительное	870		98,2	
Сало (шпик)	811	2,4	89,0	
Маргарин	742	0,5	83,7	
Масло сливочное	717	0,5	81,1	0,3
Орехи грецкие	648	15	64,4	15,6
Напитки				
Вино десертное	135	0,1	16,2	6,0
Вино нат. красное	67	0,2	9,5	0,2
Вино нат. белое	54	0,1	7,5	0,1
Пиво	36	0,2	3,4	3,0
Лимонад	21			5,3

2.72. ТЕПЛОВАЯ И МЕХАНИЧЕСКАЯ МОЩНОСТЬ ЧЕЛОВЕКА

Энергия, вырабатываемая живыми организмами, в первую очередь зависит от внешних условий (см. ст. 3.26 на с. 318). К примеру, в холодное время года средняя тепловая мощность (т. е. количество теплоты, выделяемое в единицу времени) человека больше, а в теплое — меньше. Теплота выделяется в результате «сгорания» пищи и запасов жира в организме чело-

века, поэтому зимой, особенно на холоде, человек ест больше, предпочитая калорийную жирную пищу.

Можно привести такую цифру: если раздетый человек стоит в ледяной воде, то выделяемая им мощность на согревание будет более 300 Вт! Это означает, что в каждую секунду организм выделяет более 300 Дж энергии. Удельная теплоемкость воды приблизительно равна 4 190 Дж/(кг·град), так что через каждые 14 с температура килограмма неподвижной воды повышалась бы на 1 градус. Однако ресурсы человека ограничены, поэтому рассмотренный опыт через некоторое время может закончиться весьма плачевно.

При охлаждении организма капилляры, по которым кровь поступает к коже, сокращаются, благодаря чему потеря тепла через кожу уменьшается. Когда температура конечностей человека становится слишком низкой, он начинает дрожать, т.к. усиление мышечной активности согревает руки и ноги.

Известно, что при нормальном режиме жизни человек вырабатывает за год в среднем чуть больше 1 000 МДж (1 ГДж) тепловой энергии, что приблизительно соответствует средней мощности в 35 Вт.

Однако при больших физических нагрузках выработка тепла в организме значительно увеличивается — до 1 500 Вт, и если бы тело каким-то образом не рассеивало это тепло, то его температура в жаркую погоду вполне могла бы повышаться градусов на 15 в час. Конечно, это очень скоро привело бы к роковым последствиям — перегрев тела сопровождается нарушениями функционирования организма и вызывает потерю сознания, иногда со смертельным исходом. Чтобы избежать этого, организм увеличивает поток тепла, переносимого кровью к поверхности кожи, и повышает потоотделение.

Но эти процессы также могут привести к нарушениям в организме. Увеличение притока крови к коже может уменьшить кровоснабжение мозга, что в свою очередь может привести к потере сознания, особенно в том случае, если человек резко поднимается. Повышенное потоотделение же вызывает обессоливание организма, сопровождающееся тошнотой, судорогами, нарушением кровообращения. Если с потом теряется примерно 2% общего количества воды в организме, то чело-

век испытывает сильную жажду. Потеря до 7% воды приводит к патологическому нарушению кровообращения и, возможно, даже смерти. Поэтому физическая работа в жару изматывает организм человека, хотя некоторые люди способны делать это каждый день без особого утомления — все зависит от тренированности и соблюдения правильного режима работы.

Очень небольшую часть вырабатываемой организмом энергии — менее 6–8% — человек может использовать в виде механической работы (через мышцы). Средняя механическая мощность обычного человека в течение 6–8 часов (т.е. в течение рабочего дня) близка к мощности карманного фонарика и равна нескольким ваттам. Спокойно едущий велосипедист развивает механическую мощность до 20 Вт, однако попробуйте непрерывно проехать 6–8 часов подряд! Очень сильные люди, например штангисты, при рывке штанги двумя руками могут развить механическую мощность до 1500–2000 Вт и более, но очень кратковременно, не более 2–3 с. Даже лошадь в среднем развивает мощность всего лишь в пределах 70–350 Вт (т.е. 0,1–0,5 л.с.) [44, 108, 140].

2.73. ЖИВОЙ ОРГАНИЗМ И ТЕПЛОВАЯ МАШИНА

Прочитав предыдущие статьи, у многих может сложиться предубеждение, что живые организмы (в том числе и человеческий) можно представлять в качестве тепловой машины. Однако никаких физических оснований для этого не существует. Это заблуждение основано на чисто поверхностном сходстве: как и в тепловой машине живой организм потребляет топливо (пищу), которое при соединении с кислородом выделяет теплоту. Отсюда неправильно заключают, что выделяемая организмом теплота является источником механической энергии так же, как в тепловой машине. Между тем такой взгляд на происхождение механической энергии живого организма находится в противоречии с термодинамикой — нельзя представлять себе дело так, что в организме сначала из пищи получается теплота, а затем эта теплота преобразуется в работу.

Действительно, термодинамика установила, что теплота может превращаться в работу только в том случае, когда она переходит от источника высокой температуры (от нагревателя) к источнику более низкой температуры (к холодильнику). При этом коэффициент полезного действия согласно **теореме Карно** равен отношению разности температур нагревателя T_1 и холодильника T_2 к температуре нагревателя T_1 :

$$\eta = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = \frac{T_1 - T_2}{T_1}. \quad (2.20)$$

Известно, что нормальная температура нашего тела $\approx 37^\circ\text{C} = 310\text{ K}$. Если представлять наш организм тепловой машиной, то эта температура, очевидно, должна являться или температурой холодильника, или температурой нагревателя. Значит, в организме должно быть еще что-то, имеющее другую температуру: или более высокую (нагреватель, тогда наше тело — холодильник), или более низкую (холодильник, тогда наше тело — нагреватель). Считая КПД нашего организма известным и равным 8% (см. предыдущую статью), найдем из (2.20) неизвестную температуру для двух случаев.

Если наше тело — холодильник, то температура нагревателя должна иметь значение $\approx 337\text{ K} = 64^\circ\text{C}$; если же тело — нагреватель, то температура холодильника будет равна $\approx 285\text{ K} = 12^\circ\text{C}$. Это означает ни много ни мало, что в нашем теле должен существовать участок или с температурой 12°C , или с температурой 64°C . Однако все современные данные говорят о том, что таких участков в человеческом организме нет. Более того, температурный «коридор» жизнедеятельности живых организмов очень узок и отклонение от него даже на несколько градусов ведет к смертельному исходу. Поэтому приходится отказаться от уподобления нашего организма тепловой машине.

Что же касается механической работы наших мышц, то она совершается за счет энергии химических связей или непосредственно, или после перевода в электрическую энергию; при этом выделяемая теплота является остатком механической или электрической работы [95].

2.74. МАССА ТЕЛА И ПОТРЕБЛЯЕМАЯ ЭНЕРГИЯ

Каждого, кто когда-нибудь держал у себя дома хомяка или видел его у знакомых, поражает его прожорливость, о которой так много сказано в наших сказках и поговорках. За день хомяк (да и любой мелкий грызун) может съесть столько, сколько весит сам. В то же время масса ежедневного рациона слона составляет всего лишь $1/10$ его массы, хотя по калорийности пища слона почти не отличается от пищи грызуна, так как оба питаются исключительно растениями. От чего же зависит количество пищи, необходимое живому существу для поддержания нормальной жизнедеятельности?

Как уже указывалось в предыдущих статьях, запасы энергии, которые мы получаем с продуктами питания, — это энергия химических связей молекул. Процессы, с помощью которых мы освобождаем эту энергию, называют **метаболизмом**. Метаболизм может быть **аэробным** — протекать только при непрерывном поступлении кислорода в организм, и **анаэробным**, который не требует притока кислорода. Аэробный метаболизм дает по сравнению с анаэробным больше энергии для организма из того же количества пищи и поэтому является преобладающим. Подсчитано, что потребление теплостокровным организмом 1 см^3 кислорода для аэробного метаболизма сопровождается выделением около 20 Дж тепловой энергии независимо от вида пищи.

У теплостокровных животных в состоянии покоя освобождающаяся при метаболизме теплота идет в основном на поддержание постоянной температуры тела в относительно холодной окружающей среде и функционирование организма (энергия основного обмена). Потребность в энергии и, соответственно, в кислороде увеличивается при переходе животного от состояния покоя к двигательной активности и при понижении температуры.

Можно сделать оценку (очень грубую!) количества потребляемой теплостокровными животными кислорода в зависимости от массы их тела. Пусть 1 кг массы животного в единицу времени потребляет кислород объемом $\Delta V\text{ см}^3$ и в результа-

те метаболизма, соответственно, выделяется $\Delta q = 20\Delta V$ Дж тепла. Тогда количество теплоты, освобождающееся в единицу времени во всей массе m животного, составит

$$\frac{\Delta Q_1}{\Delta t} = \Delta q m = 20m\Delta V.$$

Пусть для простоты животное имеет форму шара радиусом R (не пугайтесь, это всего лишь физическое приближение для грубой оценки). Тогда

$$\frac{\Delta Q_1}{\Delta t} = 20m\Delta V = 20\rho V\Delta V = 20\rho \frac{4}{3}\pi R^3 \Delta V = \frac{80}{3}\pi\rho R^3 \Delta V,$$

где ρ — плотность тела животного.

С другой стороны, по закону Фурье организм в единицу времени отдает в окружающую среду количество теплоты, равное

$$\frac{\Delta Q_2}{\Delta t} = \kappa \frac{\Delta T}{\Delta x} S,$$

где κ — теплопроводность воздуха в непосредственной близости у тела; $\Delta T/\Delta x$ — градиент температуры; $S = 4\pi R^2$ — площадь поверхности тела. Можно считать, что при изменении размеров нашего воображаемого шарообразного «животного» величины κ и $\Delta T/\Delta x$ остаются постоянными: $\kappa\Delta T/\Delta x = k = \text{const.}$ Тогда

$$\frac{\Delta Q_2}{\Delta t} = 4\pi k R^2.$$

Так как температура тела при равновесии с окружающей средой остается постоянной, то в состоянии покоя количество тепловой энергии, образующееся в организме за счет метаболических процессов, должно равняться количеству теплоты, перешедшему от животного в окружающую среду:

$$\frac{\Delta Q_1}{\Delta t} = \frac{\Delta Q_2}{\Delta t} \quad \text{или} \quad \frac{80}{3}\pi\rho R^3 \Delta V = 4\pi k R^2,$$

откуда

$$\Delta V = \frac{3k}{20} \cdot \frac{1}{\rho R}.$$

Так как $m = \rho V = \rho(4/3)\pi R^3$, то, выражая R обратно через m , имеем

$$\Delta V = \frac{3k}{20} \sqrt[3]{\frac{4\pi}{3\rho^2 m}} \quad \text{или} \quad \Delta V \sim \sqrt[3]{\frac{1}{m}}. \quad (2.21)$$

Таким образом, количество кислорода, потребляемое 1 кг массы животного, обратно пропорционально массе m всего организма. Хотя наша оценка была достаточно грубой, она правильно передает тенденцию в потреблении кислорода животными различных масс и позволяет объяснить прожорливость хомяка и других мелких животных.

Действительно, из (2.21) следует, что единице массы хомяка требуется кислорода гораздо больше, чем такой же единице массы слона. А так как количество потребляемого кислорода прямо пропорционально количеству окисленной им пищи, то количество пищи, необходимое хомяку в расчете на единицу массы тела, должно быть гораздо больше соответствующей величины для слона. Отсюда же, кстати сказать, вытекает физиологический принцип о том, что рост и масса тела должны соответствовать друг другу (очень злободневный вопрос для современного человека; см. следующую статью).

Вы можете возразить следующим образом: раз с позиций пропитания выгоднее иметь бóльшую массу, то почему же эволюция живой природы не привела к преимущественному господству крупных животных? Однако не надо забывать, что объем потребляемой пищи — это не единственный критерий выживаемости вида. Даже если взять в качестве критерия только пищу, то в абсолютном исчислении (т. е. на всю массу организма) крупные животные все равно потребляют намного больше еды, чем мелкие животные. Так что господства крупных видов живого по идее не должно быть.

Кроме того, более существенным является механический фактор: у любого животного по мере увеличения его размеров кости и мышцы конечностей подвергаются все большей нагрузке. В частности, у четвероногих каждая кость конечности обязана выносить тяжесть по крайней мере $1/4$ массы тела и, кроме того, необходим еще немалый запас прочности

для передвижения. Прочность кости прямо пропорциональна площади ее поперечного разреза (это двумерная величина), а масса тела пропорциональна его объему (трехмерная величина). Это приводит к тому, что с увеличением размеров животных площадь разреза кости должна возрастать быстрее, чем масса тела. Другим ограничителем является предел мускульной силы. Всякое животное должно переходить от лежачего состояния к стоячему, и чем оно массивнее, тем крупнее и сильнее должны быть его мускулы. Необходимо учитывать и потребность к передвижению. При ходьбе сила тяжести тела прилагается под углом к костям конечностей, а не вертикально, как в состоянии покоя. Поэтому усилие, действующее на разлом, при движении много больше. Все эти аргументы привели исследователей к выводу, что на Земле в принципе не может существовать сухопутное четвероногое животное массой более 100 т (другое дело — мировой океан, где сила тяжести ослаблена силой Архимеда; но там включаются еще другие факторы, ослабляющие «натиск крупных»).

До сих пор крупнейшим животным считается ископаемый ящер брахиозавр, масса которого, по-видимому, достигала 80 т. Из млекопитающих, известных науке, самым массивным был, очевидно, белуджитерий — ископаемый безрогий носорог, весивший примерно 30 т. Масса современных слонов редко превышает 10 т [11, 12, 24, 130, 155, 173].

2.75. КАК ТРАТИТЬ СВОЮ ЭНЕРГИЮ!

В последнее время в научной медицинской литературе все чаще употребляется термин «метаболический синдром». Фактически это комплекс заболеваний, при которых избыточная масса тела сочетается с повышенным артериальным давлением и сахарным диабетом. Статистика показывает, что число людей с избыточной массой за последние 50 лет увеличилось примерно в 10 раз. Это привело к тому, что повышенное кровяное давление обуславливает около 9,4 млн ежегодных случаев смерти (16,5% всех смертей) в результате инсультов и ишемической болезни сердца. Диабетом в мире больны 347 млн человек. Он повышает риск развития болезней сердца и ин-

сульта, увеличивает вероятность язв на ногах и ампутации конечностей, частая причина слепоты и почечной недостаточности. Почему метаболический синдром так резко проявился в последние годы?

Потоки энергии в эволюции живой природы всегда рассматривались как одни из наиболее важных. Как уже указывалось ранее, энергия, получаемая нами с пищей (см. ст. 2.71) и освобождаемая процессами метаболизма (см. ст. 2.74), расходуется на достижение четырех главных целей:

- 1) поддержание температуры тела;
- 2) поддержание жизнедеятельности организма;
- 3) выполнение механической работы;
- 4) создание запасов энергии.

Вроде бы, зачем нужно создавать запасы энергии? Можно же потреблять необходимое количество пищи, чтобы выполнять три основные первые функции без создания всяких энергетических запасов. Однако живые существа так устроены, что они не могут все время непрерывно по необходимости потреблять пищу (как автомобиль по необходимости потребляет бензин). Во-первых, для переработки пищи нужно время, а также вся та же энергия (для прожевывания, проталкивания пищи по пищеварительной системе, химического расщепления и т. д.). Во-вторых, потребность в энергии может возникнуть самым непредсказуемым образом, например, в случае внезапной опасности, когда надо противостоять ей или убежать. В-третьих, пищи может и не оказаться в нужное время — ее еще надо добыть. Поэтому способность запасать энергию впрок всегда была особым преимуществом и определяла ход эволюции. Развитие живого на Земле (в том числе — и человека) в условиях лимита питания привело к наиболее эффективному с энергетической точки зрения циклическому режиму жизни:

- поиск и добыча пищи;
- прием пищи;
- переваривание пищи и создание в организме запасов энергии.

Как же происходит расходование созданных запасов? Очевидно, что естественные (можно сказать, автоматические) за-

траты энергии на поддержание температуры тела и деятельность органов — энергия основного обмена (см. ст. 2.74) — протекают всегда и в любое время.

Уровень этих затрат сильно зависит от внешних условий и состояния организма (см. ст. 2.72). Это — существенно необходимые затраты (без них организм просто погибнет), поэтому в любой ситуации эти потоки энергии имеют первоочередной приоритет.

А как же другие виды деятельности (новый поиск и добыча пищи, продолжение рода, физическая деятельность)? А очень просто: нужна пища — хищник догоняет ее; нужна самка для продолжения рода — побеждает соперника; преследует враг — убегает или вступает с ним в борьбу. Но в любом случае — это сигнал организму о начале расходов энергии для того, чтобы произвести некие действия. Короче говоря, **озабоченность организма чем бы то ни было воспринимается как дефицит энергии**, которую необходимо выделять из запасов.

Все вышесказанное справедливо и для человека. В норме человек принимает пищу три раза в день, делая запасы для предстоящей физической и умственной деятельности между ними. При этом в результате эволюции у человека сформировались **две системы хранения энергии**:

1) **оперативная** — позволяющая хранить небольшие, но удобные в использовании запасы углеводов в клетках печени и мышц, в основном — в виде глюкозы и других полисахаридов. Глюкоза — один из основных источников оперативной энергии. За счет оперативных запасов обеспечиваются все скоростные процессы организма: деятельность нервных клеток (в том числе — головного мозга), фазы сокращения сердечной мышцы, внезапная физическая активность (например, когда нужно убежать от опасности) и т. д.;

2) **долговременная** в виде жировых отложений (клеток жировой ткани), в которые можно поместить практически неограниченное количество энергии, правда доступное не сразу же. Жир вначале расщепляется на глицерин и жирные кислоты, а на это требуется время. Далее глицерин усваивается подобно углеводам, а жирные кислоты отдают энергию за счет так называемого *p*-окисления. Жир был и остается основным

источником энергии при тяжелом физическом труде с минимальной долей интеллектуальной нагрузки.

Сотни миллионов лет дефицит энергии был обычным состоянием любого организма в любой окружающей среде. Поскольку труд человека вплоть до начала прошлого столетия был преимущественно физическим, а питание лимитированным, то освобождающаяся из пищи энергия почти целиком расходовалась на поддержание жизни организма и физическую работу. Та небольшая часть ее, которая оставалась впрок на всякий случай, легко размещалась в долговременной системе хранения энергии и беспрепятственно тратилась при необходимости. Труд, каким бы тяжелым он ни был, не вызывал стресса, потому что это был обычный образ жизни для человека, привлекаемого с детства к посильной работе. Потоки жиров, белков и углеводов в ходе эволюции оптимизировались в соответствии с образом жизни, а механизмы регуляции эффективно поддерживали существовавшее равновесие, обеспечивая максимальный физиологический комфорт.

Современная развитая техносфера позволила человечеству не только массово выживать без тяжелого физического труда, но и потреблять достаточное количество пищи. На фоне утраты необходимости тяжело физически работать возросшая умственная деятельность привела к резкому повышению относительной (по сравнению с жирами) потребности в углеводах (т.е. в глюкозе). Однако их хранилище — это оперативный резерв, где запасы энергии ничтожны по сравнению с запасами в жирах. Соответственно, у организма возникает желание перекусить, причем хочется сладкого (т.е. углеводов) — из-за этого в организм поступает преимущественно сахароза для дальнейшей переработки в глюкозу. Вроде бы, потребность в энергии оказывается удовлетворенной, однако в ходе эволюции не выработался (за ненадобностью!) механизм, способный вовремя ограничить прием пищи (ее всегда не хватало). Поэтому у современного человека всегда образуется некий избыток энергии в виде глюкозы. Частично этот избыток заполняют клетки печени и мышц в виде оперативных запасов. Однако, как уже было сказано выше, так может быть запасено небольшое количество энергии. Если же после заполнения клеток

печени и мышц уровень глюкозы в крови все еще выше нормы, то включаются механизмы предотвращения дальнейшего поступления глюкозы в клетки и она начинает превращаться в жир, откладываясь в долговременной системе хранения энергии. Примерно по такой схеме возникает основная болезнь цивилизации — ожирение (и все другие сопутствующие ему заболевания).

Все вышесказанное усугубляется еще одним аспектом современной социальной жизни — она сделала членов общества практически полностью зависимыми друг от друга. В человеческом обществе понятие «сделать» постепенно вытесняется конструкцией «иметь сделанным» (например, если у кого-то испачкался костюм, то он отнесет его в химчистку, где его почистят другие). Такой социальный образ жизни полностью основан на денежных отношениях, поэтому человек всегда озабочен — ему не хватает денег. Эта озабоченность многократно умножается сложными социальными отношениями и предлагаемыми цивилизацией потенциальными возможностями для реализации своих возможностей. И хочется все эти возможности претворить как можно быстрее и как можно в большем объеме! Все это приводит к целому комплексу озабоченностей — стрессам (другая отличительная болезнь-черта развитой цивилизации). Но настроенный в прежнюю эпоху организм интерпретирует любую озабоченность как потребность в дополнительной энергии! Он-то по-прежнему думает, что такая озабоченность приведет его к физической нагрузке. И организм готов выделить жир, чтобы достичь цели. Но раз будут затраты жиров, значит, их надо восполнять! Поэтому организм, не делая никакой разницы, будет настойчиво сберегать жир и для физической работы, и для достижения материальных благ, и для мести обидчику, и для развлечений и т. д. Как вы, наверное, понимаете, никакие диеты здесь не помогут: содержание жира в теле должно и будет неуклонно расти.

Взамен естественного физического труда человечество в новых бытовых условиях прибегает к организации искусственной бесполезной траты энергии в виде изнурительных физических упражнений. Однако умственная активность и борьба со стрессом при этом оказываются во все более печальном

состоянии с точки зрения энергетического обеспечения. Действительно, сформировавшийся тысячелетиями обмен веществ рассчитан на физическую нагрузку в течение всего дня при минимальной умственной активности, поэтому двухчасовые тренировки оказываются в большей мере потребителями не долговременных запасов энергии в виде жиров, а оперативных в виде углеводов. Вообще говоря, при сегодняшнем уровне стрессов тренировки должны были бы продолжаться круглосуточно. Сказанное подтверждается тем, что у активных спортсменов, нагружающих себя физически в продолжении всего рабочего дня, проблем с ожирением и сопутствующими ему болезнями (например, диабетом) не бывает. В лабораториях также не удастся смоделировать эти болезни у хищников, целыми днями находящихся в постоянной физической активности по поиску пищи.

Читателю может показаться, что приведенные рассуждения должны наводить на мрачные мысли. Это не так. Во-первых, все, что сейчас происходит, закономерно с точки зрения эволюции. Во-вторых, сегодняшний уровень естественных наук и техническая база позволяют создавать пищевые продукты и режим питания, соответствующие потребностям современного человека со всеми его физиологическими изменениями. Ну и в-третьих, когда человек в хорошем настроении и наслаждается жизнью, отдавая себе отчет в том, что у него есть даже гораздо больше, чем ему реально надо в этой жизни, когда он никому не завидует, не требует к себе повышенного внимания, а напротив, настроен бескорыстно помогать другим, автоматически исчезнет большинство стрессов, изнуряющих организм. Так что, смейтесь, господа, смейтесь над своими проблемами! [27]

РЕАЛЬНЫЕ ГАЗЫ. ФАЗОВЫЕ ПЕРЕХОДЫ

3.1. СКОЛЬКО АГРЕГАТНЫХ СОСТОЯНИЙ ВЕЩЕСТВА БЫВАЕТ?

Агрегатными называют состояния одного и того же вещества в различных интервалах температур и давлений. Обычно люди слышат про **газообразное, жидкое и твердое** агрегатные состояния, переходы между которыми сопровождаются скачкообразными изменениями свободной энергии, энтропии, плотности и других физических характеристик вещества.

Разделение на газообразное, жидкое и твердое состояния в основном связано с нашим непосредственным восприятием окружающего мира с помощью органов чувств. Физики подходят к этому более строго и рассматривают агрегатные состояния как разновидности более общих **фазовых состояний**. По определению, **фаза вещества** — это однородная устойчивая его область с одинаковыми физическими свойствами, ограниченная от других областей границей раздела. Даже находясь в одном и том же агрегатном состоянии, вещество может иметь разные фазовые состояния. Например, лед как твердое тело имеет шесть фазовых модификаций (см. ст. 5.25 на с. 504).

Если все-таки главным критерием для определения состояния вещества оставить только различие его свойств при разных температурах и давлениях, то список агрегатных состояний можно существенно расширить — на сегодняшний день их известно не меньше пятнадцати: **кристаллическое твердое тело, аморфное твердое тело, жидкость, газ, плазма,**

сверхтекучее тело, сверхтвердое тело, тело с вырожденным веществом, нейтрониум, тело с сильно симметричным веществом, тело со слабо симметричным веществом, кварк-глюонная плазма, конденсат Бозе-Эйнштейна, фермионный конденсат и странное вещество.

С увеличением температуры газы превращаются в **плазму**, которую принято считать четвертым агрегатным состоянием. В плазме доля нейтральных молекул мала, основную же часть составляют ионы (т. е. молекулы, потерявшие один или несколько внешних электронов) и свободные электроны. В состоянии плазмы находится газ в светящихся люминесцентных трубках реклам и трубках дневного света, газ в верхних слоях атмосферы Земли, межзвездная среда. По большому счету, наблюдаемый нами в жизни обычный огонь также представляется плазмой. В состоянии **высокотемпературной плазмы** находятся вещества в недрах звезд (в том числе — и Солнца). В настоящее время изучение высокотемпературной плазмы в научных лабораториях является приоритетной в связи с проблемой осуществления управляемого термоядерного синтеза (см. ст. 2.1 на с. 95).

При значительном увеличении давления вещество может перейти в пятое — **нейтронное** — состояние (**нейтрониум**). Оно возникает в результате «вдавливания» атомных электронов в ядра и последующего «слияния» этих электронов с находящимися там протонами. Так как в результате подобного «слияния» образуются нейтроны, описанный процесс называют **нейтронизацией** вещества. В земных условиях она никогда не наблюдалась. Однако в 1967 г. ученым удалось открыть космические объекты, имеющие плотность до 10^{18} кг/м³, — вещество в них неминуемо должно было подвергнуться нейтронизации. Эти объекты получили название **нейтронных звезд**. Они совсем не похожи на наше Солнце и представляют собой своеобразные гигантские атомные ядра.

В 1995 г. американские физики **Э. Корнелл**, **К. Уайман** и немецкий физик **В. Кеттерле** получили шестое агрегатное состояние вещества — **бозе-эйнштейновский конденсат** (или просто «бэк»). Это состояние возникает при охлаждении вещества до чрезвычайно низких температур (как пра-

вило, до температуры чуть выше абсолютного нуля). Теоретическая возможность существования бэк была предсказана **А. Эйнштейном** еще в 1925 г., однако получить его экспериментально удалось лишь в 1995 г.

В 2004 г. международной группой физиков открыто седьмое агрегатное состояние вещества — **фермионный конденсат**. Открытие этого агрегатного состояния, как и других приведенных выше «диких» состояний, является передним краем современной физики [9, 62, 148, 168, 169].

3.2. ИДЕАЛЬНЫЙ ГАЗ И РЕАЛЬНОСТЬ

Идеальный газ является **физической идеализацией**, т. е. воображаемым газом, в котором пренебрегают размерами молекул и их взаимодействием между собой. Как вы, наверное, понимаете, в реальности молекулы всегда имеют вполне конкретные конечные размеры и взаимодействие между ними, пусть даже очень малое, всегда существует. Тем не менее, идеальный газ с разумной точностью отражает поведение многих реальных газов в широком диапазоне внешних условий. Из самого определения идеальности газа вытекает, какими должны быть эти условия: во-первых, объем, в котором содержится газ, должен быть намного больше суммарного собственного объема молекул; во-вторых, расстояния между молекулами должны быть достаточно большими, что означает малую плотность газов и, соответственно, низкое давление. К нашему счастью, для большинства реальных широко распространенных газов атмосферное давление Земли является «низким», поэтому мы можем смело описывать их поведение с помощью модели идеального газа.

Уравнением состояния идеального газа является известное вам **уравнение Клапейрона—Менделеева**:

$$pV = \nu RT. \quad (3.1)$$

Оно имеет простой вид, но, конечно, не является универсальным — очевидно, что этому уравнению не подчиняется ни одно вещество в жидком и твердом состоянии. Даже газы при сильном сжатии проявляют заметные отклонения от это-

го уравнения. Это означает, что общим объемом молекул не всегда можно пренебречь по сравнению с объемом сосуда. Ясно также, что между молекулами всегда существует взаимодействие, которое при достаточно низких температурах может связать молекулы, приводя к образованию жидкого и твердого состояний. Эти соображения наводят на мысль, что одним из способов получения более точного уравнения состояния является учет конечного объема реальных молекул и сил взаимодействия между ними.

В ходе развития физики было предложено много уравнений состояния, учитывающих вышесказанное (больше 100!). Некоторые из них отличаются высокой точностью только в ограниченной области изменения внешних условий, другие применимы только к специальным классам веществ. Имеются уравнения, которые применимы и к широкому классу веществ, и к сильно различающимся внешним условиям, но они не очень точны. Наиболее привлекательным путем составления таких уравнений является модификация уравнения Клапейрона—Менделеева.

Для учета собственного объема молекул достаточно принять, что свободный объем, доступный для движения молекул, меньше полного объема газа V на некоторую величину νb , связанную с количеством молекул ν и их размерами b . Таким образом, мы должны в уравнении (3.1) заменить V на $V - \nu b$:

$$p(V - \nu b) = \nu RT. \quad (3.2)$$

Учесть силы притяжения между молекулами несколько труднее, но возможно. Молекула, находящаяся в центре объема газа, т. е. далеко от стенок сосуда, будет «видеть» одинаковое число молекул во всех направлениях. Следовательно, силы притяжения одинаковы во всех направлениях и уравновешивают друг друга. Когда же молекула приближается к стенке сосуда, то она «видит» больше молекул позади себя, чем перед собой. В результате на молекулу действует результирующая сила, направленная от стенки сосуда к его центру, в следствие чего движение молекулы несколько сдерживается и она ударяется о стенку сосуда менее сильно, чем в случае отсутствия

сил притяжения. Это означает, что давление, создаваемое притягивающимися молекулами, оказывается несколько меньше, чем давление, создаваемое теми же молекулами в отсутствие притяжения.

Очевидно, что чем больше количество молекул ΔN_1 в поверхностном слое у стенок сосуда и чем больше количество молекул ΔN_2 , взаимодействующих с «поверхностными» молекулами в глубине сосуда, тем больше и величина суммарной сдерживающей силы, действующей на поверхностный слой в целом: $F \sim \Delta N_1 \Delta N_2$. С одной стороны, ΔN_1 и ΔN_2 пропорциональны общему их количеству N в сосуде, т. е. количеству газа ν . С другой стороны, они пропорциональны концентрации n , которая, в свою очередь (по определению), обратно пропорционально объему V . Значит, уменьшение давления на стенки сосуда пропорционально ν^2/V^2 . Действительно, чем больше объем газа при данном его количестве ν и чем меньше молекул при данном объеме газа V , тем дальше молекулы расположены друг от друга и тем менее существенно взаимодействие между ними; при достаточно больших объемах и малых количествах вещества взаимодействиями молекул можно полностью пренебречь и пользоваться моделью идеального газа. Таким образом, учет межмолекулярного взаимодействия приводит к соотношению

$$p = p_{\text{ид}} - a \frac{\nu^2}{V^2}, \quad (3.3)$$

где p — действительное давление газа на стенки сосуда (именно это давление покажет манометр); $p_{\text{ид}}$ — давление, создаваемое идеальным газом непритягивающихся молекул; a — коэффициент пропорциональности, характеризующий величину сил притяжения между молекулами данного вещества. Давление $a\nu^2/V^2$, обусловленное притяжением молекул, называют **внутренним**.

Теперь остается «подправить» уравнение (3.2), подставив в него вместо p значение $p_{\text{ид}}$, полученное из (3.3):

$$\left(p + a \frac{\nu^2}{V^2}\right) (V - \nu b) = \nu RT. \quad (3.4)$$

Это уравнение впервые было предложено голландским физиком **Д. Ван-дер-Ваальсом** (1837–1923) в 1873 г., за что в 1910 г. получил Нобелевскую премию. Коэффициенты a и b называются **постоянными Ван-дер-Ваальса**; они индивидуальны для каждого вещества и определяются из опыта.

Если изотермы идеального газа на pV -диаграмме представляют собой обычные гиперболы, то изотермы ван-дер-ваальсовского газа имеют достаточно специфичный вид (рис. 3.1). Изотермы, отвечающие температурам выше некоторой $T_{кр}$ (критической; см. ст. 3.6 на с. 283), не имеют минимумов и перегибов и выглядят подобно изотермам идеального газа. При температурах же ниже $T_{кр}$ изотермы имеют максимумы и минимумы, а при еще более низких температурах существует область, в которой давление становится отрицательным. Эти горбы и провалы, а также область отрицательных давлений не соответствуют физической реальности, а просто отражают недостатки уравнения Ван-дер-Ваальса. На самом деле в реальных газах при температурах ниже $T_{кр}$ и достаточно высоком давлении силы притяжения между молекулами приводят к конденсации газа в жидкое или твердое состояние, осуществляемая при постоянном давлении (см. ст. 3.5 на с. 278).

Хотя и уравнение Ван-дер-Ваальса полностью не удовлетворяет экспериментальным данным, оно является более точным по сравнению с уравнением Клапейрона—Менделеева. Кроме этого, уравнение Ван-дер-Ваальса позволяет получить очень важное следствие. А именно, если уменьшать объем газа V под действием внешнего давления p , то внутреннее

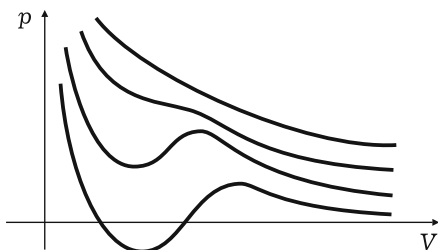


Рис. 3.1

давление $a\nu^2/V^2$ будет возрастать гораздо быстрее внешне-го. В какой-то момент внутренне давление превысит внешнее и молекулы сцепятся друг с другом, так что им уже больше не нужно будет внешнего давления (сосуда), чтобы оставаться вместе — газ превращается в жидкость. Таким образом, между газообразным и жидким состояниями нет существенной разницы, поскольку все различие сводится к различным расстояниям между молекулами в двух состояниях; другое дело — твердые тела, в которых возникают понятия симметрии и дальнего порядка.

Поучительно сравнить результаты, получаемые с помощью уравнений (3.1), (3.2) и (3.4), с экспериментальными данными. Для этого рассмотрим 1 моль водяного пара ($a = 0,554 \text{ Дж}\cdot\text{м}^3/\text{моль}^2$, $b = 3\cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{моль}$) объемом $1\,384 \text{ см}^3$ при температуре 500 К , для которого экспериментально измеренное значение давления равно $26,07 \text{ атм}$. Рассчитанные же по формулам (3.1), (3.2) и (3.4) давления равны соответственно $29,64 \text{ атм}$, $30,31 \text{ атм}$ и $27,46 \text{ атм}$. Видно, что уравнение Клапейрона—Менделеева (3.1) дает завышенное примерно на 14% значение давления, уравнение (3.2) дает еще большую ошибку — около 16% , а уравнение Ван-дер-Ваальса (3.4) завышает давление всего лишь на 5% .

Интересно, что уравнение (3.2) дает бóльшую ошибку, чем уравнение идеального газа (3.1), хотя оно получено внесением поправки как раз с целью уменьшения погрешностей. Причина, однако, в том, что поправка на конечный объем молекул увеличивает давление, а член, учитывающий притяжение, уменьшает его, и, таким образом, эти поправки частично компенсируют друг друга (что и происходит в уравнении Ван-дер-Ваальса). В уравнении (3.2) учитывается только увеличение давления за счет уменьшения свободного объема, поэтому закон идеального газа (3.1), в котором не учитывается ни та, ни другая поправка, дает более близкое к действительному значение давления. Однако не надо думать, что поправка на уменьшение свободного объема вовсе не нужна: при очень больших плотностях эта поправка становится намного более существенной и уравнение (3.2) оказывается более точным, чем уравнение идеального газа [47, 142, 203].

3.3. ЗАКОН ДАЛЬТОНА ДЛЯ РЕАЛЬНЫХ ГАЗОВ

Закон Дальтона звучит следующим образом: давление смеси химически не взаимодействующих идеальных газов равно сумме их парциальных давлений (см. ст. 1.10 на с. 24). Закон был установлен в 1801 г. английским химиком и физиком **Дж. Дальтоном** (1766–1844). Он строго выполняется для идеальных газов. Выполняется ли закон Дальтона для реальных газов?

Как известно, реальные газы с большой точностью описываются **уравнением Ван-дер-Ваальса** (см. предыдущую статью), из которого получаем

$$p = \frac{\nu RT}{V - \nu b} - \frac{\nu^2 a}{V^2}.$$

Теоретическое нахождение давления смеси реальных газов является трудной математической задачей, поэтому рассмотрим частный случай смеси **неплотных реальных газов**, для которых выполняется условие $\nu b \ll V$ (это означает, что собственным объемом молекул можно пренебречь, а притяжением молекул — нет). Тогда, ввиду малости b , можно записать разложение

$$p = \frac{\nu RT}{V} + \frac{\nu^2 (bRT - a)}{V^2}.$$

Видно, что давление реального газа отличается от давления идеального на величину, пропорциональную $bRT - a$, которая может быть как больше, так и меньше нуля (все определяется тем, какие силы между молекулами преобладают — отталкивания или притяжения).

Возьмем еще более частный случай: допустим, что мы смешиваем два неплотных реальных газа, у которых константы a и b идентичны (например, изотопы). Тогда

$$p_1 = \frac{\nu_1 RT}{V} + \frac{\nu_1^2 (bRT - a)}{V^2},$$

$$p_2 = \frac{\nu_2 RT}{V} + \frac{\nu_2^2 (bRT - a)}{V^2},$$

$$p_{\text{см}} = \frac{(\nu_1 + \nu_2)RT}{V} + \frac{(\nu_1 + \nu_2)^2(bRT - a)}{V^2},$$

где p_1 , p_2 , $p_{\text{см}}$ — давление первого газа, второго газа и их смеси соответственно. Далее легко определить отклонение от закона Дальтона, получив разницу между $p_{\text{см}}$ и $p_1 + p_2$:

$$\Delta p = p_{\text{см}} - (p_1 + p_2) = \frac{2\nu_1\nu_2(bRT - a)}{V^2}.$$

Таким образом, при $T > a/(bR)$ давление смеси газов будет больше суммы парциальных давлений, при $T < a/(bR)$ давление смеси газов будет меньше суммы парциальных давлений, а при $T = a/(bR)$ закон Дальтона будет выполняться [126, 144].

3.4. ПУЗЫРЕК НА ДНЕ ОКЕАНА

Представьте, что у дна океана на глубине 8 км появился пузырек воздуха. Под действием большого давления воздух в пузырьке очень сильно сжат и поэтому имеет большую плотность. Как вы думаете, сможет ли он всплыть на поверхность воды?

Пузырек воздуха на глубине 8000 м должен находиться под давлением около 800 атм, потому что каждые 10 м водяного столба приблизительно соответствуют (по весу) одной атмосфере (см. ст.ст. 1.22, 1.27, 4.13). Как известно, плотность газа прямо пропорциональна давлению:

$$\rho = \frac{\mu p}{RT}. \quad (3.5)$$

Применяя эту формулу к данному случаю и считая $T = 273$ К, можно вычислить, что плотность воздуха под давлением 800 атм равна

$$\rho = \frac{\mu p}{RT} = \frac{0,029 \cdot 800 \cdot 10^5}{8,31 \cdot 273} \approx 1023 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3},$$

что больше плотности воды ($\rho_{\text{в}} = 1000 \text{ кг/м}^3$). Следовательно, пузырек не может всплыть на поверхность.

Однако вывод наш основан на неправильном допущении, что формула (3.5) применима к таким высоким давлениям, как 800 атм. При таких давлениях необходимо уже пользоваться уравнением Ван-дер-Ваальса (см. формулу (3.4) на с. 273), из которого получаем, что плотность и давление связаны соотношением

$$\left(p + \frac{\rho^2}{\mu^2}a\right) \left(1 - \frac{\rho}{\mu}b\right) = \frac{\rho}{\mu}RT, \quad (3.6)$$

где a и b — постоянные Ван-дер-Ваальса, для воздуха равные $a = 0,142 \text{ Дж}\cdot\text{м}^3/\text{моль}^2$, $b = 3,9 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{моль}$. Подставляя в (3.6) числовые значения, получаем кубическое уравнение относительно неизвестной ρ . Решением этого уравнения является значение $\rho \approx 500 \text{ кг/м}^3$ — это значение в 2 раза меньше плотности воды, поэтому пузырек обязательно всплывет.

Самим глубоким местом Мирового океана считается Марианский желоб с глубиной 11,5 км. Даже если бы пузырек воздуха возник на дне Марианского желоба, его плотность была бы всего 550 кг/м^3 [95].

3.5. ГАЗ И ПАР

Газообразное состояние вещества в условиях, когда одновременно возможно существование жидкого состояния этого же вещества, обычно называется **пáром**. Никакой принципиальной разницы между газом и пáром нет. Однако **Я. Б. Гельмонт**, введший в науку термин «газ» (см. ст. 1.10 на с. 24), разделял вещества на те, которые имеют газообразный вид при обычной температуре, и те, которые наподобие водяного пара становятся газами лишь при достаточном нагреве. Последние вещества он назвал «пáрами», и мы до сих пор говорим «водяной пар», а не «водяной газ». Кстати, в настоящее время в разговорной речи под словом «пар» почти всегда понимают именно водяной пар.

К понятию пара можно прийти из следующего опыта. Возьмем цилиндр с газом в состоянии, при котором его еще можно считать идеальным, и с помощью поршня постепенно будем уменьшать его объем, все время поддерживая температуру постоянной, т. е. будем осуществлять **изотермическое**

сжатие. Если температуру газа взять достаточно высокой, то его изотерма на pV -диаграмме будет практически совпадать с изотермой идеального газа (рис. 3.2, изотерма 1). Однако при достаточно низких температурах ситуация меняется. В процессе изотермического сжатия, начиная с некоторого объема V_{Γ} , давление газа стабилизируется и не меняется вплоть до некоторого другого объема $V_{\text{ж}}$ (рис. 3.2, изотерма 2). При этом окажется, что в состояниях между V_{Γ} и $V_{\text{ж}}$ часть газа переходит в жидкость, причем количество жидкости в цилиндре будет тем больше, чем меньше становится объем газа. Именно в данном случае можно говорить уже не о газе, а о паре, взаимодействующим со своей жидкостью.

Так как изотерма реального газа на участке между объемами V_{Γ} и $V_{\text{ж}}$ осуществляется при фиксированном (неизменном) давлении пара, то этот участок называют **изотермой-изобарой**. Таким образом, изотерма-изобара фактически соответствует двум агрегатным состояниям (фазам) вещества. При уменьшении объема до $V_{\text{ж}}$ весь газ превращается в жидкость и в дальнейшем происходит уже сжатие жидкости. У жидкостей, как известно, очень малая сжимаемость, поэтому изотерма круто уходит вверх даже при незначительном уменьшении объема.

Указанная изотерма за исключением области изотермы-изобары между V_{Γ} и $V_{\text{ж}}$ описывается уравнением Ван-дер-Ваальса (см. ст. 3.2). На месте же изотермы-изобары у ван-дер-ваальсовского газа имеется S -образный завиток (рис. 3.2, изотерма 3), который для реальных веществ осуществляется лишь частично при особых физических условиях.

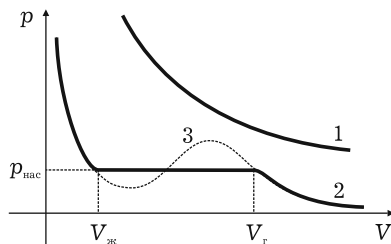


Рис. 3.2

Если рассмотренный выше процесс изотермического сжатия остановить в какой-нибудь точке между объемами V_r и $V_{ж}$, то массы жидкой и газовой фазы тоже зафиксируются и будут оставаться таковыми до тех пор, пока мы не изменим внешние условия. Это означает, что фазы будут находиться в равновесии между собой — это так называемое **фазовое равновесие**.

Состояние фазового равновесия на молекулярном уровне осуществляется следующим образом. Скорости молекул в любом веществе подчиняются определенной закономерности (например, в идеальном газе — это распределение Максвелла), поэтому всегда имеется некоторая доля молекул, обладающая очень большими значениями скоростей. За счет значительно-го запаса кинетической энергии такие молекулы могут вырваться из области одной фазы и перейти в область другой. Такие переходы могут осуществляться в обоих направлениях — и из жидкой фазы в газообразную, и из газообразной в жидкую. Процесс возникновения пара из жидкой фазы называется **парообразованием** (или **испарением**), а обратный процесс — **конденсацией**. При фазовом равновесии парообразование и конденсация имеют одинаковую интенсивность: количество вылетающих из жидкости молекул равно количеству влетающих в нее из пара. Пар в состоянии фазового равновесия называется **насыщенным**, так как при данной температуре никаким способом количество молекул в нем нельзя увеличить, т. е. пар «насытился» молекулами.

Таким образом, фазовое равновесие — это динамическое равновесие между молекулами жидкости и насыщенного пара. У разных жидкостей насыщение наступает при различной плотности (давлении) пара. Причина этого заключается в различии сил межмолекулярного взаимодействия. В жидкостях, у которых силы межмолекулярного притяжения велики (например, у ртути), только наиболее быстрые молекулы, число которых незначительно, могут вылетать из жидкости. Поэтому для таких жидкостей уже при небольшой плотности пара наступает состояние равновесия. У летучих жидкостей с малой силой притяжения молекул (например, у эфира) при той же температуре может вылететь за пределы жидкости мно-

жество молекул. Поэтому и равновесное состояние наступает только при значительной плотности пара.

Таблица 3.1

**Давление p_0 и плотность ρ_0 насыщенного
водяного пара при некоторых температурах**

$t, ^\circ\text{C}$	$p_0, \text{кПа}$	$\rho_0, \text{г/м}^3$
-23	0,08	0,7
-5	0,40	3,2
0	0,61	4,8
1	0,65	5,2
2	0,71	5,6
3	0,76	6,0
4	0,81	6,4
5	0,88	6,8
6	0,93	7,3
7	1,00	7,8
8	1,06	8,3
9	1,14	8,8
10	1,23	9,4
11	1,33	10,0
12	1,40	10,7
13	1,49	11,4
14	1,60	12,1
15	1,71	12,8
16	1,81	13,6
17	1,93	14,5
18	2,07	15,4
19	2,20	16,3
20	2,33	17,3
21	2,49	18,3
22	2,64	19,4
23	2,81	20,6
24	2,98	20,6
25	3,17	23,0

Продолжение табл. 3.1

26	3,36	24,4
27	3,56	25,8
28	3,78	27,2
29	4,00	28,7
30	4,24	30,3
50	12,30	83,0
75	39,21	245,6
85	58,82	359,1
93	78,43	470,1
100	101,3	597,3

Для того, чтобы получить насыщенный пар, достаточно жидкость поместить в закрытый объем — через некоторое время образующийся над жидкостью пар обязательно достигнет насыщения. Ясно, что давление насыщенного пара над жидкостью зависит от температуры — чем она выше, тем больше молекул могут вырваться из жидкости, но и тем больше молекул будет влетать обратно в жидкость. Для воды значения плотностей и давлений насыщенных паров при различных температурах обычно затабулированы в справочных таблицах (табл. 3.1).

Если динамическое равновесие между веществом и паром нарушено, то пар может быть **ненасыщенным** или **пересыщенным**. Ненасыщенный пар — это пар, не достигший термодинамического равновесия со своей жидкостью, когда при данной температуре его давление всегда меньше давления насыщенного пара. При наличии над поверхностью жидкости ненасыщенного пара процесс парообразования преобладает над процессом конденсации, и потому жидкости в сосуде с течением времени становится все меньше и меньше.

Очень часто пар путают с **туманом**, считая эти слова синонимами. Следует помнить, что туман — это не газ, а двухфазная система, состоящая из мельчайших капелек жидкости и пара одного и того же вещества. Пар (т. е. фактически газ) прозрачен для света, а вот туман, как правило, очень сильно рассеивает свет [11, 62, 97, 126, 147, 191].

3.6. КРИТИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ

В предыдущей статье было сказано, что давление насыщенного пара над жидкостью зависит от температуры: чем выше температура, тем выше и давление насыщенного пара. Это означает, что участок изотермы-изобары на pV -диаграмме при повышении температуры поднимается все выше и выше (рис. 3.3). Однако опыт показывает, что при этом изотерма-изобара становится все короче и короче и, наконец, при некоторой температуре $T_{\text{кр}}$ стягивается в точку K . Все изотермы выше $T_{\text{кр}}$ уже соответствуют только газообразному состоянию вещества. Таким образом, объем, соответствующий точке K , является объемом и для пара, и для жидкости одновременно. Из этого следует, что в состоянии K исчезает различие между плотностями пара и жидкости, т. е. жидкость и пар становятся неразличимыми. Зависимость давления насыщенных паров от температуры имеет вид, показанный на рис. 3.4 (это то же, что и на рис. 3.3, только в координатах p – T).

Состояние вещества, соответствующее точке K , называется **критической точкой** (или **критическим состоянием**), а соответствующие параметры состояния — **критическими параметрами**. Понятие критического состояния впервые было введено в 1860 г. знаменитым русским ученым **Д. И. Менделеевым** (1834–1907). В этом состоянии вещество является одновременно и паром, и жидкостью.

Критическое состояние для широко распространенных газов осуществляется или при достаточно низких температурах или при высоких давлениях, поэтому в естественных

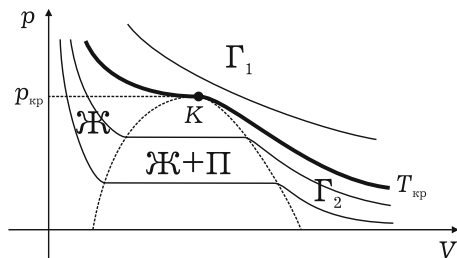


Рис. 3.3

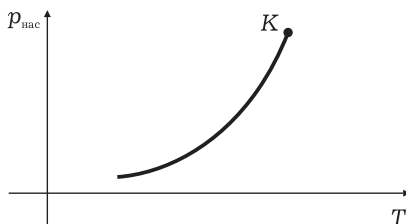


Рис. 3.4

условиях не наблюдается. Например, для сухого воздуха $T_{кр} = -140,65^\circ\text{C}$, $p_{кр} = 37,2$ атм; для углекислого газа $T_{кр} = 31,05^\circ\text{C}$, $p_{кр} = 73$ атм. Для воды критическое состояние тоже осуществляется при условиях, которые можно воспроизвести только в лабораторных условиях: $T_{кр} = 374,35^\circ\text{C}$, $p_{кр} = 217,5$ атм.

Критическая изотерма и граничные точки изотерм-изобар на pV -диаграмме разбивают все возможные состояния вещества на три области (см. рис. 3.3): газа (Г), жидкости и пара (Ж+П), жидкости (Ж). Область газообразного состояния критической изотермой $T_{кр}$ разбивается еще на две области: на область Γ_1 чисто газовой фазы, из которой вещество никаким изотермическим сжатием нельзя перевести в жидкую фазу и в которой поэтому понятие насыщенного пара не имеет смысла, и на область Γ_2 , из которой вещество в принципе возможно изотермически перевести в жидкую фазу.

Напоследок, чтобы проверить себя, попробуйте решить следующую задачу.

В закрытом прочном сосуде находится жидкость; для конкретности допустим, что это вода. Пусть вода не полностью заполняет объем сосуда, т. е. над водой имеется определенный объем насыщенного пара. Что будет происходить в сосуде, если его постепенно нагревать до очень высокой температуры?

С одной стороны, при повышении температуры объем воды будет увеличиваться, а ее плотность — уменьшаться. С другой стороны, это приведет к уменьшению объема, занимаемого паром. При этом пар все время остается насыщенным, и его давление будет повышаться не только за счет увеличения

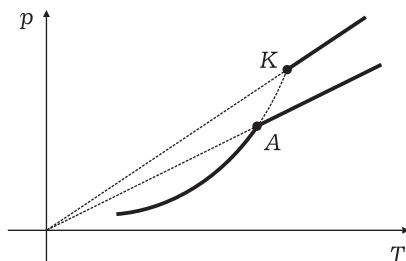


Рис. 3.5

кинетической энергии молекул, но и за счет увеличения его плотности (рис. 3.5). Если в сосуде достаточно воды, эта тенденция будет сохраняться до критической температуры T_K , при которой плотности воды и пара сравняются и исчезнет различие между ними; если же воды мало, то при некоторой температуре T_A вся эта вода испарится. В любом из этих случаев дальнейшее повышение температуры обращает содержимое сосуда в ненасыщенный водяной пар, так как для установления паром динамического равновесия со своей жидкостью эта жидкость (т. е. вода) отсутствует. Фактически теперь можно говорить не о водяном паре в сосуде, а о газе. Поэтому дальнейший нагрев сосуда будет приводить к изохорному повышению температуры газа по закону Шарля [47, 126, 138].

3.7. ВЛАЖНОСТЬ ВОЗДУХА

Водяные пары, всегда имеющиеся в атмосферном воздухе, как правило, ненасыщенные. Это обусловлено постоянными движениями воздушных масс как вдоль земной поверхности (ветра), так и по вертикали (нисходящие и восходящие воздушные потоки; см., например, ст. 2.67 на с. 243). Перемещающиеся воздушные массы все время сносят с собой и водяной пар, что препятствует установлению динамического равновесия пара с водой.

Для характеристики того, насколько водяной пар в атмосфере данной местности далек от насыщения, используется величина, называемая **относительной влажностью воздуха**

(обычно измеряется в процентах):

$$f = \frac{\rho}{\rho_0} \quad \text{или} \quad f = \frac{p}{p_0}, \quad (3.7)$$

где ρ и p — плотность и давление водяных паров, которые имеются в воздухе; ρ_0 и p_0 — плотность и давление водяных паров, если бы они были насыщенными при данной температуре. Таким образом, относительная влажность показывает, какую долю составляет имеющийся водяной пар в насыщенном паре. Пользоваться можно обеими приведенными выше формулами (3.7), так как плотность и давление пропорциональны друг другу.

Кроме относительной влажности, можно пользоваться и абсолютными значениями плотности ρ и давления p водяных паров в атмосфере. Но они для человека являются малоинформативными, так как большинство природных явлений (выпадение осадков, появление тумана и т. д.) зависит от того, как близок или далек атмосферный водяной пар при данной температуре от состояния насыщения, т. е. определяется относительной влажностью.

Как уже многократно говорилось, плотность (или давление) насыщенных паров зависит от температуры: чем она выше, тем больше и плотность насыщенного пара. Что же будет происходить при локальных (достаточно быстрых) изменениях температуры воздуха в данной местности при данном значении плотности (ненасыщенных) паров ρ ? Очевидно, тут есть только два варианта: или пар еще дальше будет уходить от состояния насыщения, или, наоборот, приближаться к ней и, возможно, даже дойдет до состояния насыщения.

Первый случай будет осуществляться при повышении температуры. Действительно, более высокой температуре должна соответствовать и более высокая плотность ρ_0 насыщенных паров, что, как видно из (3.7), ведет к уменьшению относительной влажности. Это, в свою очередь, приведет к более интенсивному испарению с водных поверхностей, так как вода будет стремиться восстановить динамическое равновесие со своим паром.

Второй случай осуществляется при понижении температуры, при этом относительная влажность растет. При достаточном понижении температуры может случиться так, что относительная влажность станет равной 1 (или 100%). Это фактически означает, что имеющийся при данной температуре пар уже является насыщенным. Температура, при которой осуществляется насыщение пара при данном его абсолютном давлении, называется **точкой росы**. При дальнейшем понижении температуры избыток водяных паров начинает конденсироваться в маленькие капельки воды. Если такое происходит около поверхности земли или воды, мы наблюдаем появление **тумана** или **росы**; если понижение температуры связано с восходящими воздушными потоками, то образуются **облака**. Такие явления играют немаловажную роль в нашей повседневной жизни и технике [47, 83, 126, 130].

3.8. ВЕС СУХОГО И ВЛАЖНОГО ВОЗДУХА

Что тяжелее при одних и тех же значениях температуры и давления атмосферы: сухой воздух или влажный?

Влажный воздух есть смесь сухого воздуха и водяного пара. Поэтому может показаться, что влажный воздух должен быть тяжелее сухого — именно на массу заключенного в нем пара. Такое заключение, однако, ошибочно: влажный воздух, напротив, легче сухого. Доказать это можно следующим образом.

Во-первых, по условию задачи давление сухого воздуха равно давлению влажного воздуха: $p_{\text{сух}} = p_{\text{влаж}}$. Согласно закону Дальтона давление влажного воздуха складывается из давления сухого воздуха и давления водяного пара: $p_{\text{влаж}} = p'_{\text{сух}} + p_{\text{пар}}$, откуда

$$p_{\text{сух}} = p'_{\text{сух}} + p_{\text{пар}}. \quad (3.8)$$

Из полученного выражения уже видно, что давление $p'_{\text{сух}}$ сухого воздуха, входящего в состав влажного, меньше давления $p_{\text{сух}}$ чисто сухого воздуха.

Во-вторых, вопрос о том, что тяжелее, есть на самом деле вопрос о сравнении плотностей. Если считать рассматриваемые газы идеальными (для наших целей это вполне допустимо), то плотность влажного воздуха как смеси равна

$$\rho_{\text{влаж}} = \rho'_{\text{сух}} + \rho_{\text{пар}} = \frac{\mu_{\text{возд}} p'_{\text{сух}}}{RT} + \frac{\mu_{\text{пар}} p_{\text{пар}}}{RT}, \quad (3.9)$$

а плотность сухого воздуха —

$$\rho_{\text{сух}} = \frac{\mu_{\text{возд}} p_{\text{сух}}}{RT}.$$

Воспользовавшись (3.8), последнее выражение можно переписать в виде

$$\rho_{\text{сух}} = \frac{\mu_{\text{возд}} p'_{\text{сух}}}{RT} + \frac{\mu_{\text{возд}} p_{\text{пар}}}{RT}. \quad (3.10)$$

Первые слагаемые в правых частях выражений (3.9) и (3.10) одинаковы, а вторые слагаемые отличаются лишь множителями $\mu_{\text{пар}}$ и $\mu_{\text{возд}}$. Так как $\mu_{\text{пар}} = 18 \cdot 10^{-3}$ кг/моль, $\mu_{\text{возд}} = 29 \cdot 10^{-3}$ кг/моль, то $\mu_{\text{пар}} < \mu_{\text{возд}}$ и, соответственно, $\rho_{\text{влаж}} < \rho_{\text{сух}}$, что и требовалось доказать.

Более коротко и понятно, так сказать, «на пальцах», это можно доказать следующим образом. Согласно закону Авогадро, равные объемы газов при одинаковых температурах и давлениях имеют одинаковое количество молекул. Это справедливо в том случае, если газы являются идеальными. При обычных условиях воздух и водяной пар ведут себя как идеальные газы. Поэтому в единице объема сырого воздуха содержится столько же молекул, сколько в единице объема сухого (при одинаковых температуре и давлении). Другими словами, сырой воздух получается из сухого посредством замены некоторых молекул кислорода и азота молекулами воды. Но молекула воды легче молекул кислорода и азота. Следовательно, сырой воздух легче сухого.

Из вышесказанного вытекает весьма важное практическое следствие. Издавна замечено, что перед дождем показания барометров уменьшаются. Как вы теперь, наверное, понимаете, это связано с тем, что перед дождем увеличивается влажность воздуха, что ведет к уменьшению его веса и, соответственно, его давления [79, 95, 137].

3.9. ТУМАН

Туман представляет собой скопления мелких капелек воды, возникающие при определенных условиях в непосредственной близости от поверхности земли или водной поверхности (см. ст. 3.7). В известном смысле возникновение тумана есть явление выпадения росы. Существенно, однако, что в данном случае выпадение росы происходит не на поверхности земли или воды, не на поверхностях листьев или травинок, а в объеме воздуха.

Туман стелется над самой поверхностью земли или воды, образуя слой толщиной примерно от метра до десятков метров (иногда — до сотен метров). Он сильно рассеивает свет и поэтому снижает горизонтальную видимость, ограничивая ее расстояниями от километра (слабый туман) до нескольких метров (очень сильный туман).

Диаметры капелек воды в тумане имеют размеры от 0,5 мкм до 100 мкм. В обычном тумане диаметр водяных капелек в основном порядка 10 мкм. Если в тумане преобладают очень мелкие капельки (диаметром менее 1 мкм), то такой туман называют **дымкой**; если же капли тумана относительно велики (диаметром порядка 100 мкм), то это так называемая **морось**. При очень низких температурах (ниже -20°C) туман состоит из мелких ледяных кристалликов.

Количество капелек в 1 см^3 тумана примерно от 100 до 1000. Общая масса всех водяных капелек в единице объема тумана называется **водностью тумана**. Водность тумана обычно не превышает $0,1\text{ г/м}^3$, но в особо плотных туманах она может достигать 1 г/м^3 . Эти числа кажутся очень малыми: ведь собрав воедино все капельки тумана, занимающего объем 10^3 м^3 и имеющего водность $0,1\text{ г/м}^3$, мы получим всего полстакана воды (100 г) и едва сможем утолить жажду. Поэтому кажется удивительным, как быстро намокает одежда у того, кто окунулся в промозглую сырость тумана. Однако не следует особенно удивляться — в действительности воды в тумане не так уж и мало. Действительно, рассмотрим слой тумана толщиной 10 м, висящий над полем площадью 5 км^2 . Объем такого туманного слоя равен $5 \cdot 10^7\text{ м}^3$. При водности

тумана $0,1 \text{ г/м}^3$ в нем будет содержаться $5\,000 \text{ кг}$ воды — этого вполне достаточно для орошения рассматриваемого поля.

Сразу же отметим, что лишь очень небольшая часть водяных паров воздуха превращается в туман. Например, из табл. 3.1 (на с. 281) видно, что при температурах около 20°C плотность насыщенных паров составляет приблизительно 20 г/м^3 . В то же время водность тумана, как отмечалось выше, обычно не превышает $0,1 \text{ г/м}^3$. Значит, в туман конденсируется не более 1% массы водяных паров.

Вообще говоря, возможны два условия для образования тумана.

Во-первых, может быть так, что воздух имеет достаточно большую абсолютную влажность, а его температура при этом постепенно понижается. При достижении точки росы пар становится насыщенным, при дальнейшем охлаждении он становится пересыщенным. Выпадающий в этом случае туман называют **туманом охлаждения**.

Во втором случае воздух изначально имеет достаточно низкую температуру, но контактирует с относительно теплой поверхностью воды. При этом в холодный воздух испаряется дополнительное количество пара, в результате чего абсолютная влажность воздуха повышается и может превысить значение плотности насыщенного пара для данной температуры воздуха. Выпадающий при этом туман называют **туманом испарения**.

Можно указать несколько вполне конкретных физических ситуаций, при которых возникают туманы:

1) имеется хорошо прогреваемый солнцем водоем — пруд, озеро, мелководная бухта. К утру воздух над поверхностью воды охлаждается в большей степени, чем сама вода, и его температура оказывается существенно ниже. Поэтому с теплой водной поверхности в холодный воздух испаряется дополнительное количество пара, в результате чего возникает утренний туман испарения. Утренний туман весьма нестойк: взойдет солнце, и он растает без следа (отсюда выражение «расстаял как утренний туман»);

2) холодный воздух переносится ветром в горизонтальном направлении и оказывается над теплой водой. При этом, как

и в предыдущем случае, образуется туман испарения. Такой туман можно наблюдать, например, в Арктике, когда слои холодного воздуха над льдами перемещаются на открытую воду;

3) теплый воздух переносится ветром в горизонтальном направлении и оказывается над холодной поверхностью. При этом он охлаждается, и в результате возникает туман охлаждения. Такой туман образуется, например, когда воздушные массы, получившие теплоту от реки, перемещаются к покрытому снегом холодному берегу (береговой туман). Возможен и другой случай: слой воздуха, прогретый над берегом, перемещается в сторону водоема и там отдает теплоту более холодной воде. Такие туманы, как правило, образуются летними вечерами вблизи больших водоемов;

4) находящиеся над нагретой водой теплые слои воздуха поднимаются по склону расположенной рядом горы вверх и попадают в область относительно холодного воздуха. И уже там, наверху, образуется туман охлаждения, который по склону горы сползает затем вниз к воде;

5) после захода солнца нагретая за день земля остывает быстрее, чем воздух. Приповерхностные слои воздуха оказываются теплее; они начинают отдавать теплоту земле и, как следствие, охлаждаются — возникает вечерний туман охлаждения [24, 130].

3.10. ПРОМЫШЛЕННОСТЬ И ТУМАН

Лондонские туманы давно уже вошли в поговорку. Однако также часто мы можем наблюдать туманы и в окрестностях крупных промышленных центров — туманы там бывают намного чаще, чем в окружающих лесистых или сельскохозяйственных местностях. В чем же причина этого?

Начнем с того, что та картина возникновения тумана, которая описана в предыдущих статьях, верна только в целом — на самом деле происходящие при этом на молекулярном уровне процессы намного сложнее. Все дело в том, что давление пара (насыщенного), при котором осуществляется его динамическое равновесие с плоской поверхностью жидкости,

отличается от давления равновесия в случае искривленной поверхности.

Рассмотрим, например, вогнутую поверхность. Молекулы, покидающие вогнутую поверхность жидкости, легче ею захватываются обратно, так как молекулы в среднем находятся ближе к вогнутой поверхности, чем к плоской (рис. 3.6, а, б). Значит, уже при сравнительно небольшом числе вырвавшихся молекул наступает такое состояние, когда число ежесекундно освобождающихся молекул равно числу захватываемых. Соответственно, насыщение пара около вогнутой поверхности жидкости наступает при более низком давлении.

Подобно этому, давление насыщенного пара близ выпуклой поверхности жидкости должно быть выше, чем близ плоской поверхности. Причина — обратная предыдущей: молекулы в среднем находятся дальше от выпуклой поверхности жидкости по сравнению с плоской (рис. 3.6, в), и для достижения динамического равновесия их должно быть больше.

Английский физик **У. Томсон (лорд Кельвин)** в 1871 г. получил выражение (**уравнение Кельвина**) для зависимости давления p насыщенных паров от радиуса кривизны r поверхности жидкости:

$$p = p_0 e^{-\frac{2\mu\sigma}{\rho RT r}},$$

где p_0 — давление насыщенных паров над плоской поверхностью жидкости; μ , σ , ρ — молярная масса, коэффициент поверхностного натяжения и плотность жидкости; R — универсальная газовая постоянная; T — температура. Согласно этому уравнению, давление насыщенных паров тем больше изменяется, чем меньше радиус кривизны r . Для плоской по-

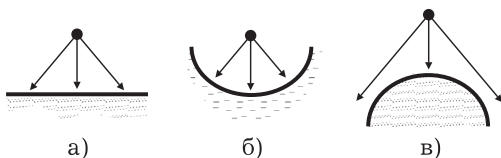


Рис. 3.6

верхности $r = \infty$ и давление p насыщенных паров не меняется.

Представим теперь, что у нас имеется нормально насыщенный пар, т. е. пар, давление которого соответствует плоской поверхности жидкости. Что же должно произойти с очень выпуклой, т. е. имеющей форму крошечного шарика, каплей воды, внесенной в этот пар? А произойдет следующее: так как для выпуклой (сферической) поверхности капли существующий пар является ненасыщенным, то она начнет испаряться, и если капля достаточно мала, то вся превратится в пар. После этого пар фактически становится перенасыщенным. Легко понять вытекающее отсюда следствие: в пространстве, нормально насыщенном водяными парами, молекулы не могут собираться в капельки, потому что эти первые чрезвычайно мелкие капли должны были бы тотчас же испариться.

Иначе обстоит дело, если воздух, насыщенный паром, содержит частицы пыли или дыма. Как ни малы эти частицы сами по себе, они велики по сравнению с молекулами. Поэтому оседая на них, молекулы воды сразу же образуют довольно крупные капли. Такие капли значительного радиуса имеют уже не настолько искривленную поверхность, чтобы вода испарилась. Отсюда понятно, почему присутствие частиц дыма и пыли в воздухе должно способствовать сгущению пара в капельки, т. е. образованию туманов.

Число твердых частиц в воздухе промышленных центров огромно. В то время как в 1 см^3 воздуха над вершинами Альп их содержится всего несколько сотен, то в таком же объеме воздуха крупных городов их может насчитываться до 140 000 (а в жилых домах их концентрация доходит до 6 000 000 на куб. см!).

В табл. 3.2 приведены характерные размеры некоторых видов твердых частиц в воздухе городов.

Вышеуказанный механизм является причиной образования облачного следа за высоко летящим самолетом. Самолет при полете оставляет за собой множество мельчайших частиц копоти, являющихся центрами конденсации водяного пара. И если влажность воздуха на высоте полета близка к состоянию насыщения, то вслед за самолетом образуется след из мель-

Таблица 3.2

**Характерные размеры твердых частиц
в городском воздухе**

Частица	Радиус, мкм
Пыльца растений	20–60
Микроорганизмы и их споры	1–15
Сухой песок	200–2 000
Угольная пыль	10–400
Цементная пыль	10–150
Удобрения	30–800
Асбест	10–200

чайших капелек воды (или кристалликов льда, если температура воздуха ниже 0°C).

Изменение давления насыщенных паров над искривленными поверхностями жидкостей играет немаловажную роль в природе. Например, как уже указывалось выше, давление паров около водяной капли выше, чем над плоской поверхностью. Поэтому при соседстве двух капель различного радиуса происходит испарение малой капли и увеличение размеров большой, что играет большую роль в образовании крупных капель в дождевом облаке [8, 11, 20, 83, 95, 114, 126, 130].

3.11. ОБЛАКА

Облака тоже представляют собой туман, состоящий из мельчайших капелек воды, льдинок и пара. Они образуются в результате охлаждения восходящих воздушных потоков (см. ст. 2.67 на с. 243). Именно из-за того, что облака — это туман, мы можем наблюдать их (водяной пар невидим; см. ст. 3.5 на с. 278). Облака покрывают в среднем около половины всего земного небосвода и в них содержится около 10^{12} кг воды и льда. Облака переносятся ветрами на огромные расстояния, в результате чего осуществляется постоянный влагообмен между различными частями Земли.

При всем сходстве с туманом облако все же существенно отличается от него. Строго говоря, на туман похожи лишь **слоистые облака** (рис. 3.7). Они образуются близко от зем-

ной поверхности и представляют собой белесые или серые однородные горизонтальные полосы (слои). Расстояние от земли до облачной полосы обычно не превышает нескольких сотен метров, но может составлять и всего десятки метров. Толщина слоистого облака порядка 100–1 000 м, зато его горизонтальная протяженность может достигать 100 км. Слоистые облака часто возникают на склонах гор. Осадки из слоистых облаков не выпадают, если не считать мелкой мороси.

Значительно более мощные слои образуют **слоисто-дождевые облака**. Они темно-серые, плотные, иногда почти черные, с размытой нижней границей. Эти облака могут обкладывать весь небосвод, покрывая его темными пятнами; именно с такими облаками мы и связываем представление о пасмурной погоде. Расстояние от земной поверхности до слоисто-дождевых облаков обычно составляет примерно 100–1 000 м, толщина их порядка километра, горизонтальная протяженность достигает 100–1 000 км. Как видно уже из названия, эти облака дают дождь и могут существовать сутки и более; выпадающие из них дожди могут быть длительными, обложными. При определенных условиях из слоисто-дождевых облаков выпадает и снег. В отличие от слоистых облаков, являющихся, как правило, капельными, слоисто-дождевые облака — смешанные: в нижней части они состоят из капелек воды, а в верхней — из кристалликов льда.

Как слоистые, так и слоисто-дождевые облака называют **облаками нижнего яруса**.

Выше облаков нижнего яруса могут находиться **облака среднего яруса**, к которым относят **высококучевые облака**. Эти облака имеют обычно вид покрывающих часть небосвода волнистых гряд. Высота их нижней границы 2–5 км, толщина примерно такая же, как у слоистых облаков (до 1 км). Высококучевые облака состоят обычно целиком из ледяных кристалликов. Осадки из этих облаков не выпадают.

Еще более высоко образуются **облака верхнего яруса**. К ним, прежде всего, относятся **перистые облака**. Они представляют собой переплетения белых нитей и тонкие белые полосы, которые, сливаясь, образуют силуэты перьев, хвостов и крыльев птиц, рыбьих скелетов и т. п. Высота нижней

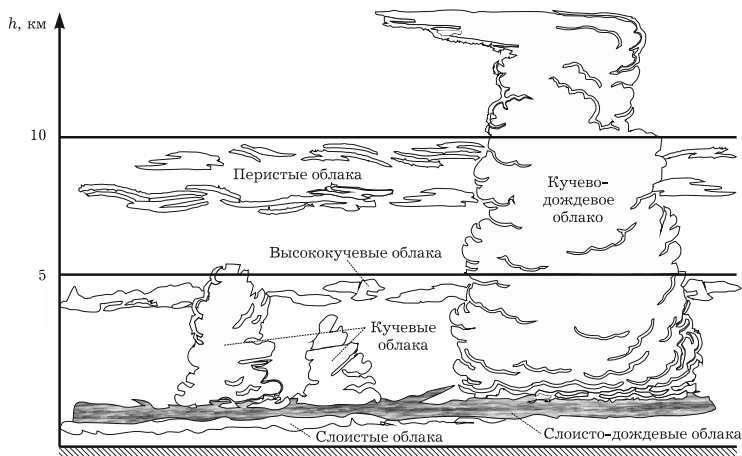


Рис. 3.7

границы перистых облаков 6–10 км, толщина около километра. Облака состоят из кристалликов льда и не дают осадков.

Все перечисленные выше виды облаков имеют общую черту: они сильно развиты в горизонтальном направлении (100–1000 км) и относительно слабо — в вертикальном (100–1000 м). Поэтому все они называются **облаками горизонтального развития**. Вертикальные перемещения воздушных масс в таких облаках происходят сравнительно медленно; максимальная вертикальная скорость воздушных потоков не превышает 10–20 см/с. Время существования рассматриваемых облаков измеряется сутками.

Иное дело — **облака вертикального развития**, к которым относятся **кучевые облака хорошей погоды** и **кучево-дождевые облака**. Нижняя граница этих облаков лежит в нижнем ярусе на высоте около 1 км, а вершина попадает в верхний ярус. Толщина или, лучше сказать, высота кучевых облаков достигает 5–8 км, а кучево-дождевых — 10–15 км. В то же время горизонтальная протяженность обычного кучевого облака составляет всего 1–10 км, а кучево-дождевого — не превышает нескольких десятков километров. В рассматриваемых облаках весьма существенны вертикальные перемещения

воздушных масс с характерными скоростями порядка 10 м/с. В отличие от облаков слоистого характера, кучевые облака существуют недолго: время их жизни измеряется часами и десятками минут.

Кучевые облака хорошей погоды обычно отделены одно от другого, но возможны и довольно причудливые нагромождения облаков. Физические процессы, происходящие в кучевом облаке, обуславливают характерные особенности его внешнего вида — вытянутость в вертикальном направлении, куполообразную вершину, обилие белых «барашков».

Кучево-дождевые облака по своему виду похожи на кучевые, но, в отличие от последних, имеют более крупные размеры и более высоки. Внизу они темные, иногда почти черные. Вершина облака часто растекается в горизонтальном направлении, что придает облаку форму наковальни. Кучево-дождевые облака смешанные: в нижней части они капельные, в верхней — ледяные. В подавляющем большинстве случаев эти облака могут эволюционировать в **грозовые тучи** и дать сильные ливни и град. Физическим механизмом, позволяющим кучево-дождевым облакам за короткий промежуток времени значительно вырасти в высоту, является повышение температуры в облаке где-то в его середине (по высоте) за счет выделения теплоты при конденсации пара и образовании кристалликов льда. Это позволяет восходящему снизу влажному воздушному потоку достигать еще больших высот. С другой стороны, окружающие облако более тяжелые холодные массы воздуха, попадая в его область, устремляются вниз, поэтому во время грозы температура воздуха на земле понижается и возникает сильный ветер.

Все вышеперечисленные облака образуются в пределах нижнего слоя атмосферы — тропосферы (см. ст. 2.67 на с.243). Так как для образования облаков надо, чтобы воздух был достаточно влажным и происходило достаточно сильное понижение его температуры, то в более высоких слоях атмосферы эти условия могут выполняться только на двух высотах, соответствующих ее температурным минимумам (см. рис.2.34 на с.245): 30 км (нижняя граница озонового слоя) и 80 км (верхняя граница мезосферы). И действительно, на

высотах около 30 км можно обнаружить **перламутровые облака** и на высотах около 80 км — **серебристые облака**. Перламутровые облака очень тонкие и поэтому просвечивают: в сумерки вблизи Солнца они окрашиваются в красный, золотистый и зеленоватый цвета. Серебристые облака также очень тонкие и ночью, вскоре после захода Солнца или незадолго до восхода, светятся серебристым цветом [130].

3.12. «ПАДАЮЩИЕ» ОБЛАКА

Как рассказывалось в предыдущей статье, облака представляют собой мелкие водяные капельки и льдинки. Известно, что вода тяжелее сухого воздуха почти в 800 раз и поэтому, на первый взгляд, непонятно, почему облака держатся в воздухе, а не падают на землю.

Разгадка, однако, проста. Водяные капельки в облаках имеют диаметры 10–20 мкм, зачастую даже 1 мкм. Обладая по сравнению со своей массой весьма большой поверхностью, водяные шарики при падении в воздухе встречают настолько значительное сопротивление, что опускаются вниз крайне медленно. Они отличаются, как говорят, значительной «парусностью».

Например, капельки радиусом в 10 мкм падают равномерно со скоростью всего 1 см/с. Значит, облака в сущности не плавают в воздухе — они падают, но падение это происходит чрезвычайно медленно и практически незаметно. Однако более существенным является другой фактор — наличие восходящих воздушных потоков от более нагретой поверхности Земли. Достаточно самого слабого восходящего потока воздуха, чтобы не только удержать облако от падения, но и поднять его вверх.

Таким образом, медленное падение облаков либо остается незамеченным, либо скрадывается восходящими воздушными течениями.

Из-за указанной причины держатся в воздухе также туманы и пылинки, хотя масса многих из них, например металлических, больше массы воздуха в несколько тысяч раз [77, 95].

3.13. ТЕМПЕРАТУРА ОБЛАКОВ

Как видно из предыдущих статей, основная масса облаков образуется в самом нижнем слое атмосферы — тропосфере (насчет строения атмосферы см. ст. 2.67 на с. 243). Однако известно, что с высотой температура тропосферы неуклонно понижается, достигая на верхней своей границе значения -75°C (см. там же). Другими словами, уже на относительно небольших высотах температура воздуха ниже 0°C и содержащиеся в облаках капельки воды должны были бы полностью превратиться в льдинки. Тем не менее, известно, что даже на значительных высотах частично облака представлены в виде капелек воды. Почему?

Дело в том, что замерзание воды при 0°C происходит только при наличии центров кристаллизации (см. по этому поводу ст. 5.22 на с. 498, а также ст. 5.31 на с. 514). Центрами кристаллизации могут служить любые примеси — нерастворившиеся частицы или пузырьки газа. Когда объем воды велик, в нем всегда найдется хотя бы один центр кристаллизации, а этого уже достаточно, чтобы замерзла вся вода. Если же масса воды разбита на мельчайшие капли, то лишь небольшое их количество будет иметь центры кристаллизации, и замерзнут только эти капли. Капли же без центров кристаллизации могут быть переохлаждены до -40°C . По этой причине в облаках даже при низкой температуре всегда имеются незамерзшие капельки воды.

Кстати, по этой же причине при полете самолета через облачность на его крыльях и фюзеляже может начаться рост льда — **обледенение**, опасное явление, снижающее аэродинамические характеристики самолета и увеличивающее его лобовое сопротивление. Толщина слоя льда на некоторых деталях самолета может достигать 10 см и более. Связано это с тем, что участки поверхности самолета также являются для капелек воды центрами кристаллизации и при соприкосновении с самолетом переохлажденные капли замерзают, покрывая его ледяной корочкой.

Да что там далеко ходить, такое явление вы могли наблюдать и на Земле. Зимой иногда бывают потепления, во

время которых температура воздуха может стать выше 0°C при очень большой его влажности. При последующем похолодании ниже 0°C возникает переохлажденный туман. Окружающие предметы (деревья, провода, дорожное покрытие и т. д.), находящиеся в таком тумане, являются для частичек воды центрами кристаллизации, поэтому они покрываются слоем льда. Такое обледенение может привести к неприятным последствиям, а в тяжелых случаях — и к авариям. Например, под тяжестью льда ломаются ветки деревьев, могут оборваться электрические провода; много неприятностей приносит обледенение дорог водителям автотранспорта [11, 77, 161, 172].

3.14. ВЗРЫВ И ОБЛАКО

Если вы смотрели видеоролик ядерного или другого мощного взрыва, то, наверное, могли заметить, что в некоторых случаях взрыв сопровождается расширяющейся тонкой белой сферой, а после взрыва всегда образуется грибовидное облако. Почему?

В месте взрыва воздух очень сильно нагревается. При этом образуется ударная волна, в которой за фронтом высокого давления следует фронт низкого давления. В области низкого давления воздух адиабатически расширяется и охлаждается, при этом часть водяного пара конденсируется в виде тумана. После того, как ударная волна проходит, давление воздуха снова становится нормальным, и туман исчезает. Поэтому образующийся слой тумана обычно бывает довольно узким и расширяется радиально во все стороны от места взрыва.

Причина появления грибовидного облака другая. На месте взрыва сильно нагретый воздух стремительно поднимается вверх, увлекая за собой приземный воздух, пыль, обломки, водяной пар, которые и образуют «ножку» грибовидного облака.

Поднимаясь, горячий воздух расширяется и благодаря этому охлаждается (см. предыдущую статью). В конце концов его температура сравнивается с температурой окружающего воздуха. Так как выше он теперь подняться не может, а снизу «подпирают» новые порции горячего воздуха, то продукты

взрыва начинают распространяться в сторону — так образуется «шляпа» облака [140].

3.15. ПРИНЦИП ХОЛОДНОЙ СТЕНЫ

Предположим, что у нас есть два сосуда (рис. 3.8): *A*, содержащий воду при 100°C , и *B*, содержащий воду при 0°C . Для обеспечения таких температур под сосуд *A* поставлена горелка, а сосуд *B* обложен льдом. Пока сосуды не сообщаются друг с другом (кран *C* закрыт), давление насыщенных паров в них не одинаково: в *A* — 760 мм рт. ст., в *B* — 4,6 мм рт. ст. Но когда кран *C* открывается, пар из *A* поступает в *B* и там тотчас превращается в воду, из-за чего пар в сосуде *A* не может иметь давления больше, чем в *B*. Впервые на это обратил внимание **Джеймс Уатт** (1736–1819) — создатель поршневого паровой машины (см. ст. 2.36 на с. 171), поэтому закономерность получила название «**принцип Уатта**». Принцип Уатта формулируется следующим образом: «Если два резервуара, заключающие одну и ту же жидкость при различных температурах, сообщаются между собою, то в них устанавливается одинаковое давление паров, равное давлению при более низкой из обеих температур». Другое название этого принципа — «**принцип холодной стены**». Название произошло из жизненного наблюдения: если хорошо прогретое помещение имеет холодные стены, то содержащиеся в воздухе водяные пары будут конденсироваться на этих стенах. Такое явление, например, вы можете наблюдать в ванных комнатах — во время приема душа стены становятся мокрыми.

До Уатта тоже создавались поршневые паровые машины и в них также давление пара совершало работу по перемещению поршня в цилиндре. Однако для того, что поршень совершил обратный ход, пар конденсировали впрыскиванием в цилиндр холодной воды — при этом его давление падало и внешнее атмосферное давление толкало поршень в обратную сторону. При этом приходилось охлаждать не только сам пар, но прежде всего стенки цилиндра, без чего конденсация не происходила. Между тем при следующем ходе поршня в охлажденный

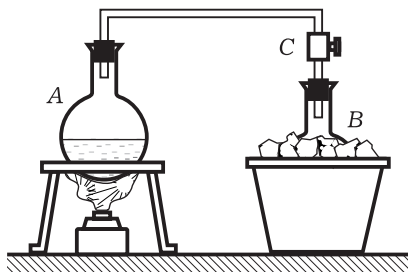


Рис. 3.8

цилиндр снова впускался горячий пар, первые порции которого конденсировались на стенках до тех пор, пока цилиндр не приобретал температуры пара в котле. Отсюда ясно, как невыгоден был такой способ конденсации: он требовал большого расхода пара и большого количества холодной воды. Вот почему доуаттовские паровые машины имели такой невероятно низкий коэффициент полезного действия — около 0,3%. Уатт в своей паровой машине, кроме золотникового распределителя пара для осуществления полезной работы при обоих направлениях движения поршня (см. рис. 2.13 на с. 173), придумал также и холодильник для конденсации отработавшего пара, основанный на открытом им принципе холодной стены. Устройство его холодильника повторяет схему на рис. 3.8: отработавший пар из цилиндра сам устремляется в холодильник и там конденсируется, оставляя стенки цилиндра горячими. С помощью таких улучшений КПД паровой машины Уатта достигал величины 2,7%, что в то время казалось фантастикой.

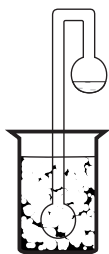


Рис. 3.9

Легко сообразить, что пар, находящийся внутри системы, изображенной на рис. 3.8, для воды из сосуда *B* является насыщенным. Для воды же из сосуда *A* пар ненасыщен, что ведет к более интенсивному парообразованию в нем. Это легко продемонстрировать с помощью поучительного физического прибора, называемого **криофором** (или **кипятильником Франклина**) (рис. 3.9). Прибор состоит из двух полых стеклянных шаров, соединенных трубкой. Из прибо-

ра откачан воздух, но имеется немного воды с паром над ней. Перелив воду в верхний шар, нижний погружают в охлаждающую смесь, например, из снега и соли (см. ст. 3.36 на с. 333) или в сухой лед (см. ст. 5.27 на с. 509). Согласно принципу холодной стены, над водой в верхнем сосуде должно установиться низкое давление насыщенных паров сосуда, погруженного в охлаждающую смесь. В верхнем сосуде уже при комнатной температуре вследствие пониженного давления происходит интенсивное испарение (вода стремится восстановить равновесие со своим паром), переходящее в кипение. При этом выделяется большое количество пара, но этот пар все время перегоняется в нижний сосуд и там конденсируется. Кипение происходит так энергично, что вследствие усиленной потери тепла на парообразование вода в верхнем шаре замерзает.

Более легкий вариант домашнего опыта, не требующего специального оборудования, состоит в следующем. Положите на стол листок фильтровальной бумаги размером примерно 10×10 см (можно использовать и газетную бумагу), смоченный водой. Сверху на листок положите лезвие безопасной бритвы (или кусок тонкой фольги). Сверху все это закрывается обезжиренным стеклом толщиной 2–3 мм, под низ которого подкладываются четыре спички так, что между стеклом и бумагой образуется воздушный промежуток. Теперь на стекло установите алюминиевую кастрюлю с плоским дном, наполненную водой, температура которой на 3–4 градуса ниже комнатной (для этого достаточно налить ее из водопровода, так как в нем температура всегда несколько ниже температуры воздуха). После этого ждем (экспонируем) пару минут и снимаем кастрюлю: на запотевшем стекле можно увидеть достаточно четкое очертание лезвия из-за того, что оно экранировало перенос водяного пара от бумаги к стеклу вследствие принципа холодной стены. Кстати, на этом принципе основано «чудо», происходящее иногда в храмах, — появление на стекле киота изображения иконы: краски (вернее, содержащиеся в них масла) тоже испаряются и для них также справедлив принцип холодной стены.

Принцип холодной стены, имеющий, казалось бы, чисто техническое применение, используется и в астрономии.

Например, он в свое время сыграл решающую роль в решении вопроса о наличии атмосферы у Меркурия. Меркурий движется вокруг Солнца так, что сутки на нем короче года всего лишь в полтора раза, т. е. фактически можно считать, что он неизменно обращен к Солнцу одной и той же своей стороной. Соответственно на одной стороне планеты стоит вечный день и страшный зной, а на другой — вечная ночь и сильнейший холод, близкий к температуре мирового пространства (около -264°C). Если бы Меркурий обладал атмосферой, то на холодной стороне она должна была бы замерзнуть. С другой стороны, согласно принципу Уатта, к этой «холодной стене» планеты должна была бы перетекать атмосфера с дневной стороны. Перетекающая часть атмосферы на холодной стороне тоже должна замерзнуть — и так должно продолжаться до тех пор, пока на холодной стороне Меркурия не соберется вся атмосферная оболочка планеты. Следовательно, Меркурий не может обладать газообразной атмосферой [8, 69, 95].

3.16. ПАРАДОКС С ИСПАРИЕНИЕМ

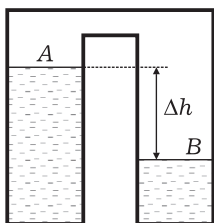


Рис. 3.10

Имеются два теплоизолированных сосуда, наполненных одной и той же жидкостью и соединенных так, как показано на рис. 3.10. Воздух из сосудов откачан, и над поверхностями жидкостей находится только их насыщенный пар. В состоянии термодинамического равновесия как температуры жидкостей, так и температура пара одина-

ковы, поэтому должны быть одинаковыми и давления насыщенного пара над жидкостями. Таким образом, как будто нет условий для испарения жидкости в одном сосуде и конденсации пара в другом. Однако через некоторое (достаточно продолжительное) время уровни жидкостей в обоих сосудах становятся одинаковыми. Как объяснить парадокс?

Хотя одинаковость температуры ведет к одинаковости давления насыщенных паров над жидкостями, оно (давление пара) будет одинаковым только в том случае, если поверхности

жидкостей находятся на одинаковом уровне. Если же поверхности жидкостей на разных уровнях, то возникает добавочное аэростатическое давление $\rho g \Delta h$. Это означает, что давление пара над уровнем A будет ниже, чем над уровнем B . Этой небольшой разности давлений достаточно, чтобы на уровне A происходило испарение, а на уровне B — конденсация пара [137].

3.17. КИПЕНИЕ

При любой температуре над поверхностью жидкости находятся молекулы пара (насыщенного или ненасыщенного в зависимости от условий) за счет ее **парообразования** (или, по-другому, **испарения**). Повышение температуры при неизменном давлении ведет к увеличению интенсивности парообразования. При достижении определенной температуры (при данном давлении) начинается **кипение** — особый вид парообразования, происходящий не только со свободной поверхности жидкости, но и с образованием пузырьков пара в ее объеме.

Образующиеся во время кипения пузырьки пара увеличиваются в размере вследствие испарения в него жидкости, всплывают под действием силы Архимеда и лопаются с характерным звуком (с бульканием). Для поддержания кипения к жидкости необходимо подводить теплоту, которая расходуется на парообразование и на работу пара против внешнего давления при увеличении объема пузырька. Внешнее давление для пузырька складывается из атмосферного давления, гидростатического давления столба жидкости над пузырьком и добавочного (лапласова) давления. Поэтому давление **насыщенного пара в пузырьке** превышает соответствующее давление над жидкостью, и этим объясняется звуковой хлопок при его выходе на поверхность жидкости.

Кипение жидкости возможно лишь при условии, что в жидкости уже имеются пузырьки газа. Обычно такие пузырьки имеются в жидкости вместе с различными взвешенными микроскопическими частицами, а также стенки сосуда содержат мельчайшие поры с адсорбированным газом. Кроме того, любая жидкость содержит в себе растворенные газы

(см. ст. 4.54 на с. 452), которые при нагревании выделяются в виде пузырьков. Если же жидкость тщательно очистить, то при соблюдении особых мер предосторожности жидкость можно перегреть на десятки градусов относительно температуры кипения. Однако малейшее внешнее воздействие на перегретую жидкость приводит к ее взрывообразному вскипанию.

Так как давление насыщенного пара зависит от температуры и кипение наступает при равенстве внешнего давления и давления насыщенного пара в пузырьках, то при низком внешнем давлении кипение возникает при более низкой температуре. Например, при нормальном атмосферном давлении 10^5 Па (1 атм или 760 мм рт. ст.) температура кипения воды составляет 100°C .

На высочайшей горной вершине мира Джомолунгме, где атмосферное давление составляет 0,315 атм, температура кипения воды равна $69,7^\circ\text{C}$. А для того, чтобы вода кипела при 0°C , необходимо подняться на высоту примерно 41 км, где атмосферное давление всего-то 4,579 мм рт. ст. И наоборот, при давлении, равном давлению воды на глубине 1 км (≈ 100 атм), вода закипает при температуре $309,5^\circ\text{C}$. В такой кипящей воде можно расплавить олово ($T_{\text{пл}} = 232^\circ\text{C}$).

Влияет на температуру кипения и растворение в жидкости различных веществ, причем если растворяется твердое тело, то температура кипения повышается, а если другая жидкость, то температура кипения смеси лежит где-то между температурами кипения исходной и растворенной жидкостей.

Обобщая все вышесказанное, можно сформулировать следующие **законы кипения**: температура кипения жидкости:

- 1) постоянна при постоянном давлении;
- 2) повышается, если внешнее давление на жидкость увеличивается, и понижается при уменьшении давления;
- 3) повышается при растворении в жидкости твердых веществ;
- 4) понижается при растворении газов;
- 5) в случае, если жидкость представляет собой смесь, лежит между точками кипения смешанных жидкостей [16, 47, 62, 70, 95, 126, 177].

3.18. КИПЕНИЕ ПО-НОВОМУ

Американские химики придумали новый способ кипячения жидкостей. Для этого в жидкость помещаются в виде взвеси маленькие частицы (наночастицы) металла размерами порядка 40 нм (это в 1000 раз меньше толщины человеческого волоса). Из-за того, что отношение площади поверхности к объему у распыленного вещества намного больше, чем у того же вещества, сжатого в цельный комок, частицы металла поглощают аномально большое количество световой энергии, что заставляет их быстро нагреваться (см. по этому поводу ст. 2.8 на с. 112).

Исследования показали, что если частицы металла поместить в воду и сфокусировать на ней солнечный свет, то она закипит через 5–20 с после начала облучения. Каждая частица в растворе при нагревании формирует крошечный пузырек пара, который отрывается от частицы и всплывает на поверхность жидкости. Процесс визуально мало чем отличается от обычного кипения воды в кастрюле.

КПД процесса впечатляет: 82% поступающей солнечной энергии поглощается наночастицами. Для повышения эффективности процесса металл можно заменить наночастицами диоксида кремния или золота. Это открывает революционные методы использования наночастиц в солнечной энергетике. Предполагается, что мощности струи пара будет достаточно для того, чтобы привести в движение небольшую турбину. Технологию можно будет использовать и при создании недорогих компактных устройств для очистки питьевой воды, стерилизации медицинских инструментов и дезинфекции сточных вод [59].

3.19. СКОРОСТЬ НАГРЕВАНИЯ ВОДЫ

Что требует больше времени: нагревание воды на плите от 10 до 20 °С или от 90 до 100 °С?

Следя за ходом нагревания с секундомером в руках, легко убедиться, что нагревание воды на последние десять градусов

длится всегда дольше, чем нагревание ее на первые десять градусов. И это несмотря на то, что количество нагреваемой воды постепенно уменьшается вследствие испарения.

Объясняется же загадка просто: тепло, выделяемое пламенем, расходуется не только на усиленное испарение воды, но и на потери тепла водою вследствие излучения. При высоких температурах (90–100 °С) вода излучает больше энергии, чем при низких (10–20 °С). Поэтому, несмотря на равномерное подведение тепла к воде, температура ее повышается тем медленнее, чем сильнее вода нагрелась [95].

3.20. ЗАДУМЧИВЫЙ ЧАЙНИК

Всем известно, что чем сильнее нагрев (т.е. мощность) плиты, тем быстрее вскипит чайник. Этот простой факт имеет ясное физическое объяснение. Действительно, количество теплоты ΔQ , необходимое для повышения температуры на ΔT , вычисляется по формуле $\Delta Q = c_{\text{уд}} m_{\text{в}} \Delta T$, где $c_{\text{уд}}$ — удельная теплоемкость воды; $m_{\text{в}}$ — масса воды (мы не учитываем потери тепла вследствие излучения; см. по этому поводу предыдущую статью). Если обе части этого равенства поделить на время Δt , то получим прямо пропорциональную связь между тепловой мощностью плиты $\Delta Q / \Delta t$ и скоростью повышения температуры $\Delta T / \Delta t$:

$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = c_{\text{уд}} m_{\text{в}} \frac{\Delta T}{\Delta t}.$$

Допустим, что вода вскипела — значит, вся подводимая теплота теперь идет на парообразование воды:

$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = r \frac{\Delta m_{\text{п}}}{\Delta t},$$

где r — удельная теплота парообразования; $\Delta m_{\text{п}} / \Delta t$ — скорость парообразования.

Вы выключаете плиту и, естественно, ожидаете, что кипение также прекратится. Но что это? Вместо того, чтобы прекратиться, кипение вдруг усиливается и лишь спустя некоторое время прекращается (не поленитесь, поставьте чайник на

плиту и проверьте!). Нет ли тут нарушения закона сохранения энергии?

Разгадка на самом деле проста и никакого нарушения закона сохранения энергии нет. Как уже указывалось в ст. 3.17, температура кипения жидкости зависит от внешнего давления: чем больше давление над жидкостью, тем выше температура ее кипения. Чайник на плите закрыт крышкой и выход пара из него затруднен, поэтому под крышкой устанавливается повышенное давление. Значит, вода кипит не при 100°C (как мы думаем), а при более высокой температуре. Когда же выключается плита и нагрев прекращается, пар выходит из под крышки чайника и давление падает почти до атмосферного. При этом вода оказывается нагретой до температуры, превосходящей температуру кипения при атмосферном давлении, и чайник резко вскипает.

Этот принцип принудительного повышения давления над водой для соответствующего повышения ее температуры кипения используется в хозяйственных скороварках. Для этих целей они снабжены герметично закрывающейся крышкой. Из-за более высокой температуры пища в таких скороварках готовится намного быстрее. Для предотвращения повышения давления до слишком больших значений скороварки снабжены предохранительными клапанами. Кроме того, в скороварке крышка снабжена специальным механизмом, предотвращающим их резкое открывание — именно из-за того, что при выравнивании давления происходит повторное вскипание воды.

По этой же причине при вскипании воды в системе охлаждения двигателя водителям рекомендуется очень осторожно открывать крышку радиатора, чтобы не обжечься [77].

3.21. ЗВУКИ КИПАЩЕЙ ВОДЫ

Когда подогревается вода, то по исходящему при этом звуку можно определить момент ее закипания. Действительно, вначале раздается шипение, которое постепенно нарастает, а затем уступает место более резкому звуку. Перед самым же кипением этот звук становится мягче. Как объяснить

происхождение этих звуков, особенно смягчение звука перед тем, как вода закипает?

Как известно, кипение — это интенсивное образование пузырьков пара по всему объему нагреваемой жидкости. Для того, чтобы жидкость начала кипеть, ее температуру необходимо довести до определенного значения — **точки кипения**, зависящей от давления. Для воды при нормальном атмосферном давлении — это 100°C . И даже при достижении точки кипения жидкость не закипит, если в ней не будет **центров парообразования** — растворенных пузырьков газа, частиц пыли и т. д. Центрами парообразования также являются мельчайшие полости с воздухом в стенках сосуда (любая, даже очень гладкая стенка сосуда имеет такие полости).

Первый звук при кипении появляется, когда дно сосуда нагрелось достаточно для того, чтобы образовывались пузырьки пара: образование каждого пузырька сопровождается щелчком, а все вместе они создают шипение. При дальнейшем нагревании пузырьки начинают отделяться от дна и подниматься в более холодный слой воды. В холодном слое пузырьки схлопываются (лопаются) — при этом возникает еще более громкий звук. Его мы слышим до тех пор, пока вода не согреется настолько, что пузырьки начинают достигать поверхности и разрываться там. В это время вода начинает кипеть «белым ключом», а пузырьки, лопающиеся на поверхности, создают более мягкий, «плещущий» звук [140].

3.22. КАПЛЯ НА ГОРЯЧЕЙ ПОВЕРХНОСТИ

Расположив утюг горизонтально рабочей поверхностью вверх, капните на него немного воды. Если температура утюга немного больше 100°C , то ничего особенного не произойдет — капелька растечется по поверхности утюга и быстро (за несколько секунд) испарится. Если же температура утюга значительно больше 100°C ($300\text{--}350^{\circ}\text{C}$), картина явления будет другой. Капелька, упав на утюг, отскочит от него, как мячик от пола (невысоко, на высоту 1–5 мм), и затем будет хаотично двигаться, не касаясь нагретой поверхности. Стабильность такого состояния зависит, прежде всего, от температуры по-

верхности — чем сильнее нагрет утюг, тем спокойнее ведет себя капля. При этом время пребывания капли на утюге до полного ее испарения увеличивается во много раз. Скорость испарения капли также зависит от ее размера: большие капли быстро уменьшаются в размерах (до 3–5 мм), а маленькие «живут» довольно долго без заметных изменений (до 5 мин).

В чем причина столь странного поведения капли? Во время падения капли на раскаленную поверхность ее температура около 20 °С. Затем буквально за доли секунды нижние слои нагреваются до 100 °С и выше, и начинается столь интенсивное испарение, что сила давления образующихся паров воды с нижней стороны капли становится больше ее силы тяжести. Теперь капля над горячей поверхностью находится как бы на паровой подушке, опираясь на нее и двигаясь на некоторой высоте от поверхности. Очевидно, в этом случае сила давления паров воды уравнивает силу тяжести, действующую на каплю. Так как теплопроводность пара (как и любого газа) низка, то количества теплоты, передаваемой с поверхности утюга через эту паровую прослойку, хватает в основном лишь на интенсивное испарение нижней стороны капли. В установившемся режиме капля довольно стабильна и «живет» значительное время.

Это так называемое **пленочное кипение** жидкости, возникающее при достаточно высоких температурах. Пленочное кипение сильно отличается от привычного нам **объемного** (или **пузырькового**) **кипения**, протекающего при 100 °С (при нормальном давлении) и сопровождающегося образованием пузырьков пара по всему объему жидкости. Во времена широкого распространения паровых двигателей явление пленочного кипения накладывало определенные ограничения на их максимальные рабочие температуры — ведь с повышением температуры могло возникнуть пленочное кипение, при котором объем вырабатываемого пара резко снижался и мощность двигателя падала.

При малых размерах форма капли близка к сферической, а при больших — сфера оказывается сжатой из-за силы тяжести и принимает блиновидную форму, увеличивая площадь теплопередачи. Из-за этого скорость испарения больших ка-

пель больше, чем у маленьких, и они быстро уменьшаются в размерах.

Пленочное кипение издавна использовалось иллюзионистами и фокусниками. Например, хождение по огню считалось одним из чудес восточной магии. Более того, фокусники способны на мгновение погружать руки в расплавленный металл и даже трогать руками и языком раскаленную (обязательно!) докрасна кочергу без малейшего ущерба для своего здоровья (остерегайтесь проделывать такие опыты, так как они очень опасны и могут привести к неприятным последствиям). При хождении по огню защитную оболочку создает влага на ступнях, что зависит от того, насколько потеют ноги при каждом шаге, и от наличия на ступнях ороговевшей кожи. При контакте с горячими углями часть влаги мгновенно испаряется, создавая (хотя бы на короткое время) вокруг них защитную паровую оболочку. Перед тем как показать фокус с расплавленным свинцом, смачивают руки водой, хотя почти так же хорошо действует и обычная влажность кожи.

У некоторых жидкостей температура кипения, наоборот, по сравнению с водой очень низка. Например, жидкий азот кипит при температуре $-195,75^{\circ}\text{C}$, однако вы можете спокойно пролить его на руки и при этом не получите «ожога». Действительно, разность температур жидкого азота и руки около 230 градусов, отчего сравнительно небольшая часть азота при попадании на ладонь сразу же испаряется, отобрав лишь немного тепла. При этом между остальным льющим азотом и рукой образуется газовая подушка, плохо проводящее тепло. Она и предохраняет руку от резкого переохлаждения и возможной причины ожога: азот просто стекает по газовой подушке, не касаясь руки. (Однако учтите, что при таком длительном процессе температура вашей руки будет неуклонно понижаться!) [77, 79, 88, 105, 140].

3.23. КИПЯЧЕНИЕ ВОДЫ КИПЯТКОМ И СНЕГОМ

Возьмите небольшую стеклянную бутылку (или пузырек), налейте в нее воды и подвесьте с помощью веревочки в сто-

ящую на огне кастрюлю с чистой водой так, чтобы бутылка не касалась дна кастрюли. Как вы думаете, после того, как в кастрюле закипит вода, закипит ли она в бутылке?

Можно ждать сколько угодно — вода в бутылке будет очень горяча, но кипеть не будет. Результат как будто неожиданный, но объясняется очень просто. Чтобы довести воду до кипения, недостаточно только нагреть ее до 100°C , надо сообщить ей еще теплоту для парообразования. Чтобы осуществить такую теплопередачу, температура воды в кастрюле должна быть выше 100°C , так как при равенстве температур теплопередача отсутствует. Однако вода (чистая) в кастрюле будет кипеть строго при 100°C , выше этого значения ее температура при обычных условиях не поднимется, сколько бы мы ее не нагревали. Значит, она может довести воду в бутылке только до 100°C , а когда наступит равенство температур, дальнейшего перехода тепла от воды в кастрюле к воде в бутылке не будет. Вот почему вода в бутылке, хотя и нагревается, но не кипит.

Может возникнуть вопрос: чем же отличается вода в бутылке от воды в кастрюле? Ведь в бутылке та же вода, только отделенная от остальной массы стеклянной перегородкой. Почему же не происходит с ней того же, что и с водой в кастрюле? А потому, что каждая частица воды в кастрюле может за счет перемешивания (конвекции) непосредственно коснуться нагретого дна, температура которого выше 100°C , вода же в бутылке соприкасается только с кипятком, температура которого строго 100°C .

Однако способ заставить воду в бутылке кипеть есть! Для этого достаточно **всыпать в кастрюлю горсть соли**. Соленая вода кипит не при 100°C , а немного выше, и, следовательно, может довести до кипения чистую воду в стеклянной бутылке.

Проведем теперь другой опыт. Вытащите из кастрюли бутылку (осторожно — она горячая!), отлейте из нее воды до половины и снова погрузите в кипящую соленую воду. Когда вода в бутылке закипит, выньте ее из кастрюли и быстро закупорьте заранее приготовленной плотной пробкой. Теперь переверните бутылку и ждите, пока кипение внутри нее прекратится. Выждав этот момент, положите на его донышко

немного снега или даже просто облейте бутылку холодной водой, — вы увидите, что вода в ней снова закипает... Пошупайте бутылку — она не будет особенно горячей, между тем вода в ней все равно кипит!

Разгадка в том, что снег охладил стенки бутылки и вследствие этого пар сконденсировался в водяные капли. Это ведет к уменьшению давления над водой. С уменьшением же давления жидкость кипит при более низкой температуре (см. ст. 3.17 на с. 305). Мы имеем, следовательно, в нашей бутылке кипяток, но кипяток негорячий [93].

3.24. ГЕЙЗЕРЫ И ГЕОТЕРМАЛЬНАЯ ЭНЕРГИЯ

Глубины нашей Земли обладают гигантским запасом тепловой энергии. На земной поверхности эта энергия проявляется в виде вулканической деятельности, землетрясений, перемещения литосферных плит, гейзеров и источников геотермальных вод.

Гейзеры — это периодически фонтанирующие горячие источники, распространенные в областях современной или недавно прекратившейся вулканической деятельности. Слово «гейзер» исландского происхождения; происходит от *geysa*, что означает «хлынуть». Гейзеры располагаются вблизи действующих или сравнительно недавно уснувших вулканов. Поступающая от таких вулканов теплота нагревает почти до кипения подземные воды, которые заполняют трещины и разломы вблизи земной поверхности. Поэтому гейзеры принято рассматривать как вторичные вулканические явления. Гейзеры есть на Камчатке, в одном из районов Тибета на высоте 4700 м, в Исландии, Новой Зеландии и Северной Америке. Небольшие одиночные гейзеры встречаются в некоторых других вулканических областях земного шара. Одним из крупнейших в мире является гейзер Эксельсиор в Йеллоустоне (США): во время извержения струя кипятка диаметром 10 м поднимается на высоту почти 100 м.

Главное, что отличает гейзеры от прочих теплых и горячих геотермальных источников, это периодичность действия. Гей-

зеры — очень редкое и красивое явление природы. Со взрывом и грохотом огромный столб кипящей воды, окутанный густыми клубами пара, взлетает вверх. Фонтан бьет некоторое время, затем исчезает, клубы пара рассеиваются, выплеснутая вода уходит обратно в ствол и наступает покой. Через некоторое время весь процесс повторяется. Что же вызывает извержения гейзеров?

Механизм действия гейзеров впервые был объяснен в XIX в. немецким химиком-экспериментатором **Г. Бунзеном** (1811–1899). Суть его следующая. Типичный гейзер представляет собой канал (ствол) в твердой породе, уходящий в глубину земной поверхности до 1 000 м и заполненный водой. Известно, что температура кипения воды зависит от давления: при понижении давления температура кипения уменьшается, а при повышении — увеличивается (см. ст. 3.17 на с. 305). Так как в стволе гейзера давление больше атмосферного на величину давления столба воды, то температура кипения воды в стволе выше 100 °С. Самая высокая температура кипения, естественно, будет на дне ствола гейзера.

Хотя в промежутках между извержениями температура воды в гейзере постепенно повышается из-за того, что по боковым протокам и снизу в него поступают перегретые от раскаленных пород горячая вода и пар, но вплоть до момента извержения вода в стволе гейзера нигде не достигает температуры кипения. Однако у любого гейзера есть такой уровень по высоте ствола, где нагрев воды происходит в большей степени, чем на других уровнях. Обычно этот уровень расположен где-то ниже середины ствола. Из-за большего нагрева образуется некоторый **затравочный объем воды**, температура в котором лишь на несколько градусов ниже температуры кипения для данного столба воды.

Поступающие в ствол горячая вода и пар толкают воду вверх и наступает такой момент, когда у затравочного объема из-за понижения давления начинается кипение. Образующийся при этом пар еще выше поднимает воду и заставляет ее выливаться в наружный бассейн гейзера. При этом давление на нижние слои воды в стволе еще больше уменьшается, кипение идет все более бурно, паров образуется все больше и

больше, воды выливается из ствола больше и больше, давление в стволе становится все меньше и меньше. Внезапно начинает кипеть вся масса воды, находящаяся в самой нижней части ствола, и верхние слои воды выбрасываются из ствола с громадной скоростью — происходит извержение гейзера. Выброшенная вода снова падает в бассейн, охлаждается и через некоторое время начинает вливаться обратно в ствол, постепенно заполняя его, — извержение кончилось. Следующий выброс начнется только тогда, когда температура воды в стволе приблизится к температуре кипения.

Совсем несложно самому изготовить действующую модель гейзера. Поскольку придется иметь дело с горячей водой и паром, обращаться с искусственным гейзером следует очень осторожно. Нужно взять двухметровую металлическую трубку, установить ее вертикально и заполнить водой. В верхней части трубки следует укрепить сосуд, достаточно большой, чтобы горячая вода не разбрызгивалась, а собиралась в сосуде и могла стекать обратно в трубку. Вся конструкция должна быть надежно закреплена. Для работы такого гейзера необходимы два источника тепла: один внизу, а второй немного ниже середины трубки. В качестве источников тепла можно взять большие консервные банки, наполненные горящими угольками. Для этого в дне банок надо вырезать дыру немного меньшего диаметра, чем диаметр трубки, и, нагрев банки, плотно насадить их на трубку. Если отверстие не слишком велико, а банка хорошо разогрета, то при одновременном нагревании банки и трубки банка будет прочно держаться в том месте трубки, куда ее насадили. Извержение такого гейзера происходит каждые 5–6 мин.

В некоторых странах бесплатное тепло гейзеров и геотермальных источников в настоящее время широко используется. Жители суровой Исландии используют горячие источники для выращивания в теплицах овощей и фруктов. Столица Исландии Рейкьявик и большинство городов и поселков полностью отапливаются водами горячих источников. В России электростанции, работающие от тепла горячих источников, — **геотермальные электростанции** — эксплуатируются на Камчатке и Курильских островах. Первая Паужетская геотермаль-

ная электростанция на юге Камчатки мощностью 5 МВт была введена в эксплуатацию еще в 1966 г. (в последующие годы ее мощность была увеличена до 11 МВт). Общая мощность всех построенных на Камчатке и Курильских островах геотермальных станций в 2009 г. оценивалась в 80 МВт, хотя суммарная мощность разведанных горячих источников здесь оценивается в 1 ГВт. За рубежом геотермальные электростанции построены в Италии (Тоскана, район Лардерелло), Новой Зеландии (зона Таупо), США (Калифорния — Долина Больших Гейзеров) и Японии. Суммарная мощность всех геотермальных электростанций мира в 1980 г. составляла 2 500 МВт, в 2000 г. — около 17 000 МВт.

Геотермальные ресурсы планеты практически безграничны. Однако на современном этапе (пока!) их широкое использование не всегда экономически выгодно [48, 55, 60, 82, 114, 130, 140, 172].

3.25. УДАРЫ В ТРУБАХ ОТОПЛЕНИЯ

Известно, что водяное отопление впервые устроил в 1716 г. в теплице для растений **Мартин Тривальд**, надзиратель угольных копей в Швеции. С 1820 г. такое отопление стали использовать для жилых домов в Англии, затем — в других странах.

Современные системы центрального отопления бывают, как правило, двух типов: **паровые** и **водяные**. В паровых системах теплоносителем является водяной пар, в водяных — нагретая вода. У каждого типа отопления есть свои плюсы и минусы, которые мы сейчас обсуждать не будем.

Самой заметной особенностью системы парового отопления по сравнению с водяной является ее шумность — достаточно часто в трубах и радиаторах возникают звуки, похожие на удары молота. Что вызывает эти звуки?

Звук ударов раздается, когда в трубах и радиаторах скапливается сконденсировавшаяся вода. Горячий пар, проходя над водой, резко охлаждается, и его давление столь же резко падает. Вода втягивается в получившуюся область низкого

давления и «ударяет» по трубе. Чтобы избавиться от этих звуков в трубах парового отопления, нужно сливать накопившийся там конденсат [62, 140].

3.26. О ДЕЙСТВИИ ВЕНТИЛЯТОРА

Вентилятор, установленный в помещении, «гоняет» в жаркую погоду один и тот же горячий воздух помещения. Почему же, тем не менее, человек при работающем вентиляторе все-таки чувствует прохладу?

Чтобы ответить на этот вопрос, необходимо задаться другим вопросом: каковы механизмы ощущения тепла у человеческого организма? Ведь температура поверхности человеческого тела — около $36,7^{\circ}\text{C}$ (вернее, это максимальная из температур; см. табл. 3.3), а комнатный воздух имеет температуру ниже этой. Согласно законам термодинамики непосредственного перехода теплоты из окружающего воздуха в наше тело происходить не может — наоборот, мы должны отдавать тепло и соответственно остывать. Отчего же нам тогда жарко?

Таблица 3.3

**Температура кожи
отдельных участков тела человека**

Участок тела	Температура, $^{\circ}\text{C}$
Ладони рук	32,9
Лоб	33,4
Верхняя часть груди	32,8
Живот	31,1
Шея	34,0
Подмышечная впадина	36,7
Подошва ног	30,2

Главная причина в том, что прилегающий к нашему телу воздух как плохой проводник тепла мешает теплоотдаче, т. е. замедляет потерю нашим телом своего тепла. При этом сам прилегающий слой воздуха нагревается телом и вытесняется вверх более холодным, который в свою очередь также нагревается, уступая место новой порции холодного воздуха, и т. д.

Одной из функций одежды как раз является удержание прогретого слоя воздуха около тела. Уходящая от тела тепловая энергия все время восполняется за счет химических процессов в организме и температура тела практически не меняется.

Итак, в среде с меньшей, чем у нашего тела, температурой мы непрерывно теряем теплоту. Человеческий организм устроен так, что такие потери тепла при температуре окружающей среды 18–21 °С ощущаются нами как вполне комфортные (это при относительной влажности воздуха 85%; см. по этому поводу следующую статью). Это, так сказать, «штатный» режим работы организма — выработка организмом тепла и его потери в точности компенсируют друг друга. Однако при понижении температуры внешней среды ниже этой и соответствующем возрастании теплопотерь наш организм начинает работать в «усиленном» режиме, мобилизовав дополнительные ресурсы для поддержания нормального температурного режима тела. Нами это воспринимается сначала как ощущение прохлады, а потом — и холода. И, наоборот, при повышении температуры внешней среды выше 18–21 °С и соответствующем уменьшении теплопотерь возникает ощущение теплоты, а при еще высоких температурах наш организм должен включить дополнительные механизмы отвода вырабатываемого тепла — в основном, это потоотделение, так как пот (т. е. вода), испаряясь, поглощает большое количество теплоты. При этом возникает ощущение духоты.

При физической нагрузке организм вырабатывает дополнительную энергию, при этом мы чувствуем себя комфортно и при низких температурах. Это продолжается до тех пор, пока не истощатся энергетические запасы организма. Энергию мы восполняем через пищу, поэтому физически работающий человек потребляет больше пищи, чем работающий умственно (см. ст. 2.72 на с. 256).

Теперь можно ответить на заданный в самом начале статьи вопрос. Воздух, которым дует вентилятор, действительно комнатной температуры. А вот воздух, который находится вплотную рядом с кожей, имеет температуру чуть выше комнатной — как уже говорилось, он подогрет теплом человеческого тела. Когда же воздух от вентилятора принудительно сдувает

нагретый воздушный слой от тела, организм человека начинает передавать дополнительные порции тепла окружающему воздуху. Таким образом, искусственно увеличивая тепловые потери организма, мы как бы заставляем организм думать, что температура внешней среды ниже и, соответственно, ощущаем прохладу.

Еще сильнее прохладу можно ощутить, если смочить кожу водой. Тогда, кроме сдувания нагретого воздуха, будет происходить еще и усиленное испарение воды, которому способствует поток воздуха от вентилятора. Поэтому, если даже в жару выйти из душа и направить на себя вентилятор, можно ощутить холод: ведь поток воздуха будет уносить с тела самые «горячие» частицы воды (пар), тем самым понижая среднюю температуру остальных частиц и всего тела. Именно по этой причине больных, чтобы облегчить им боль, порой растирают спиртом — спирт испаряется намного быстрее воды, эффективно охлаждая при этом кожу.

В саунах и банях же, наоборот, окружающий воздух гораздо выше, чем температура кожи (температура воздуха в сауне может достигать 140 °C). Из-за этого прилегающий к человеку слой воздуха холоднее, чем воздух в самой сауне или бане. Не стоит даже пытаться направить на себя такой воздух вентилятором — можно получить ожоги, сдувая с себя более холодный воздух, окутывающий тело. Человек же переносит высокую температуру окружающего воздуха сауны благодаря поту, который интенсивно испаряется с кожи. Известно, что если не пополнять запас жидкости в теле человека, то за одно посещение сауны можно потерять в весе несколько килограммов из-за испарения воды. Поэтому в сауне следует пить больше воды, чтобы восполнить ее расход [79, 95, 98, 106, 114, 137, 140, 210].

3.27. САУНА И ЧЕЛОВЕК

Как указывалось в предыдущей статье, в саунах температура воздуха может достигать 140 °C, что гораздо выше температуры кипения воды; при такой температуре можно запросто готовить яичницу или запекать яйца вкрутую. Каким же обра-

зом человек не только выдерживает эту температуру, но еще получает удовольствие, нисколько не запекаясь? Какую максимальную температуру может вообще выдержать человек?

Температура воздуха в саунах регламентирована в пределах $90\text{--}140^{\circ}\text{C}$ при относительной влажности $5\text{--}15\%$. Это очень низкая влажность, и в ней все дело. Чрезвычайно сухой воздух сауны способствует быстрому испарению воды из тела человека в виде пота. Испаряясь, вода поглощает большое количество тепла (теплоту парообразования) и интенсивно охлаждает тело человека, образуя более холодный воздух, окутывающий человеческое тело. Поэтому-то температура тела человека и держится в узких, дозволенных природой и системой терморегуляции человека рамках даже при более высоких температурах. Естественно, человеку при этом кажется, что температура окружающего воздуха ниже, чем есть на самом деле.

Известен опыт немецких ученых, когда несколько человек пробыли порядка 10 минут при температуре 210°C в очень сухом воздухе (тогда как для того, чтобы поджарить мясо, достаточно температуры $162,8^{\circ}\text{C}$). Установлено, что здоровый человек может терпеть температуру 104°C в течение 26 мин, 93°C — 33 мин, 82°C — 49 мин, а 71°C — 1 час.

Однако достаточно повысить влажность воздуха в сауне, как переносимость температуры резко падает. Поэтому не следует путать финскую сауну с русской баней, где влажность гораздо выше, а температура ниже. Если в сауне вылить на камни достаточное количество воды (что иногда делают не очень грамотные посетители), то запросто можно обжечь всех присутствующих.

Таким образом, наше ощущение температуры окружающего воздуха напрямую связано с его влажностью, и это относится не только к сауне (табл. 3.4).

Кстати сказать, вышесказанное имеет непосредственное отношение к деятельности жилищно-коммунальных хозяйств. По современным жилищным нормам для того, чтобы человек комфортно чувствовал себя в квартире, относительная влажность воздуха f и температура t в ней должны быть согласованы (табл. 3.5). Чтобы обеспечивать такие условия, нормы

Таблица 3.4

**Кажущаяся температура воздуха
в зависимости от реальной температуры t
и относительной влажности f**

$f, \%$	$t, ^\circ\text{C}$										
	21	24	27	29	32	35	38	41	43	46	49
0	18	21	23	26	28	31	33	35	37	39	42
10	18	21	24	27	29	32	35	38	41	44	47
20	19	22	25	28	31	34	37	41	44	49	54
30	19	23	26	29	32	36	40	45	51	57	64
40	20	23	26	30	34	38	43	51	58	66	
50	21	24	27	31	36	42	49	57	66		
60	21	24	28	32	38	46	56	65			
70	21	25	29	34	41	51	62				
80	22	26	30	36	45	58	69				
90	22	26	31	39	50	66	77				
100	22	27	33	42	56	74					

жилищного строительства предусматривают на одного человека не менее 10–12 м³ жилого помещения и скорость вентиляции 250 л/мин.

Таблица 3.5

**Нормы комфорта для нормально
прветриваемых жилых помещений**

$t, ^\circ\text{C}$	20	25	30	35
$f, \%$	85	60	44	33

Что же касается варки яиц в сауне, то это вполне возможно, причем на той же полке, где вы сидите сами. Обычно это изумляет всех присутствующих, а яйца получают-ся очень вкусными — с крутым желтком и мягким белком [11, 43, 77, 98, 106, 114].

3.28. КАК ВЫСУШИТЬ БАНЮ

Чтобы высушить парилку в бане, нередко открывают в ней окошко, устраивают сквозняк, особенно в мороз. Пар так и

валит снаружи внутрь помещения. Как же может этот пар осушить и без того влажное помещение парилки?

Здесь хитрость в том, что внешний воздух всегда холоднее воздуха в парилке. Поэтому абсолютная влажность его невысока по сравнению с горячим и влажным воздухом парилки. Впуская наружный воздух в парилку, мы заменяем влажный воздух на сухой, содержащий в себе мало влаги по абсолютной величине. Нагревшись в парилке, воздух приобретает крайне низкую относительную влажность, т.е. водяной пар очень сильно отдалается от состояния насыщения. При этих условиях, естественно, вода начинает интенсивно испаряться, чтобы восстановить динамическое равновесие с паром. Испаряются все лужи на полатах, простыни становятся сухими. Парилка снова готова к приему гостей.

Еще одно существенное замечание. Пар, который валит в парилку из окошка, — это не влага, пришедшая снаружи. На самом деле холодный воздух с улицы охлаждает воздух парилки вокруг себя и сильно повышает его относительную влажность, доводя его до точки росы. Поэтому невидимый нам до этого пар (см. ст. 3.5) тут же конденсируется в туман, который мы почему-то называем паром. Если приглядеться внимательно, то видно, что туман образуется вокруг входящего в окошко холодного воздуха, а сам морозный воздух — в центре потока — прозрачен [43].

3.29. ПРОДУКТЫ И ХОЛОДИЛЬНИК

Наверняка дома вы замечали одну особенность холодильников — в них продукты обычно сохнут быстрее, чем на открытом воздухе. Почему?

Кто прочитал предыдущую статью, наверное уже догадался, в чем дело. У холодильников морозильная камера обычно расположена наверху. Охлажденный возле камеры воздух как более тяжелый опускается вниз и, соприкасаясь со стенками холодильника и с продуктами, нагревается. При этом его относительная влажность уменьшается, а способность вбирать в себя воду увеличивается (см. ст. 3.7 на с. 285). Нагревшись и отобрав часть воды у продуктов, воздух опять поднимается

к морозильной камере. Здесь он охлаждается до первоначальной температуры, при этом его относительная влажность оказывается выше первоначальной (из-за отобранной у продуктов воды). Через некоторое количество циклов влажность воздуха возрастает настолько, что, подойдя к морозильной камере, воздух будет вынужден оставить часть воды на камере в виде «осадка» — капелек воды или кристалликов льда. Так с помощью воздуха вода «перекочевывает» от более теплых тел к более холодным — от продуктов к морозильной камере.

Но не только вода в холодильнике переносится — при этом происходит и более эффективная перекачка тепла: при испарении некоторое количество теплоты отбирается от продуктов и передается воздуху, а при конденсации у морозильной камеры оно отбирается от воздуха и передается морозильной камере. С этой точки зрения сухие продукты в холодильнике охлаждаются гораздо медленнее, чем влажные [11, 55].

3.30. СТРАННЫЙ ВЕТЕР

В некоторых странах, на территории которых имеются горные массивы, существуют ветра, спускающиеся с гор. Эти ветра настолько примечательны, что имеют собственные имена, например, «Чинук» и «Санта-Ана» в США, «Фен» в Швейцарии, «Каччан» в Шри-Ланке, «Берг» в Южной Африке. Самое странное в них то, что они в прямом смысле горячие — температура в зоне этих ветров может на 30°C превышать температуру окружающего воздуха, а скорость достигает 130 км/ч , к тому же они очень сухие. Кажется непонятным, почему теплый сухой ветер спускается с холодных гор? Ведь теплый воздух должен подниматься вверх, не так ли?

На самом деле необходимо рассматривать не только спускающийся с горы ветер, но и процессы, происходящие у горы с другой стороны. На другой же стороне, как правило, происходит следующее. Там тоже дует ветер, но уже в сторону горы, причем этот ветер должен быть достаточно влажным. Если на пути потока воздуха (ветра) встречается горный массив и другого пути нет, то воздушный поток отклоняется вверх. При подъеме атмосферное давление падает (вспомните

барометрическую формулу) и из-за небольшого теплообмена с окружающей средой воздушные массы ветра практически адиабатически расширяются и, соответственно, охлаждаются. При этом водяные пары в ветре достигают состояния насыщения (точки росы) и на склонах горы выпадают обильные осадки. Дошедшие до вершины воздушные массы холодны и имеют очень маленькую абсолютную влажность. Так как сзади их «подпирают» другие порции поднимающегося воздуха, то они начинают спуск по другой стороне горы. Но по мере спуска начинает расти атмосферное давление и движущиеся массы воздуха адиабатически сжимаются и, вследствие этого, нагреваются. Этот ветер будет уже довольно сухим, так как при повышении температуры при неизменной абсолютной влажности относительная влажность уменьшается [140].

3.31. СНЕГ

Снежинки развиваются из мелких ледяных кристалликов, имеющих во многих типах облаков (см. ст. 3.11 на с. 294). Такие кристаллики имеют форму шестигранных призм, и в процессе своего движения внутри облака они растут за счет непосредственного перехода водяного пара в твердую фазу. Как именно происходит этот рост, зависит от внешних условий, в частности от температуры и влажности воздуха. В одних условиях ледяные шестигранники усиленно растут вдоль своей оси, и тогда образуются снежинки вытянутой формы — снежинки-столбики и снежинки-иглы. В других условиях шестигранники растут преимущественно в направлениях, перпендикулярных к их оси, и тогда образуются снежинки в виде шестиугольных пластинок и шестиугольных звездочек. При падении к снежинке правильной формы может примерзнуть капелька воды, в результате образуются снежинки неправильной формы. При определенных условиях (требуется, в частности, чтобы не было ветра) падающие снежинки сцепляются друг с другом, образуя огромные снежные хлопья диаметром до 10 см и даже больше.

Мы видим, таким образом, что распространенное мнение, будто снежинки обязательно имеют вид шестиугольных

звездочек, является ошибочным — формы снежинок оказываются весьма разнообразными.

Сразу после выпадения в тихую погоду снег имеет плотность 30–60 кг/м³. Плотность свежего снега, выпавшего во время метели, в несколько раз выше: 100–200 кг/м³. У слежавшегося снега плотность возрастает до 300 кг/м³, а у снега, длительное время подвергавшегося действию ветра, она достигает 400–500 кг/м³. При оттепелях снег оседает и еще более уплотняется. Совместное действие оттепелей и ветров, а также давление постепенно нарастающих слоев снега на нижние слои может привести к образованию так называемого **снежника** (или **фирна**), имеющего плотность от 500 до 800 кг/м³.

Свежевыпавший снег представляет собой довольно рыхлую «постройку», пронизанную воздушными промежутками. Это обуславливает плохую проводимость тепла (см. ст. 1.30 на с. 64). Снежинки, оказавшись вместе, начинают довольно активно взаимодействовать друг с другом, поэтому свойства свежевыпавшего снега изменяются с течением времени. Так, внутри снега происходит испарение (сублимация) льдинок, причем в первую очередь испаряются острые концы снежинок, острые выступы, более мелкие снежинки (о том, почему испарение идет интенсивнее с выпуклых поверхностей, см. ст. 3.10 на с. 291). Пар в воздушных промежутках между снежинками довольно быстро становится насыщенным и в результате активизируется обратный процесс — переход пара в твердое или жидкое состояние. Этот процесс, наоборот, активнее идет на менее выпуклых, а еще лучше — на вогнутых поверхностях (см. там же). В целом же получается такая картина: исчезают острые концы у снежинок, зато нарастает лед в центре снежинок; исчезают мелкие снежинки, зато еще более укрупняются большие снежинки. При этом между снежинками возникают многочисленные ледяные мостики. Это ведет к уменьшению воздушных промежутков в снеге. В итоге снег делается плотнее и прочнее — снег твердеет и, наконец, может стать фирном.

Рассмотренные процессы будут неизбежно происходить в снежном покрове — лишь бы он пролежал достаточно долго.

Эти процессы ускоряются кратковременными оттепелями, и на них, разумеется, влияют ветры [16, 130].

3.32. СНЕГ, СОЛНЦЕ И ТЕПЛО

Как вы думаете, почему зимой становится теплее, когда идет снег?

Вообще говоря, воздух (т.е. атмосфера) нагревается по нескольким причинам: 1) за счет поглощения энергии солнечного излучения; 2) за счет поглощения тепла от земной поверхности; 3) за счет получения тепла при испарении и последующей конденсации водяного пара.

Подсчитано, что площадка размером 1 см^2 , поставленная перпендикулярно солнечным лучам за пределами земной атмосферы, получает в 1 с количество теплоты, равное 8,1 Дж. Это так называемая **солнечная постоянная**, не зависящая от времени года. Часть энергии солнечных лучей отражается атмосферой обратно в межпланетное пространство, часть (около 15%) — поглощается атмосферой и часть — достигает поверхности Земли и поглощается ею. В среднем за сутки каждый квадратный сантиметр земной поверхности поглощает около 4 кДж солнечной энергии и столько же излучает обратно (тепловой баланс).

Будучи нагретой, атмосфера сама излучает энергию (см. ст. 2.62 на с.237). Часть атмосферного излучения приходит обратно к Земле и поглощается ею почти целиком (парниковый эффект; см. ст. 2.62 на с.237). Излучение атмосферы сильно возрастает с увеличением облачности и поэтому облачность — одно из объяснений того, что становится теплее, когда идет снег.

С другой стороны, если из облака пошел снег, то образующиеся и падающие снежинки начинают собирать на себя воду, находящуюся в воздухе. При этом размеры снежинок растут, а выделившаяся при кристаллизации теплота нагревает воздух — это вторая причина потепления при выпадении снега.

Кстати, описанный выше эффект переизлучения облаками энергии используют садоводы, если ночью или утром

ожидаются заморозки (по поводу предсказания заморозков см. ст. 3.50 на с. 358). Для этого они в конце дня по участку расставляют дымящиеся жаровни или разводят маленькие дымящиеся костры. Создаваемый дым (как облако) поглощает излучаемое землей тепло и переизлучает его обратно на землю. Поэтому тепло сохраняется в пространстве между дымом и землей, и участок охлаждается не так сильно, как в том случае, когда излучаемое землей тепло беспрепятственно уходит в атмосферу. Кроме того, частички дыма служат центрами образования тумана, что тоже приводит к повышению температуры (см. ст. 3.10 на с. 291) [9, 11, 130, 140, 144].

3.33. ПОЧЕМУ СНЕГ СКИПИТ!

Иногда снег скрипит под ногами, но это бывает лишь в те дни, когда температура воздуха существенно ниже нуля. Что создает звук и почему его возникновение зависит от температуры?

Скрипит снег или нет — зависит от того, плавятся (тают) снежинки под ногами или ломаются. Плавление является фазовым переходом 1-го рода, сопровождающимся поглощением теплоты.

Температура, при которой у веществ происходит фазовый переход 1-го рода (в частности, плавление), зависит от давления. Эта зависимость определяется решением **уравнения Клапейрона—Клаузиуса**

$$\frac{dT}{dp} = \frac{T_{\text{пер}}(V_2 - V_1)}{\Delta Q_{\text{пер}}},$$

где $\Delta Q_{\text{пер}}$ — теплота фазового перехода (**скрытая теплота перехода**); $T_{\text{пер}}$ — температура перехода; $(V_2 - V_1)$ — изменение объема вещества при фазовом переходе.

Так вот, для большинства веществ с увеличением давления температура плавления тоже повышается: $dT/dp > 0$. Это связано с тем, что для разрушения кристаллической решетки при плавлении атомы нужно отделить друг от друга. Возрастаю-

щее же внешнее давление сближает молекулы между собой, что требует для их отделения друг от друга бóльшей энергии теплового движения, что, соответственно, означает более высокую температуру плавления. При этом, естественно, объем получившейся жидкости будет больше объема твердого тела.

Однако вода относится к «ненормальным» (вернее, аномальным) веществам (а также висмут, сурьма, германий, чугун) и температура плавления (т.е. таяния) льда тем ниже, чем выше давление: $dT/dp < 0$. «Ненормальность» обусловлена тем, что при таянии льда его объем не увеличивается, как у большинства веществ, а уменьшается ($V_2 < V_1$) в силу особого строения его кристаллической решетки (см. ст. 4.1 на с. 370). Таким образом, повышение давления не затрудняет, а, наоборот, помогает льду превращаться в жидкость.

Снег — это тот же самый лед, но в виде совокупности отдельных кристалликов. При ходьбе вес человека через подошвы ног передается снегу в виде повышения давления, что приводит к смещению точки плавления снега вниз и его таянию.

Однако такое положение дела справедливо лишь до определенной температуры — при более низких температурах веса человека уже не хватает для смещения точки плавления льда ниже этой температуры. Поэтому лед уже не тает под ногами, а разрушается механически (трескается), что воспринимается нами как скрип снега. Вышесказанное является также причиной того, что снежок нельзя слепить при достаточно низкой температуре.

Не надо думать, однако, что под достаточным давлением можно заставить лед таять при сколь угодно низкой температуре: более чем на 22 градуса понизить ее нельзя, что соответствует максимальному давлению 2080 атм. Следовательно, лед ни под каким давлением не может плавиться при температуре ниже -22°C . Объясняется это тем, что под давлением свыше 2080 атм лед превращается в другую разновидность, более плотную, чем обыкновенный лед (см. ст. 5.25 на с. 504), и, следовательно, занимающую мёньший объем; давление уже не помогает такому льду переходить в жидкое состояние [55, 95, 140].

3.34. ПОЧЕМУ КОНЬКИ СКОЛЬЗЯТ ПО ЛЬДУ?

Причиной скольжения коньков по льду является вся та же «ненормальность» льда (см. ст. 3.33) — температура плавления льда тем ниже, чем выше давление. Известно, что для понижения точки таяния льда на один градус требуется давление в 130 атм. Поэтому, чтобы кататься на коньках при морозе, например, в -5°C , конькобежец должен оказывать на лед давление не менее $5 \cdot 130 = 650$ атм. Такое давление приводит к смещению точки плавления льда вниз и к частичному его таянию. Образовавшаяся вода и служит хорошей смазкой для скольжения коньков. К тому же современные исследования показывают, что поверхность льда при любой температуре всегда (!) содержит тончайший слой воды (это граничное нарушение кристаллической структуры на поверхности льда). Другой (менее существенной) причиной образования воды для смазки является, по всей видимости, трение полозьев коньков об лед.

Внимательный читатель по поводу вышесказанного может заметить одну неувязку. Можно взять любые коньки и обнаружить, что суммарная поверхность контакта лезвий коньков со льдом никак не меньше нескольких квадратных сантиметров, поэтому при массе конькобежца, скажем, 70 кг давление на лед должно быть равно

$$p = \frac{mg}{S} = \frac{70 \cdot 9,8}{2 \cdot 10^{-4}} \approx 3\,500\,000 \text{ Па} = 35 \text{ атм.}$$

Следовательно, давление конькобежца на лед во много раз меньше того, какое необходимо для понижения точки таяния льда на 5 градусов. Тогда непонятно, почему при данной температуре (5°C) коньки, тем не менее, хорошо скользят по льду.

Однако никакого противоречия нет — просто мы ошиблись в оценке размера поверхности, по которой лезвие конька соприкасается со льдом. На самом деле и поверхность лезвия, и поверхность льда не являются абсолютно гладкими — на них всегда имеются микроскопические выступающие ча-

сти (их можно увидеть под сильным микроскопом). Поэтому соприкосновение со льдом происходит не по всей видимой поверхности лезвия конька, а лишь в выступающих точках, совокупная площадь которых, по-видимому, не превышает 10 мм^2 . При таком условии давление веса конькобежца составляет не менее

$$p = \frac{70 \cdot 9,8}{1 \cdot 10^{-6}} \approx 700\,000\,000 \text{ Па} = 700 \text{ атм},$$

т.е. не меньше величины того порядка, при котором осуществляется требуемое теорией понижение температуры таяния льда.

Вышесказанное объясняет также тот факт, что кататься легче на шероховатом льду, чем на гладком. Даже если вы никогда не катались на коньках, вы могли замечать, что тащить санки легче на бугристой ледяной поверхности, чем на абсолютно плоской.

Если мороз очень сильный, то давление коньков оказывается недостаточным для понижения температуры таяния льда на необходимое число градусов. И тогда катание на коньках затрудняется — из-за отсутствия водяной смазки заметно возрастает трение.

Другие твердые вещества, в отличие от льда, не тают под давлением, поэтому кататься по ним на коньках нельзя.

Кстати, лыжи и коньки были придуманы человеком очень давно. Первое документальное свидетельство об этом было найдено в 1960 г. в России неподалеку от Уральских гор: в торфяном болоте были обнаружены обломки деревянных лыж каменного века, сделанных не менее 8 тыс. лет назад. О том, что лыжи играли существенную роль в жизни людей каменного века, свидетельствует тот факт, что передний конец лыж имел великолепную резьбу в форме головы лося. Древние коньки обычно были уменьшенным вариантом лыж и требовали использования палок при движении. С 1 тысячелетия до н.э. и до средневековых времен они делались из кости, потом появились более современные варианты железных коньков, закрепленных на деревянной обуви.

Еще один факт: сползание ледников с гор имеет тот же физический механизм, что и скольжение коньков по льду.

Нижние слои ледника тают под давлением вышележащих масс льда и образуют смазку, из-за чего формируется медленно стекающая «ледяная река» [11, 50, 55, 73, 86, 92, 95, 138, 140].

3.35. ЛЕД ПОД НАГРУЗКОЙ

В домашних условиях совсем несложно провести опыт, который наглядно и эффектно показывает смещение температуры таяния льда под давлением. Для этого вам понадобится ледяной брусок. Изготовить его можно в морозильнике бытового холодильника, поставив туда сосуд с водой соответствующей формы.

Приготовленный ледяной брусок обоприте на края двух табуреток. Поперек бруска перекиньте петлю из тонкой стальной проволоки, к концу которой необходимо подвесить какую-нибудь тяжелую вещь массой 5–10 кг. Теперь под давлением груза проволока врежется в лед, за счет этого лед под проволокой начнет таять (как лед под коньками) и проволока медленно пройдет через весь брусок.

Но самое интересное в этом опыте — брусок при этом не распадается на две части, а снова смерзается в одно целое, словно его и не разрезали. Разгадка этого в том, что, хотя под давлением проволоки лед тает, но образующаяся талая вода, перейдя поверх проволоки и освободившись там от давления, тотчас замерзает. Короче говоря, пока проволока режет нижние слои, верхние снова замерзают, потому что температура окружающего льда ниже нуля градусов. Такое явление называется **режеляцией**, которое расшифровывается как «регенерация льда», «восстановление льда». Режеляция играет важную роль в объяснении движения ледников, сползающих по горным склонам.

Лед — единственное вещество в природе, с которым можно проделать подобный опыт.

Кстати, необходимо заметить, что для опыта выгодно брать именно железную проволоку. Дело в том, что для плавления льда необходима энергия. Вследствие хорошей теплопроводности железа к нему все время будет подводиться необходи-

мое количество теплоты от окружающего воздуха, и процесс разрезания льда будет сравнительно быстрым. Теплопроводность же других материалов (например, капрона) невелика, и здесь процесс разрезания льда будет идти крайне медленно [30, 31, 94, 97, 130, 131, 138, 147].

3.36. СНЕГ И СОЛЬ

Зачем посыпают солью лед на дорогах в зимний период? По-видимому, вы ответите: чтобы понизить температуру замерзания. Да, это так. Но каким образом это может сделать соль?

У смесей нескольких веществ есть одна интересная закономерность: температура плавления (кристаллизации) смеси всегда ниже, чем температура плавления каждого из чистых веществ по отдельности (см. ст. 3.57). Такое явление обозначается термином **эвтектика**. Так, для нашего случая температура плавления чистого льда 0°C . Однако, если растворить в воде поваренную соль, то раствор начинает кристаллизоваться при более низких температурах. Температура кристаллизации смеси зависит от соотношения воды и соли. Известно, что самую низкую температуру кристаллизации (или плавления) $-21,2^{\circ}\text{C}$ смеси воды и соли можно получить при концентрации соли 23,3%.

Таким образом, посыпав лед (стабильный при температуре ниже нуля) солью, мы получаем смесь, которая начинает плавиться. При этом отбирается теплота от прилегающего воздуха (из-за этого стоять на солевой каше холоднее, чем просто на льду). Также понятно, что при температурах ниже $-21,2^{\circ}\text{C}$ никаким образом солью невозможно растопить лед, и ее бессмысленно разбрасывать на тротуары (сейчас для этих целей используют специальные химические реагенты, имеющие более низкую температуру плавления; см. табл. 3.6).

Кстати, рассмотренное явление лежит в основе работы простейших холодильников (обкладывание емкостей смесью соли и льда). Можно проделать простейший опыт, который показывает, насколько эффективным может быть такой холодильник. Для опыта в большую кастрюлю наберите снега и

Таблица 3.6

**Температура замерзания растворов
противогололедных реагентов**

Концентрация, %	Тем-ра замерзания, °C			
	NaCl	CaCl ₂	MgCl ₂	KCl
2	-1,2		-1,1	-0,9
4	-2,45		-2,3	-1,9
6	-3,75		-3,7	-2,8
8	-5,11		-5,5	-3,8
10	-6,62	-7	-7,7	-4,8
12	-8,28	-9	-10,1	-5,9
14	-10,0	-11	-13,4	-7,0
16	-11,9	-13	-17,4	-8,2
18	-14,0	-17	-22,6	-9,6
19,74				-10,7
20	-16,3	-20	-29,0	
21		-22	-33,5	
22	-19,0	-24		
23,3	-21,2			
24		-29		
26		-35		
28		-43		
29,6		-51		

внесите в теплое помещение. Разлейте по поверхности табуретки немного воды и на образовавшуюся лужицу поставьте кастрюлю со снегом. Бросьте в кастрюлю горсть соли, хорошенько перемешайте ее со снегом и оставьте кастрюлю в покое. Через некоторое время вы обнаружите, что кастрюля примерзла к табуретке — и это в теплом помещении! А все дело в том, что соль понизила температуру плавления снега, поэтому снег начал таять в бóльшем объеме, чем просто от теплого воздуха комнаты. Для плавления снега нужна теплота, которая берется от воздуха и разлившейся воды на табуретке.

Так что, если вам необходимо приготовить мороженое в отсутствие морозильника, достаточно емкость со смесью из сливок, сахара и фруктового сока поставить в кастрюлю со

снегом и солью. Летом, конечно, достать снег затруднительно (раз у вас нет морозильника), зато зимой — без проблем.

Добавка соли также повышает температуру кипения воды (см. ст. 3.23 на с. 312): чтобы преодолеть притяжение к молекулам соли, молекулам воды приходится двигаться значительно быстрее — только тогда они смогут оторваться и перейти в пар.

Понижение температуры замерзания лежит и в основе действия **антифризов** в автомобильных радиаторах. Автомобильные антифризы состоят из этиленгликоля и воды. Этиленгликоль, помимо понижения температуры замерзания, также приводит к повышению температуры кипения охлаждающей жидкости, что является дополнительным преимуществом при эксплуатации автомобилей в теплое время года [30, 31, 55, 77, 140, 191, 204].

3.37. ПРЕСНАЯ ВОДА ИЗ МОРСКОГО ЛЬДА

Жители Севера знают, что свежезамерзший морской лед слишком соленый, чтобы растапливать его на воду для питья; для этой цели хорош только старый, многолетний лед. Почему соленость замерзшей воды уменьшается со временем?

Когда начинает замерзать соляной раствор (см. ст. 3.36), на самом деле начинает кристаллизоваться чистая вода и в растворе появляются кристаллики чистого льда. Оставшийся раствор становится все более и более концентрированным и поэтому имеет все более низкую температуру кристаллизации — весь процесс замораживания затормозится. Связано это с тем, что кристаллическая решетка льда может образоваться лишь из атомов кислорода и водорода — она не допускает замены этих атомов какими-либо другими. Поэтому сами кристаллы льда — это всегда чистый лед, независимо от того, из какой воды он образовался, пресной или соленой. Все это приводит к тому, что окончательно замерзший соляной раствор представляет собой чистый лед, по объему которого распределены своеобразные **солевые ячейки** с незамерзшим солевым раствором.

Все сказанное можно проверить в домашних условиях: достаточно налить в кружку солевой раствор и поставить его в морозильную камеру домашнего холодильника — вы увидите, что образуется своеобразная «ледяная каша».

Процесс «обессоливания» льда происходит двумя путями. Во-первых, так как плотность солевого раствора больше, чем у чистой воды, то солевые ячейки с течением времени перемещаются вниз под действием силы тяжести. Во-вторых, они также перемещаются и в направлении, где вследствие постоянного подтаивания и подмерзания льда температура наиболее высокая. Это можно понять следующим образом. Рассмотрим некую произвольную солевую ячейку, расположенную внутри глыбы. Соленость раствора в ней такова, что его температура примерно равна средней температуре окружающего льда. Обычно более высокую температуру имеет самая нижняя часть ледяной глыбы, так как она либо плавает в океане (а океан теплее окружающего воздуха), либо лежит на земле (земля также теплее окружающего воздуха). Поэтому в нижней (более теплой) части рассматриваемой солевой ячейки соленость в результате подтаивания льда уменьшается, а в верхней же (более холодной) части ячейки соленость увеличивается вследствие замерзания льда.

Все это приводит к тому, что солевая ячейка постепенно перемещается в низ ледяной глыбы и со временем выходит из нее. В результате перемещения солевых ячеек лед примерно через год становится пригодным для получения питьевой воды, а через несколько лет почти полностью лишается соли. По этой причине, между прочим, воды Антарктики обладают повышенной соленостью относительно среднемирового уровня, а из многолетнего антарктического льда получается практически пресная вода [5, 130, 140].

3.38. ЗВУКИ ЛЬДА

Если бросить кусок льда в воду, то можно услышать вначале потрескивание, а затем такой звук, как будто что-то жарится на сковородке (впрочем, не всякий лед производит «звук сковородки»). Откуда возникают эти звуки?

Потрескивание обусловлено тем, что из-за конечного значения теплопроводности лед нагревается неравномерно: сначала температура повышается на внешних слоях льда, затем тепло начинает распространяться вглубь. Из-за возникающего градиента температуры тепловое расширение льда в различных точках различно, что ведет к появлению механических напряжений и, соответственно, к раскалыванию льда (лед очень хрупок). Шипение же связано с воздушными пузырьками, заключенными внутри льда, которые лопаются, когда в результате таяния льда «выбираются» на поверхность воды. Если таких пузырьков нет, то лед при таянии будет только потрескивать.

Кстати, айсберги, попадая при дрейфе в южные моря, начинают подтаивать и тоже потрескивают. Их треск часто слышен на судах и подводных лодках, и его называют «айсберговой шипучкой».

Еще более удивительные вещи описал норвежский полярный исследователь **Ф. Нансен** (1861–1930): полярные льды в напряженном состоянии «кричат». Когда начинается деформация льда, возникает легкий треск и стон; усиливаясь, они переходят через все роды тонов — лед то плачет, то стонет, то грохочет, то ревет; постепенно возрастая, его «голос» становится подобным звучанию всех труб органа. Перед разрушением, при критических напряжениях, лед звенит, вздыхает, ухает [101, 140].

3.39. КАК СОХРАНИТЬ ЛЕД!

Знаете ли вы способ как можно дольше сохранять лед в теплой обстановке?

На самом деле ничего сложного здесь нет — достаточно завернуть лед в газету. Обычно вода, образующаяся при таянии льда, сразу стекает с него. Когда же лед завернут в мокрую газету, тепло извне должно пройти через слой «задержанной» газетой воды, поэтому его поступление ко льду уменьшается. К тому же испарение самой «газетной» воды отбирает тепло от льда и создает вокруг паровую оболочку, а газы (пар — это газ), как мы знаем, плохие проводники тепла.

В старину, когда не было холодильников, единственным способом долговременного хранения скоропортящихся продуктов было содержание их в специальных погребах-ледниках. Лед заготавливался загодя, зимой. Летом же лед сверху насыпали опилками или соломой и, таким образом, он дольше сохранялся и его практически хватало до следующей зимы. За счет льда температура в этих погребах поддерживалась на уровне 0 °С. Если же температуру надо было понизить, то достаточно было насыпать лед солью (см. ст. 3.36). Однако это считалось большой роскошью, так как соль была слишком дорога.

Первое документальное свидетельство сооружения ледников на Ближнем Востоке (в Месопотамии) датируется 1700 г. до н.э. Ледохранилища представляли собой глубокие ямы, заполненные снегом и прикрытые соломой. Снег доставлялся с гор на ослах. Верхний слой снега в яме мог растаять, но снова замерзал по мере просачивания воды внутрь: под давлением снежной массы нижний слой снега превращался в лед.

Такая же технология сохранения льда использовалась и в Китае.

После походов Александра Македонского (IV в. до н.э.) традиция хранения льда в ямах из Ближнего Востока перешла в Грецию, а потом — в Древний Рим. Известно, что в период ранней Римской империи (I в. н.э.) ни одно пиршество не обходилось без щедро предлагаемого гостям льда или снега, который те могли бросать в вино [50, 140].

3.40. ВОДА И ПОГРЕБ

Деревенские жители знают, что оптимальная температура хранения картофеля в погребе — это 2–5 °С при относительной влажности воздуха 85–95%. При пониженной влажности картофель начинает сохнуть, а слишком высокая влажность может привести к образованию конденсата, что приводит к гниению и преждевременному прорастанию клубней. Каким же образом можно, хотя бы в определенных пределах, поддерживать требуемые условия для картофеля и, вообще, для овощей?

Издавна для этих целей использовался большой таз с водой, который ставился в погребе рядом с овощами. При приближении температуры воздуха в погребке к 0°C таз с водой, отдавая тепло, смягчал температурный режим. Когда же внешняя температура опускалась еще больше, вода в тазе начинала превращаться в лед, при этом выделялось довольно большое количество теплоты (скрытая теплота кристаллизации), благодаря чему дальнейшее охлаждение помещения опять задерживалось. Конечно, таким образом микроклимат в погребке можно было поддерживать только до определенных пределов, однако во многих случаях это спасало сельхозпродукцию [140, 177].

3.41. ХОЛОДИЛЬНИК НА СКОРУЮ РУКУ

Рассматриваемые в этой статье простейшие холодильники основаны на испарении воды. Конечно, такие холодильники будут менее эффективными, чем настоящие «заводские» (см. ст. 2.20 на с. 141), однако для их работы не требуется электричества. И использовать их можно не только дома, но и на даче, и в походе.

Первый такой холодильник представляет собой таз с водой, в который установлено ведро с плотной крышкой. Ведро накрыто тканью, хорошо проводящей воду, например, вафельным полотенцем. Вода поднимается по капиллярам ткани и испаряется. Испаряясь, она отнимает тепло у окружающего воздуха и у ведра, которое находится под тканью. Вода обладает уникально высокой теплотой испарения (2,26 МДж/кг) и, кроме того, температура испаряющейся воды при хорошем обдуве (ветре) практически равна температуре **точки росы**, поэтому в ведре поддерживается именно эта температура. А она, как правило, на 10–15 градусов ниже, чем температура окружающего воздуха. И продукты, находящиеся в ведре, также охлаждаются, что значительно продлевает их годность. Такой холодильник надо устанавливать на сквозняке и в тени, тогда он будет работать с максимальной эффективностью. Изготовить такой холодильник — 10 минут.

Если в жаркий летний день в квартире неожиданно сломался холодильник, то что следует сделать, чтобы лежавший в нем кусок масла не растаял? Конечно же, мы теперь знаем ответ: необходимо поставить ее в неглубокую миску с водой, предварительно обмотав куском марли. Мокрая ткань, с поверхности которой интенсивно испаряется вода, охлаждает гораздо эффективнее, чем просто холодная вода.

Авторами следующей (но подобной предыдущему) холодильной схемы считаются гончары Древнего Египта и Ближнего Востока (Месопотамии). Давно известно, что в изготовленных ими кувшинах вода остается холодной даже в самую жаркую погоду. А все из-за того, что стенки изготовленных кувшинов имеют мельчайшие отверстия — поры. Сквозь поры просачивается вода, которая в жару быстро испаряется. Тепло, необходимое для испарения, вода отбирает у самого кувшина, охлаждая его. Чем суше и жарче воздух, тем интенсивнее идет испарение, тем сильнее охлаждается кувшин. Чтобы получить пористый черепок, мастера смешивали глину с порошком, выгорающим при обжиге, — костной мукой или угольной пылью. Однако почти такого же эффекта можно достичь, если кувшин изготовлен из плохо обожженной глины.

И третья схема из этой серии холодильников, которая до сих пор используется коренным населением африканских пустынь, — это пара вложенных друг в друга глиняных горшков, пространство между которыми заполнено мокрым песком. Влага из песка, медленно испаряясь, охлаждает внутренний горшок, заполненный, например, овощами. Использование такого холодильника позволяет в несколько раз продлить срок хранения овощей.

Использованный в рассмотренных холодильниках принцип работы — испарение воды — в цивилизациях Древнего мира находил даже более широкое применение: его использовали для охлаждения (кондиционирования) жилых помещений. Так, древние персы в сильную жару набрасывали на шатры периодически увлажняемый войлок, испарение с которого эффективно охлаждало внутренний объем. Современными учеными подсчитано, что тепло, поглощаемое при испарении 1 кг воды, эквивалентно охлаждению 100 м³ сухого возду-

ха на 18°C . В настоящее время этот принцип охлаждения воздуха в помещениях возрождается на новом качественном уровне с использованием новейших капиллярно-пористых материалов [11, 30, 31, 50, 62, 78, 177].

3.42. БЫСТРАЯ ГОРЯЧАЯ ВОДА

Вода замерзает при 0°C . Однако знаете ли вы, что горячая вода, выставленная в мороз на улицу, может замерзнуть скорее, чем холодная? Возможно, вам это покажется вздором, однако это отнюдь не сказки — вы легко можете проверить сами. Для этого наполните два сосуда теплой и холодной водой и поставьте их в морозный день за окно (или в морозилку холодильника).

Определяющим фактором здесь является **испарение**. Если одинаковые массы горячей и холодной воды выставить на мороз в открытых сосудах, то более сильное испарение горячей воды приведет к тому, что ее масса уменьшится скорее. В результате эта вода будет остывать быстрее, чем холодная, и соответственно скорее достигнет точки замерзания.

В действительности скорость остывания также зависит частично от материала сосудов, чистоты воды, циркуляции воздуха над поверхностью воды в сосудах и от циркуляции самой воды.

Если подвергнуть медленному охлаждению очень чистую дистиллированную воду, то она может оставаться жидкой и при температуре в несколько градусов ниже нуля. Однако, если в эту переохлажденную воду бросить маленький кусочек льда, щепотку снега или просто пыли, вода мгновенно замерзнет, прорастая по всему объему длинными кристаллами. Столь странное поведение воды объясняется особенностями процесса кристаллизации: превращение жидкости в кристалл происходит в первую очередь на примесях и неоднородностях — **центрах кристаллизации** (частичках пыли, пузырьках воздуха, царапинах на стенках сосуда). Чистая вода центров кристаллизации практически лишена, поэтому она может переохлаждаться (и довольно сильно), оставаясь жидкой. Известен случай, когда содержимое хорошо охлажденной

в морозильнике бутылки нарзана, открытой жарким летним днем, мгновенно превратилось в кусок льда. В лабораторных условиях температуру воды, правда, в очень малых объемах, удавалось довести до -70°C .

Поэтому с первого раза предложенный выше опыт у вас может и не удастся — придется поэкспериментировать с сосудами различной формы, разных материалов и водой различного состава [62, 64, 79, 140].

3.43. ЗАМЕРЗАЮЩИЙ ВОДОЕМ

Почему водоемы замерзают прежде всего на поверхности?

Причин здесь несколько. Первая причина состоит в том, что вода имеет **наибольшую плотность при 4°C** (вернее, при $3,98^{\circ}\text{C}$) (рис. 3.11, табл. 3.7). При нагревании выше этой температуры, так и при охлаждении ниже ее, вода расширяется и, соответственно, плотность уменьшается.

Наглядно убедиться в вышесказанном совсем несложно. Возьмите сырое яйцо, аккуратно проткните его с двух противоположных сторон и с помощью трубки выдуйте содержимое. Залепите дырочки пластилином. Дополнительно на одну из сторон наклейте столько пластилина, чтобы при опускании в литровую банку с водой комнатной температуры скорлупа держалась почти у дна банки, едва касаясь к нему. Если теперь вы вынесете банку на мороз, то увидите, что через некоторое время скорлупа всплывет, а потом снова опустится в первоначальное положение. Внесите банку обратно в комнату,

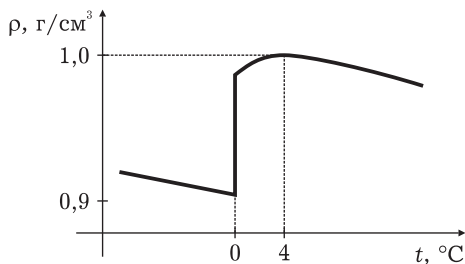


Рис. 3.11

Таблица 3.7

Плотность воды при некоторых температурах

$t, ^\circ\text{C}$	$\rho, \text{г/см}^3$	$t, ^\circ\text{C}$	$\rho, \text{г/см}^3$
-10	0,99815	17	0,99880
-9	0,99843	18	0,99862
-8	0,99869	19	0,99843
-7	0,99892	20	0,99823
-6	0,99912	21	0,99802
-5	0,99930	22	0,99780
-4	0,99945	23	0,99757
-3	0,99958	24	0,99732
-2	0,99970	25	0,99707
-1	0,99979	26	0,99681
0	0,99987	27	0,99652
1	0,99993	28	0,99622
2	0,99997	29	0,99592
3	0,99999	30	0,99561
4	1,00000	31	0,99521
5	0,99999	32	0,99479
6	0,99997	33	0,99436
7	0,99993	34	0,99394
8	0,99988	35	0,99350
10	0,99973	40	0,99118
11	0,99963	50	0,98804
12	0,99952	60	0,98318
13	0,99940	70	0,97771
14	0,99927	80	0,97269
15	0,99913	90	0,96534
16	0,99897		

и скорлупа опять проделает тот же путь: поднимется наверх, а затем спустится вниз.

Объясняется этот опыт очень просто. При понижении температуры воды на морозе ее плотность увеличивается до тех пор, пока температура не дойдет до 4°C , при этом благодаря повышению плотности воды скорлупа всплывает. При дальнейшем понижении температуры ниже 4°C плотность воды

становится меньше и скорлупа снова опускается. При внесении банки в теплую комнату все повторяется в обратной последовательности.

Вернемся к поставленному в начале статьи вопросу. Когда пруд начинает замерзать, вода, температура которой близка к температуре замерзания 0°C , поднимается к поверхности, а более теплая вода с температурой около 4°C как наиболее тяжелая опускается вниз. Поэтому вода на поверхности оказывается самой холодной и замерзает прежде всего.

Второй причиной замерзания поверхности водоема является то, что она быстрее охлаждается из-за излучения тепла в атмосферу и сносу этого тепла циркуляцией воздуха. Земля же на дне пруда остается сравнительно теплой и подогревает придонный слой воды.

Кстати, в некоторых странах в судоходных реках и озерах, чтобы предотвратить образование льда и тем самым обеспечить прохождение судов, по дну прокладывают трубы с отверстиями, благодаря чему на поверхность время от времени поднимаются пузырьки воздуха. В пузырьках воздух относительно теплый, поэтому они предотвращают, задерживают или уменьшают возникновение льда на поверхности воды. Если даже лед уже образовался, то из-за пузырьков он начинает подтаивать, и через четыре-пять дней исчезает полностью [79, 118, 125, 140, 211].

3.44. КАК БЫСТРО ЗАМЕРЗАЕТ ВОДА?

В предыдущей статье мы выяснили причину того, почему вода начинает замерзать на поверхности водоема. Теперь поставим вопрос в другом ракурсе: как быстро замерзает вода на поверхности водоема? Другими словами, как быстро растет толщина льда? Задача подобного рода впервые была поставлена австрийским физиком и математиком **Йозефом Стефаном** (1835–1893), поэтому называется **задачей Стефана**.

Приступая к решению, прежде всего заметим, что лед растет вниз (в глубину водоема) и температура нижней стороны льда равняется 0°C , так как вода замерзает при этой температуре. С другой стороны, температура верхней сторо-

ны льда равна температуре окружающей среды, которая ниже 0°C (иначе вода не замерзала бы). Таким образом, по толщине льда имеется градиент температуры, и именно за счет этого градиента выделяющаяся при кристаллизации теплота (теплота фазового перехода) передается воздуху над льдом (теплота кристаллизации не передается самой воде, так как нет перепада температуры; см. по этому поводу следующую статью). Поэтому воздух во время формирования ледяного покрова (осенью) в непосредственной его близости всегда на пару градусов теплее и это является причиной того, что птицы осенью любят собираться на льду. Толщина льда увеличивается до тех пор, пока существует градиент температуры между нижней и верхней его поверхностями и, как правило, практически прекращается после образования надо льдом снежного покрова достаточной толщины, так как снег плохо проводит тепло (см. ст. 1.30 на с. 64).

Итак, выделим участок льда площади ΔS на поверхности водоема. Пусть за бесконечно малый промежуток времени dt образуется лед массой $dm = \rho dV = \rho \Delta S dh$, где dh — толщина образовавшегося льда; ρ — его плотность. При этом выделится теплота

$$dQ_1 = \lambda dm = \lambda \rho \Delta S dh,$$

где λ — удельная теплота кристаллизации. С другой стороны, за этот же промежуток времени dt через лед воздуху согласно **закону Фурье** передается количество теплоты

$$dQ_2 = \kappa \left| \frac{dT}{dz} \right| \Delta S dt \approx \kappa \frac{\Delta T}{h} \Delta S dt,$$

где κ — теплопроводность льда; h — текущая толщина льда; ΔT — разница между температурами нижней и верхней поверхностей льда. Так как нижняя поверхность (где происходит формирование новых порций льда) всегда имеет температуру 0°C , а температура верхней поверхности приблизительно равна температуре (отрицательной) воздуха T_0 , то можно считать $\Delta T = |T_0|$. При установившемся режиме выделяющаяся

теплота dQ_1 равна отводимой теплоте dQ_2 , поэтому

$$\lambda \rho \Delta S dh = \kappa \frac{|T_0|}{h} \Delta S dt.$$

Тогда скорость образования льда равна

$$\frac{dh}{dt} = \frac{\kappa |T_0|}{\lambda \rho} \cdot \frac{1}{h}.$$

Таким образом, чем толще становится лед, тем медленнее идет процесс его образования. Кроме того, скорость образования льда напрямую зависит от температуры воздуха: чем она больше (по абсолютному значению), тем выше скорость.

Чтобы численно оценить скорость образования льда, примем, что температура воздуха равна -10°C , а толщина льда достигла 10 см. Тогда, зная, что для льда $\kappa = 2,22 \text{ Вт/(м·К)}$, $\rho = 917 \text{ кг/м}^3$, для воды $\lambda = 3,33 \cdot 10^5 \text{ Дж/кг}$, получим $dh/dt \approx 7,3 \cdot 10^{-7} \text{ м/с} = 2,62 \text{ мм/ч}$ [149].

3.45. БУТЫЛКА С ВОДОЙ, ЛЕД И ПАР

Закупоренную бутылку, наполненную водой, опустили в тающий лед при 0°C . Нужно ли опасаться за целостность бутылки?

Если бы вода в бутылке замерзла, стекло растрескалось бы под давлением образующегося льда. Однако при указанных условиях вода в бутылке замерзнуть не может. Действительно, чтобы вода в бутылке замерзла, необходимо, во-первых, понизить ее температуру до 0°C , и, во-вторых, при этой температуре отнять определенное количество теплоты кристаллизации. Температура воды, конечно, через некоторое время сравняется с температурой льда, а вот отнять теплоту кристаллизации лед не может, так как при равенстве температур теплопередача невозможна. А раз нет теплопередачи, то вода останется в жидком состоянии (при 0°C) и опасаться за целостность бутылки не нужно.

Но стоит вам смешать лед с солью и опустить туда бутылку с водой, то через некоторое разрушение бутылки гарантировано (см. по этому поводу ст. 3.36 на с. 333).

Точно так же, если сосуд с водой окружить паром, нагретым до 100°C , то пар может отдавать воде тепло только при условии, что температура воды ниже 100°C . С момента, когда температуры воды и пара сравняются, теплопередача от пара к воде прекращается. Отсюда следует, что 100 -градусным паром можно довести воду до **температуры кипения**, но нельзя довести до **состояния кипения**. Тем не менее, на предприятиях питания достаточно часто используются паровые котлы, в которых источником тепла для приготовления пищи служит поступающий в них пар. Однако в данном случае подаваемый в котлы под большим давлением пар имеет температуру, намного превышающую 100°C , поэтому воду в котле можно довести до состояния кипения [95, 149].

3.46. КАК ОХЛАЖДАТЬ ЛЬДОМ НАПИТКИ!

Чтобы охладить льдом бутылку лимонада, одни ставят бутылку поверх льда, другие, наоборот, помещают ее под лед. В каком случае лимонад охладится скорее?

Многие, не раздумывая, ставят бутылку на лед, как кастрюлю с супом на огонь при его подогреве. Однако это неправильный способ охлаждения — намного выгоднее охлаждать бутылку сверху, чем снизу. Связано это с тем, что лимонад (да и большинство других употребляемых человеком напитков) состоит в основном из воды. Как мы знаем, при температурах, больших 4°C , холодная вода плотнее теплой (см. рис. 3.11 и табл. 3.7), и когда вы помещаете бутылку с лимонадом под лед (или бросаете внутрь бутылки куски льда), верхние слои напитка (прилегающие ко льду), охладившись и сделавшись оттого тяжелее, опускаются вниз. На их место поднимаются еще неостуженные порции лимонада, охлаждаются льдом и в свою очередь опускаются. В короткий срок весь лимонад в бутылке побывает в соседстве со льдом и быстро охладится.

Другое дело, если вы ставите бутылку с напитком на лед. Тогда прежде всего охлаждается самый нижний слой напитка; он делается плотнее и остается на дне, не уступая места остальным, еще теплым слоям. Никакого перемешивания

жидкости в этом случае не происходит, и оттого она охлаждается очень медленно.

Не одни только напитки выгодно охлаждать сверху — мясо, рыбу, овощи надо для охлаждения тоже класть под лед, а не поверх его. Ведь они охлаждаются не столько самим льдом, сколько остуженным воздухом; холодный же воздух течет вниз, а не вверх (см. ст. 1.33 на с. 69). И если вам понадобится льдом охладить, например, воздух в комнате больного, помещайте лед не на пол, а куда-нибудь повыше, поближе к потолку [96, 147].

3.47. КАМНИ, «РАСТУЩИЕ» В ПОЛЕ

Жители сельских районов, где скальные породы подступают близко к поверхности плодородной земли, давно заметили, что весной в поле неизвестно откуда появляется большое количество камней. Камни имеют бóльшую плотность, чем почва, и потому должны постепенно опускаться, а не подниматься. Что же «толкает» их вверх?

Камни «вылезают» на поверхность в результате чередующихся процессов замерзания и подтаивания земли, которые происходят зимой. Когда земля промерзает, граница льда в почве опускается, а водяной пар из почвы диффундирует вверх к границе льда. Если на границе промерзания оказывается камень, то нижняя часть камня охлаждается скорее, чем окружающая земля (камень лучше проводит тепло, чем земля). Это ведет к тому, что к нижней холодной поверхности камня будет примерзать больше воды. Вследствие расширения льда при замерзании камень начнет выталкиваться вверх сильнее, чем прилегающая к нему земля.

Когда земля оттаивает, почва подсыпается под камень и его новое положение закрепляется. Повторные циклы замерзания и оттаивания, происходящие на протяжении многих лет, в конце концов приводят к тому, что камень «вылезает» на поверхность.

Описанное явление является одной из причин разрушения асфальтового покрытия на дорогах [140].

3.48. ЦИКЛОНЫ И АНТИЦИКЛОНЫ

Единственным и существенным источником тепла для Земли является приходящее от Солнца излучение. Это приводит к суточным и годовым периодическим изменениям температуры поверхности Земли и атмосферы, хотя среднюю температуру Земли ($+15^{\circ}\text{C}$) можно считать почти неизменной (см. ст. 3.50 на с. 358). Однако даже в пределах небольших местностей такой нагрев и охлаждение может происходить в разной степени из-за влияния различных факторов: облачности, чистоты и прозрачности атмосферы, влажности воздуха, наличия водоемов, снежного покрова и т. д. и т. п. Все такие периодические и случайные колебания температуры в итоге приводят к движениям воздушных масс как в горизонтальном, так и вертикальном направлениях.

Если массы теплого воздуха, перемещаясь в горизонтальном направлении, теснят холодный воздух, возникает так называемый **теплый фронт**; если же наступающий холодный воздух движется быстрее отступающего теплого, то говорят о **холодном фронте**. При движении теплого фронта наступающий теплый воздух как бы «наваливается» на стелющийся понизу холодный воздух и по нему поднимается вверх, а при движении холодного фронта наступающий тяжелый холодный воздух как бы проникает под теплый воздух и приподнимает его. При столкновении теплых и холодных фронтов могут образовываться мощные атмосферные вихри диаметром до нескольких тысяч километров и высотой 10–20 км — **циклоны и антициклоны**.

В циклонах вблизи поверхности земли ветры направлены от периферии к его центру, поскольку в центре циклона давление воздуха меньше, чем на его периферии. В Северном полушарии ветры закручиваются к центру циклона против часовой стрелки, а в Южном — по часовой стрелке. Стекающие к центру циклона воздушные массы устремляются затем вертикально вверх. Это приводит к их адиабатическому охлаждению (см. ст. 2.67 на с. 243) и образованию мощных слоистых и слоисто-дождевых облаков и, соответственно, к выпадению осадков. Наверху же циклона возникают

горизонтальные ветры, направленные по спирали от его центра; они выносят к его периферии воздушные массы, захваченные циклоном внизу. Зарождение или приход уже сформировавшегося циклона всегда приводит к значительному ухудшению погоды, сопровождается длительными дождями. Признаком приближения центра циклона является понижение атмосферного давления.

Для антициклонов характерна обратная картина процессов, так как в его центре давление выше, чем на периферии. Наверху антициклона ветры закручиваются к его центру, а вблизи земной поверхности — от центра, в центре же антициклона возникают мощные нисходящие потоки воздуха. Опускающийся вниз воздух адиабатически сжимается и, соответственно, нагревается, относительная влажность уменьшается, облачность исчезает — устанавливается ясная погода. Недаром повышение атмосферного давления мы справедливо связываем с улучшением погоды.

Все вышесказанное относится к обычным атмосферным вихрям, образующимся в средних и северных (южных) широтах. Совсем иное дело — **тропические циклоны**, которые несут с собой ураганные ветры, ливни, наводнения, разрушения и многочисленные смерти. В Америке их называют **ураганами** (по имени бога бурь у древних майя), а на западном побережье Тихого океана — **тайфунами** (в переводе с китайского — «очень большой ветер»). Тайфуны зарождаются в низких широтах субтропических областей океанов в результате взаимодействия дующих в этих областях постоянных ветров (пассатов) с мощными конвекционными восходящими потоками воздуха, возникающими над сильно нагретой поверхностью океана. Основным источником энергии тайфунов — выделение огромных количеств теплоты при конденсации водяных паров в восходящих воздушных потоках.

Тайфун по сравнению с обычным циклоном имеет меньший диаметр: всего-то 200–500 км. Если в центре обычного циклона давление воздуха понижается до 715–720 мм рт.ст., реже до 700 мм рт.ст., то в центре тайфуна — до 675 мм рт.ст. Скорость ветров в обычном циклоне не превышает, как правило, 50–70 км/ч, однако в тайфуне сильное снижение дав-

ления в центре и относительно малый диаметр области тайфуна обуславливает большой градиент давления по его радиусу, поэтому ветер может достигать скорости 400–500 км/ч. При подобных скоростях воздух воспринимается как некая твердая субстанция, наносящая удары, подобные ударам пушечных ядер. Скорость ветра возрастает по мере приближения к центру циклона, бешено закручиваясь, но вихрь не может перейти некоторого предела, оставляя в самом центре циклона область затишья диаметром 10–40 км, — это знаменитый **«глаз тайфуна»**. У обычного (не тропического) циклона такого «глаза» нет. Если посмотреть на снимок тайфуна, сделанного из космоса, то его «глаз» выглядит небольшим темным пятном в центре вихря. Область «глаза» характеризуется наиболее низким атмосферным давлением и повышенной температурой, а вдоль его границы с внешней стороны возникает особенно сильный восходящий поток теплого воздуха.

Возникнув, тайфун начинает перемещаться над земной поверхностью. Скорость этого перемещения невелика и обычно составляет десятки километров в час. Иногда тайфун может даже на некоторое время зависать над какой-нибудь местностью. Как правило, тайфуны перемещаются в направлении от низких к более высоким широтам [82, 130].

3.49. ПРЕДСКАЗАНИЕ ПОГОДЫ

Перемена погоды зависит от многих причин: от изменения температуры атмосферы, его давления, влажности, количества выпавших осадков, облачности, продолжительности солнечного времени, силы и направления ветра и т. д. Погода, определяемая состоянием перечисленных элементов в данном месте, — явление очень сложное, а предсказание изменения погоды — дело еще более сложное. Этим и объясняются возникающие иногда неудачи в метеопрогнозах.

Определяющую роль для погоды, конечно, играет состояние атмосферы (см. ст. 3.48). В большинстве случаев области пониженного атмосферного давления — **циклоны** — несут «плохую» погоду (дождь, снег, ветер), а области высокого атмосферного давления — **антициклоны** — «хорошую»

(преимущественно ясное небо). Летом циклоны понижают температуру, так как облачный покров препятствует нагреванию Земли солнечными лучами; зато зимой — наоборот, повышают. Антициклоны же дают летом теплую погоду, а зимой — холодную (причина зимних холодов при антициклоне: мало облаков, и земная поверхность поэтому много излучает тепла).

Если вы — человек наблюдательный, то тоже сможете по определенным приметам делать предсказания погоды. Дело это непростое и, кроме наблюдательности, от вас еще требуется умение логически мыслить и, конечно же, опыт.

Наиболее показательны для прогноза погоды приметы по цвету неба и по облачности (об облаках см. ст. 3.11 на с. 294), так как они легко наблюдаются и проверяются (однако не следует забывать при этом и про наблюдаемые изменения ветра и температуры).

ПРИЗНАКИ ХОРОШЕЙ ПОГОДЫ:

• по виду и поведению облаков:

— ранним утром безоблачно, затем появляются кучевые облака с хорошо очерченными краями (по форме похожи на вату). Увеличиваясь к 15–16 часам, они после этого времени начинают быстро исчезать;

— днем наблюдаются небольшие кучевые облака, отделенные значительными промежутками голубого неба. Эти облака быстро движутся в том же направлении, что и ветер у поверхности земли, а к вечеру рано исчезают;

— отрывающиеся от кучевых облаков «куски» быстро тают;

— на небе высокие перистые облака — отдельные или переплетающиеся, тонкие и почти неподвижные. Облака не имеют никаких утолщений-«коготков» и т. д. К вечеру эти облака исчезают, но позднее кучевых;

• по цвету неба:

— при закате солнца преобладают зеленоватые оттенки — признак хорошей, сухой установившейся погоды (основной признак);

— цвет неба при закате золотистый или светло-розовый — особенно, когда у горизонта золотистая полоска, а над нею розовое пятно;

— серебряная полоска долго держится у горизонта после заката Солнца;

— днем темно-синее небо (это значит, что мало водяных паров);

— Солнце и Луна отливают зеленоватыми оттенками;

— Солнце и Луна сильно искажаются при заходе (обычно это бывает при смене дождливой погоды на сухую);

— радуга из цветной переходит в белую или зеленую;

— сумерки продолжаются недолго;

— при заходе Солнца на мгновение вспыхивает изумрудно-зеленый луч;

— звезды мерцают слабо и отливают зеленоватым блеском;

● **по изменению ветра:**

— ночью и утром тихо. С восходом Солнца появляется слабый ветер, усиливающийся к 12–15 часам. После этого — ослабление ветра. К вечеру — тихо;

— штиль днем или слабые ветры неустойчивого направления, если при этом другие признаки также указывают на антициклоническое состояние погоды;

— у моря или большого озера ветер днем дует с моря, а вечером, наоборот, — с суши на воду;

— постепенное ослабление ветра при прочих признаках хорошей погоды. В этом случае хорошая, ясная погода удержится не менее 12 часов;

— верхний ветер (направление его определяется по высоким облакам) несколько отклоняется влево по сравнению с ветром у земной поверхности;

— во время непогоды ветер сразу же изменяет свое направление с востока на запад (признак перемены погоды к лучшему);

● **по изменению температуры воздуха:**

— резкое изменение температуры в течение суток: днем жарко, а к вечеру прохладно (особенно весной и осенью);

— вечером и ночью воздух в лесу заметно теплее, чем в открытом поле;

- вечером или ночью при восхождении на холм или возвышенность чувствуется тепло;
- на холодной траве вечером выступает обильная роса.

ПРИЗНАКИ ПЛОХОЙ ПОГОДЫ:

• по виду и поведению облаков:

- сильное увеличение облачности к вечеру;
- появление высоких волнистых облаков в виде параллельных рядов, напоминающих гребни волн на море (обычно после появления этих облаков ненастная погода наступает через несколько часов);
- на безоблачном небе появляются полосы перистых облаков, как бы расходящихся длинными лучами от общего центра, скрытого выпуклостью Земли. Облака появляются в западной части горизонта. Если Солнце заходит в эти облака, то более чем вероятен дождь (или снег) через 10–12 часов. Заход же Солнца в случайное облако не указывает еще на плохую завтрашнюю погоду — необходимо обратить внимание на другие признаки;
- после перистых облаков (см. предыдущий признак) появляются длинные облака в виде кошачьих хвостов, конских грив, щеток, гребенок, с утолщениями, завитками и пр. Чем скорее движутся такие облака, тем раньше наступит ухудшение погоды;
- днем при белесоватом цвете неба появляются заметные перистые и высокослоистые облака, постепенно опускающиеся. В этом случае осадки должны начаться через несколько часов;
- сплошная белая полупрозрачная пелена неразличимых перисто-слоистых облаков, которые обнаруживаются благодаря просвечиванию через них Солнца и Луны (как говорят, Солнце и Луна «в рубашке»);
- направление облаков не совпадает с направлением ветра у земной поверхности и значительно отклоняется от него (преимущественно вправо);
- кучевые облака к вечеру не исчезают, а как бы расплываются на фоне общей облачности;

— кучевые облака значительно возрастают вширь и в высоту. Получаются громадные горообразные массы с круто приподнятыми отдельными частями-«башенками» (такие облака — предвестники грозы в данном или соседнем месте);

— в кучевом грозовом облаке из верхней части выходят как бы метлы перистых облаков (иногда расширяющихся в виде гриба или наковальни); при значительной влажности возможен град;

— появление в большом количестве перисто-кучевых облаков («барашков») (обычно, к дождю);

• **по цвету неба:**

— цвет неба становится белесоватым, хотя облака еще не различаются (объясняется большим количеством водяных паров в нижнем слое атмосферы);

— при закате преобладают багрово-красные, даже малиновые оттенки неба. Такая заря всегда указывает на ветер, а часто и на осадки: летом — дожди, зимой — метели. Необходимо внимательно всмотреться в оттенки неба при закате Солнца, так как часто путают багряно-красную зарю с розовой, которая является признаком антициклона (летом — сухой, теплой погоды). Кроме цветного отличия, эти зори отличаются и по форме: красная имеет вид сегмента (длинная часть тянется вдоль горизонта), а розовая имеет форму круга, отстоящего на 40–50° от зашедшего Солнца;

— красноватый цвет Солнца или Луны, когда они уже высоко над горизонтом — верный признак сильного дождя в ближайшее время;

— круги, охватывающие Солнце или Луну, — предвестники циклона за 1–2 дня;

— малые цветные венцы вокруг Солнца или Луны, уменьшающиеся со временем;

— белая радуга превращается в цветную;

— отдаленные берега кажутся как бы плавающими в воздухе (видна прослойка воздуха);

— звезды сильно мерцают, причем преобладают красные оттенки;

— между облаками отчетливо видно сияние («заоблачное сияние») — отчетливо выделяются лучи, выходящие из темного края облака;

— ненормально продолжительные сумерки;

— красная заря утром при восходе Солнца;

● **по изменению ветра:**

— если ветер к вечеру усиливается, то, наверное, погода «испортится» не позднее, чем через день;

— если ветер крепчает и постепенно изменяется по часовой стрелке (т. е. направление его меняется «по Солнцу»), то скоро начнется продолжительный, обильный дождь;

— восточный ветер постепенно крепчает, но не меняет направления;

— верхний ветер заметно отклоняется вправо;

● **по изменению температуры:**

— сравнительно небольшая разница температур в течение суток. Если еще в это время наблюдаются перистые облака (нити с «коготками»), — признак пасмурной погоды;

— резкое потепление к вечеру;

— утром трава сухая.

ПРИЗНАКИ ВОЗМОЖНОЙ ГРОЗЫ:

— с утра «парит» (утром ненормально тепло, а днем — душно);

— наблюдаются высоко-кучевые облака, похожие на разорванные куски ваты;

— появление громадных горообразных кучевых облаков с «башенками»;

— появление над высоко-кучевыми облаками перистых облаков, расходящихся из кучевого облака наподобие снопов;

— в послеобеденное время (с 15–16 часов) нижняя граница кучевых облаков остается на одной высоте. Основание темного кучевого облака расплывается и часто опускается, а вершина над средней частью быстро растет;

— наверху сильный ветер при тихом внизу (при наличии прочих признаков грозы);

— впереди грозовой тучи идет темный горизонтальный вал («грозовой вал»);

— перед началом грозы на короткое время затишье, а затем начинается сильный шквальный ветер;

— ясная слышимость отдаленных слабых звуков;

— показание барометра падает скачками.

Приведенные выше признаки имеют, так сказать, непосредственную связь со свойствами объектов, участвующих в погодообразовании (давление, температура и прозрачность воздуха, направление и сила ветра, вид облачности и т. д.). Ниже приводится еще ряд признаков, которые связаны с изменением погоды опосредованно.

К хорошей погоде:

— туман у поверхности земли (в низинах, на пыльной дороге), образующийся вскоре после захода Солнца и рассеивающийся только после его восхода;

— дым из труб или от костров идет вверх;

— ласточки летают высоко;

— комары летят роями;

— пчелы рано улетают в поле;

— сухой туман (или мгла), сопровождаемый запахом га-

ри — признак сухой погоды;

— у хвойных деревьев ветви подняты.

К плохой погоде:

— дым в тихую погоду стелется вблизи земли или опускается книзу после слабого поднятия;

— ясная слышимость отдаленных звуков;

— ласточки и стрижи летают низко;

— соль становится влажной;

— двери и окна, подогнанные плотно, открываются и закрываются с трудом;

— тонкие веревки закручиваются;

— курицы, воробьи «купаются» в пыли;

— птицы «хохлятся»;

— лягушки в большом количестве выходят из болот на сушу;

— рыба не клюет (перед дождем);

— мухи и комары особенно надоедливы;

- собака и кошка свертываются «калачиком» (к холоду);
- страдающие ревматизмом перед дождевой погодой (зимой — перед оттепелью) чувствуют ломоту в суставах;
- провода гудят особенно сильно;
- вода в стоячих прудах пахнет перед дождем особенно неприятно (уменьшается атмосферное давление и из-за этого свободнее выделяются пузыри болотных газов);
- у хвойных деревьев ветви опущены (перед дождем);
- с клена капает «слезы» (дождь через несколько часов) [77, 96, 173].

3.50. ПРЕДСКАЗАНИЕ ЗАМОРОЗКОВ

Заморозки (особенно весенние) — настоящее бедствие не только для плодовых и овощных культур, но даже и для полевых. Отчего и когда бывают заморозки, и как их предсказывать?

Заморозки бывают от двух причин: от ночного земного излучения и от вторжения значительных холодных масс воздуха из других районов.

Средняя температура Земли остается постоянной и равной $+15^{\circ}\text{C}$. Эта температура термодинамического равновесия (теплового баланса) между приходящей к Земле от Солнца лучистой энергией и излучением самой Земли. Однако тепловое равновесие Земли нарушается даже в течение суток и указанная выше температура $+15^{\circ}\text{C}$ — это именно усредненная в течение достаточно продолжительного времени (нескольких лет) температура.

Огромную роль в тепловом балансе Земли играет атмосфера (см. ст. 2.62 на с. 237). Днем она пропускает видимые солнечные лучи и Земля получает больше энергии, чем сама излучает, поэтому нагревается. Ночью атмосфера сама переизлучает накопленную днем энергию, но в меньшем количестве, чем излучает земная поверхность, поэтому поверхность Земли охлаждается. Однако земная поверхность излучает уже не в видимом, а в инфракрасном (тепловом) диапазоне электромагнитных волн, которые поглощаются атмосферой — она как бы прикрывает Землю одеялом (в этом отношении атмо-

сферу можно сравнить со стеклами оранжереи или парника, пропускающими видимые солнечные лучи, но не пропускающими инфракрасные). Не будь атмосферы, температура ночью на Земле всегда понижалась бы на несколько десятков градусов (!). Большое изменение в тепловой баланс Земли вносят облака — они сильнее всего задерживают излучение (см. ст. 3.32 на с. 327). Поэтому в пасмурный летний день прохладнее, чем в ясный, но зато в ясную ночь холоднее, чем в пасмурную. Из этого ясно, что заморозки могут наступить только в ясную ночь, когда тепловое излучение почвы больше, чем тепловое излучение атмосферы.

С другой стороны, если влажность велика и воздух близок к насыщению парами, то при понижении температуры воздух может стать насыщенным и начнет выпадать роса. Но при конденсации водяных паров выделяется энергия, поэтому воздух у поверхности почвы при образовании росы не будет охлаждаться ниже точки росы и вероятность наступления заморозка уменьшается.

Из сказанного можно сделать такой вывод: вероятность заморозка зависит, во-первых, от быстроты понижения температуры (т. е. быстроты потери тепла Землей) и, во-вторых, от влажности воздуха. Достаточно знать одно из этих данных, чтобы более или менее точно предсказать вероятность заморозка.

По скорости понижения температуры вероятность заморозка можно определить по специальной диаграмме (рис. 3.12), составленной русским метеорологом **П. И. Броуновым** (1853–1927). В этой диаграмме по вертикальной оси отложены значения температуры воздуха в 21 ч, а по горизонтальной оси — разность температур между 13 ч и 21 ч. Плоскость диаграммы разбита на несколько областей в зависимости от вероятности заморозка. Например, если в 13 ч температура воздуха была 8 °С, а в 21 ч стала равной 3 °С, то разность температур составит 5 °С. Тогда пересечение координат 3 и 5 попадает в область 100%-й вероятности — заморозок обязательно будет.

Для определения вероятности заморозка по влажности лучше всего подходит **психрометр** — прибор для определения влажности. Для этого психрометр дополняется специаль-

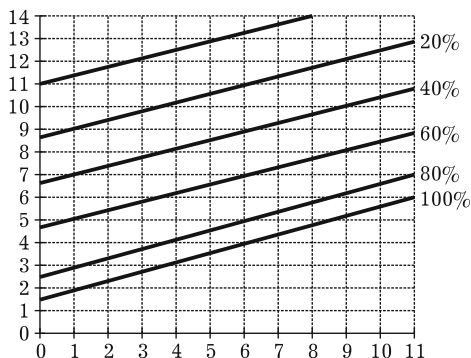


Рис. 3.12

ной диаграммой (рис. 3.13). Диаграмма разбита на участки, обозначенные цифрами. Если точка пересечения наклонной линии, идущей от показания сухого термометра, с горизонтальной линией, идущей от показания влажного термометра, окажется на участке, обозначенном цифрой 1, то заморозок неизбежен; если на участке, обозначенном цифрой 2, — заморозок возможен; если на участке, обозначенном цифрой 3, — заморозка не будет. Например, если температура воздуха (показание сухого термометра) 10°C , а показание влажного термометра 7°C , то точка пересечения наклонной линии, идущей

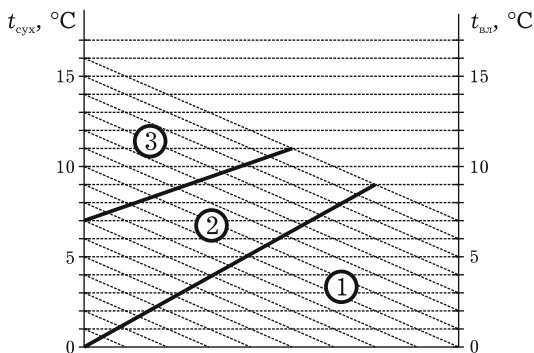


Рис. 3.13

от 10 °С, с горизонтальной линией, идущей от 7 °С, окажется на участке, помеченном цифрой 2. Следовательно, заморозок возможен [9, 155].

3.51. ОСТОРОЖНО — ХОЛОДНОЕ ЖЕЛЕЗО!

Если дотронуться до холодного металла, например до замерзшей металлической кружки, только что вынутой из морозилки холодильника, то палец может примерзнуть к нему. Будьте осторожны, если решите испытать это на себе: кожу, приставшую к металлу, легко повредить! Откройте заранее воду в раковине и, взяв кружку, сразу подставьте ее и руку под струю. И уж ни в коем случае не вздумайте, как это делают некоторые неразумные дети, лизнуть кружку — это может кончиться очень плохо. Почему палец «прилипает» к кружке?

Когда мы прикасаемся к холодной металлической поверхности, имеющаяся на коже влага замерзает и поэтому палец может «примерзнуть» к предмету. Примерзание к металлу происходит с большей вероятностью, чем, скажем, к дереву, поскольку теплопроводность металла велика и тепло быстро отводится от влаги на кончике пальца.

Кстати сказать, именно из-за того, что у металла теплопроводность больше, чем у дерева, при их ощупывании возникает ощущение различия их температур. Действительно, как уже говорилось (см. ст. 3.26 на с. 318), ощущение холода или тепла при соприкосновении нашего тела с каким-нибудь предметом определяется количеством тепла, которое отдает или получает наше тело в единицу времени. И если металл и дерево нагреты до одинаковой температуры, более высокой, чем температура нашего тела, то при соприкосновении с нашим телом металл сообщит ему в единицу времени больше тепла, чем дерево. А если металл холоднее нашего тела, то он отнимет в единицу времени опять-таки больше тепла, чем дерево. Поэтому в первом случае металл кажется теплее дерева, а во втором — холоднее.

Очевидно, что при температуре человеческого тела 36,6 °С и металл, и дерево будут на ощупь казаться одинаково нагретыми [16, 79, 98, 140].

3.52. КАК ЛОПАЮТСЯ ТРУБЫ

Зимой при замерзании водопроводных и отопительных труб они иногда лопаются. Как это происходит?

Первоначально вода намерзает на внутренние стенки трубы, так как они изготавливаются, как правило, из железа, а железо хорошо проводит (в данном случае — отдает) тепло (см. предыдущую статью). Затем лед начинает нарастать по радиусу внутрь трубы. При этом у порций воды, непосредственно контактирующих со льдом, понижается температура. Известно, что при понижении температуры объем воды увеличивается. До тех пор, пока ледяная пробка не перекроет трубу, избыток воды, обусловленный ее расширением при замерзании, просто выталкивается обратно в подводящую магистральную трубу. Но как только возникает ледяная пробка, некоторый объем воды в пространстве между пробкой и краном оказывается запертым. Расширение замерзающей воды в этом пространстве приводит к сильному повышению давления и разрыву трубы. Таким образом, труба обычно лопается не там, где намерзает лед, а где-то в области запертого между краном и ледяной пробкой объема воды. Кстати, для того, чтобы при образовании ледяной пробки уменьшить давление воды и, соответственно, предотвратить разрыв трубы, кран зимой иногда не закрывают полностью, а позволяют воде капать.

Замечено, что трубы с горячей водой разрываются чаще, чем с холодной. Связано это с тем, что при более высокой температуре уменьшается эффективность образования льда вокруг центров кристаллизации (пылинок, песчинок, пузырьков газа). К тому же в горячей воде растворено меньше газов, чем в сырой (см. ст. 4.54 на с. 452). Это ведет к тому, что температура воды в трубе уменьшается ниже 0°C без образования льда. Однако в какой-то момент от случайного (даже очень малого) возмущения внезапно начинается быстрое обледенение. При этом ледяная пробка резко расширяется и разрыв трубы становится более вероятным. По этой же причине зимой могут замерзнуть (как говорят, «прихватить») ра-

диаторы двигателей внутреннего сгорания с водяным охлаждением [95, 140].

3.53. КОГДА ЛОПАЮТСЯ ТРУБЫ ПОД ЗЕМЛЕЙ!

Работники сферы коммунальных услуг знают, что в подземных частях зданий и магистральных подземных каналах вода в трубах, как правило, замерзает не в мороз, а в оттепель. Почему?

Объясняется это явление плохой теплопроводностью почвы. Тепло через землю выделяется в атмосферу так медленно, что минимум температуры наступает в почве позднее, чем на поверхности земли. Это так называемая **температурная инерция грунта** (например, для нашей климатической зоны температурное запаздывание грунта на глубине 3 м составляет свыше 70 дней). Поэтому происходит так, что за время морозов почва на глубине пролегания водопроводных труб не успевает охладиться ниже нуля. Потом же, когда над землей уже наступает оттепель, уровень промерзания грунта еще некоторое время движется вниз и температура в объеме мерзлой земли еще несколько понижается. Из-за этого трубы замерзают, когда над землей уже оттепель.

В строительном деле знание максимальной глубины промерзания почвы зимой в данной местности является важнейшим нормативом при постройке зданий. Например, для средних широт России она имеет значение около 1,6–1,8 м. Нижнее основание фундамента здания всегда должно находиться ниже максимальной глубины промерзания почвы, иначе образующийся лед начнет выталкивать дом наверх (см. по этому поводу также ст. 3.47). Само по себе это не так страшно, но дело в том, что усилия на фундамент при этом получают неравномерными в силу того, что в разных точках почва промерзает и лед расширяется в разной степени. Из-за этого фундамент может просто треснуть и привести к разрушению дома в целом. Кстати, та ситуация с промерзанием труб в подвалах, описанная в начале статьи, вообще говоря, никогда не должна была бы случиться, если только дом построен с

соблюдением всех нормативов. Однако в жизни всегда могут быть зимы с ненормально низкой температурой, не предусмотренной строительной документацией.

С углублением в почву температурные колебания не только опаздывают, но и ослабевают, а на некоторой глубине вообще затухают. На этой глубине все время стоит одна и та же постоянная температура, равная средней годовой температуре данной местности.

Интересный факт: в подвале Парижской обсерватории на глубине 28 м свыше двух столетий хранится термометр, помещенный сюда еще французским химиком **А. Л. Лавуазье** (1743–1794) — первооткрывателем химического состава земной атмосферы (см. ст. 1.22 на с. 45). За два столетия показания термометра даже не дрогнули, неизменно показывая одну и ту же температуру $+11,7^{\circ}\text{C}$ [92, 95, 98].

3.54. СВЕРХТЕКУЧИЙ ГЕЛИЙ

Фазой вещества называется однородная устойчивая его область с одинаковыми физическими свойствами, ограниченная от других областей вещества границей раздела. Даже находясь в одном и том же **агрегатном состоянии**, вещество может иметь разные **фазовые состояния**.

Вещество может по-разному переходить из одного фазового состояния в другое.

При фазовых переходах 1-го рода скачком изменяются плотность и энергия, при этом всегда выделяется или поглощается определенное (конечное) количество теплоты. Характерным примером фазового перехода 1-го рода может служить переход вещества из одного агрегатного состояния в другое.

При фазовых переходах 2-го рода плотность и энергия меняются непрерывно, а скачок испытывают другие величины (теплоемкость, теплопроводность и пр.), при этом они не сопровождаются поглощением или выделением энергии. Примерами фазовых переходов 2-го рода могут служить переходы ферромагнетика в парамагнетик при точке Кюри, графита — в алмаз, перекристаллизация металлов (см. ст. 5.36 на с. 527) и др.

Примером фазового перехода 2-го рода является также превращение жидкого гелия при понижении температуры до 2,17 К в **сверхтекучую модификацию** He II с очень малой вязкостью. Поверхность тела, соприкасающегося с He II, покрывается пленкой сверхтекучего гелия, по которой может происходить перенос жидкости из одного сосуда в другой. Так, например, пустой стакан, погруженный не до краев в He II, через некоторое время заполнится гелием.

При фазовом переходе в He II превращается не весь гелий, а только часть, т. е. при температурах ниже 2,17 К гелий можно представить себе состоящим из 2 компонент: нормальной He I и сверхтекучей He II. Компоненты могут двигаться независимо друг от друга. Это приводит к интересному эффекту: благодаря встречному конвективному движению двух компонент теплопередача в He II происходит без переноса массы, в результате чего теплопроводность He II чрезвычайно высока. Проявляется это, например, в отсутствии у He II обычного кипения, так как из-за высокой теплопроводности все испарение происходит с поверхности и пузырьки пара не могут образоваться в объеме жидкости.

Низкая вязкость сверхтекучей компоненты гелия и способность легко проникать в малейшую щель делает ее удобной для проверки герметичности изделий, а благодаря сверхвысокой теплопроводности He II может служить хорошим хладагентом для охлаждения [49, 165].

3.55. ПРЕДЕЛЬНАЯ ВЫСОТА ГОР

Самая высокая гора на Земле — **Эверест** (другое название — **Джомолунгма**) в Гималаях, ее высота составляет 8852 м. Почему же на Земле нет гор, скажем, в десять раз выше Эвереста?

На самом деле для любой планеты можно вычислить некую критическую высоту, выше которой на данной планете не могут быть гор. Для Земли критическая высота составляет 30 км. Если бы горы были выше этой высоты, то давление у основания горы оказалось бы настолько велико, что породы там расплавились бы и высота горы уменьшилась

до критического значения. Скорее всего, в пору геологической молодости на Земле были горы такой величины. Однако постепенное естественное разрушение гор и ряд других природных факторов привели к тому, что мы сейчас имеем.

К примеру, поскольку сила тяжести на поверхности Марса меньше, чем на поверхности Земли, то критическая высота марсианских гор больше, чем земных. Поэтому самая высокая вершина **Олимп** на Марсе выше Эвереста более чем вдвое (22 км при диаметре основания 624 км). Марсианский Олимп держит пока рекорд высочайшей горы Солнечной системы и других известных человечеству частей Вселенной [140, 148].

3.56. СТРОЕНИЕ ЗЕМЛИ

По современным данным, Земля и другие небесные тела образовались около 4,6 млрд лет назад из космической газопылевой смеси под действием сил гравитации. Радиус Земли в среднем равен 6 400 км. О внутреннем строении нашей планеты судят, главным образом, по данным сейсмологии — науки, изучающей распространение звуковых волн в земном шаре.

Хотя Земля ассоциируется у нас с твердым телом, по-настоящему твердой является только ее тонкая внешняя оболочка толщиной всего 20–40 км — это так называемая **кора Земли** или **литосфера**. Средняя плотность литосферы составляет где-то 2,8 г/см³.

Ниже литосферы до глубины 2 920 км расположена **мантия** — слой, где температура недр на его нижней границе повышается почти до 4 000 °С. Увеличение температуры связано с возрастанием давления со стороны вышележащих слоев Земли по мере движения к ее центру (аналогично давление атмосферы увеличивается по мере приближения к земной поверхности из космоса). Хотя с глубиной плотность пород в мантии под действием давления увеличивается (до 10 г/см³), но соответствующее повышение температуры приводит к их размягчению, поэтому они обладают способностью течь.

Литосфера Земли состоит из отдельных плит, поэтому они, имея меньшую плотность, могут «плавать» на поверхности более плотной жидкой мантии (см. ст. 4.8 на с. 384). Их «плава-

ние» сопровождается драматическими событиями. Новые порции земной коры образуются в районах срединно-океанических хребтов, а части старой коры, покрытые трехкилометровым слоем осадочных пород, исчезают, «ныряя» под континенты. Взаимные перемещения плит, их столкновения, рождение и разрушение коры Земли сопровождаются землетрясениями и извержениями вулканов. Когда погружающаяся литосферная плита попадает в зону высоких температур мантии, с осадочными слоями на ее поверхности происходят химические реакции. В результате этих реакций образуются газы и водяные пары, которые вулканами извергаются в атмосферу. Именно вулканическая деятельность и привела к появлению первичной атмосферы Земли, а вода, образовавшаяся при дифференциации вещества мантии, составила Мировой океан.

После мантии (ниже глубины 2 920 км) до самого центра Земли расположено ее **ядро**. Согласно последним геофизическим представлениям, ядро состоит в основном из железа и его можно разделить на три слоя: внешний, переходный и внутренний.

Внешний слой ядра залегает на глубинах 2 920–4 980 км и на него приходится 29,8% массы всей Земли. Считается, что этот слой находится полностью в расплавленно-жидком состоянии. Об этом свидетельствует большое количество экспериментальных данных: приливные колебания внутри Земли (если бы вся Земля была твердой, то приливные колебания на ее поверхности были бы слабее фактически наблюдаемых); нутационные колебания земной оси с периодом около суток (которые без жидкого ядра были бы невозможны); колебания Земли в целом относительно ее оси вращения с периодом около 1,2 года. Регулярные течения этого электропроводного слоя ядра, по-видимому, и приводят к появлению магнитного поля Земли.

Переходный слой между внешним и внутренним ядром имеет толщину около 140 км.

Внутреннее ядро имеет радиус 1 250 км и плотность около 13 г/см³. Измерения интенсивности проходящих через него продольных и поперечных сейсмических волн показывают, что внутреннее ядро является твердым телом (но близким к состо-

янию плавления). Это, с первого взгляда, кажется непонятным — ведь температура к центру Земли должна повыситься еще больше и вещество ядра в любом случае должно быть жидким, если не парообразным.

Объясняется противоречие, тем не менее, достаточно просто — необходимо вспомнить, что повышение температуры обусловлено повышением давления. Но мы знаем, что с ростом давления растет и температура плавления. И действительно, для железа (а это основной материал ядра) температура плавления при нормальных условиях равна 1539°C , и при каждом повышении давления на 10 атм она увеличивается на $0,03^{\circ}\text{C}$. По современным подсчетам, давление ближе к центру Земли превышает 10^6 атм. Значит, такое давление увеличит температуру плавления железа более чем на 3000 градусов и она превысит 4539°C . Температура же в ядре Земли как раз оценивается в $4000\text{--}4700^{\circ}\text{C}$ [144, 161, 167].

3.57. НЕОБЫЧНОЕ СВОЙСТВО СПЛАВОВ

Сплавим равные части свинца с температурой плавления 327°C и олова с температурой плавления 232°C . Какова будет температура плавления полученного сплава?

Напрашивается такой ответ: температура плавления сплава равна средней между температурами плавления компонентов, т. е. 280°C . Но это не так. Температура плавления сплава, называемого ПОС-50 и широко используемого в пайке, гораздо ниже, причем даже ниже, чем у чистого олова, и находится в интервале $183\text{--}209^{\circ}\text{C}$, что с первого взгляда кажется удивительным.

Можно привести еще более парадоксальный пример: сплав, состоящий из 50% висмута с температурой плавления 271°C , 25% свинца и по 12,5% олова и кадмия с температурой плавления последнего 321°C (это так называемый **сплав Вуда**), имеет температуру плавления всего 68°C ! Этот сплав придуман в 1860 г. английским инженером **Б. Вудом**. Известен также сплав почти из тех же компонентов, называемый **анатомическим**, который плавится вообще при 60°C !

Здесь уместно рассказать про шутку зубных техников, широко использующих эти сплавы. Они отливают чайную ложку из таких сплавов и подсовывают ничего не подозревающему гостю при чаепитии. Ложка — почти как серебряная, такая же тяжелая и блестящая. Но когда гость начинает помешивать ею горячий чай, она плавится в стакане и в руках у изумленного гостя остается только «огрызок» ручки.

Свойство сплавов плавиться легче составляющих компонентов обуславливается так называемой **эвтектикой**, обозначающей сплавы с такими количественными соотношениями компонентов, которые обеспечивают минимальную температуру плавления. Отмеченные выше составы являются яркими примерами таких сплавов [43].

ЖИДКОСТИ

4.1. ПУТЕШЕСТВИЕ ВНУТРЬ ВОДЫ

Представим себе капельку воды размером 0,5 см. Если мы будем пристально разглядывать ее, то ничего кроме спокойной и сплошной воды не увидим. Даже под оптическим микроскопом при 2 000-кратном увеличении, когда капля примет размеры большой комнаты, мы все еще увидим относительно спокойную воду. Чтобы еще лучше разглядеть воду, увеличим ее опять в 2 000 раз. Теперь капля вырастет до 20 км, и она уже не такая спокойная и сплошная, и напоминает толпу на стадионе в день футбольного состязания с высоты птичьего полета. Чтобы рассмотреть еще получше, увеличим каплю еще в 250 раз. Нашему взору представится что-то похожее на рис. 4.1. Это капля воды, увеличенная в **миллиард раз**, но, конечно, картина эта условная. Прежде всего частицы изображены здесь упрощенно, с резкими краями — это первая неточность. Для простоты они расположены на плоскости, на самом же деле они блуждают во всех трех измерениях — это во-вторых. На рисунке видны кружочки двух сортов: большие — кислород, маленькие — водород; видно, что к каждому кислороду пристроились два водорода, образуя молекулу воды. Угол между атомами водорода равен $105^{\circ}3'$, а промежуток между центрами атомов кислорода и водорода равен $0,957 \text{ \AA}$. Наконец, третье упрощение заключается в том, что на картине молекулы находятся в покое, а настоящие частицы в природе находятся в непрерывном хаотическом движении.

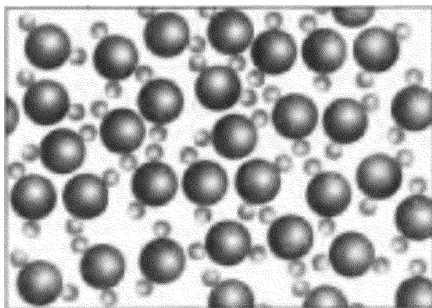


Рис. 4.1

На рисунке нельзя также показать, как молекулы притягиваются друг к другу. Можно сказать, что целые их группы «склеены» межмолекулярным взаимодействием. Вода сохраняет свой объем и не распадается на части именно из-за взаимного притяжения молекул. Даже катясь по стеклу, капля не растекается. Однако ни одна из молекул не способна протиснуться сквозь другую — если попробовать насильно прижать одну к другой, они оттолкнутся.

Движение молекул в веществе мы воспринимаем как теплоту — чем выше температура, тем сильнее движение. При нагреве воды хаотическое движение среди молекул усиливается, промежутки между ними растут, и наступает миг, когда притяжения между молекулами уже не хватает, чтобы удерживать их вместе — так получается водяной пар (рис.4.2). И наоборот, при понижении температуры хаотическое движение молекул воды постепенно утихает и они притягиваются ближе друг к другу. Притянувшимся друг к другу молекулам уже нелегко совершать хаотическое движение и им остается только колебаться друг относительно друга. На рис.4.3 показано, что бывает при низких температурах — образовался **лед**. Конечно, картинка эта опять условна, — у льда не два измерения, как здесь изображено, но в общих чертах она справедлива. В состоянии льда у каждой молекулы есть свое место, поэтому по всему его объему возникает определенная правильная расстановка молекул — **кристаллическая решетка**. Если потянуть за один конец ледяного кристалла, то за

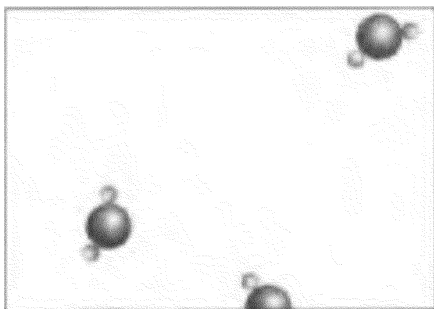


Рис. 4.2

ним, противясь разрыву, потянется и другой — в отличие от жидкой воды, в которой эта правильная расстановка разрушена интенсивными движениями атомов.

Хотя расстановка молекул льда на рис.4.3 достаточно условна, кое-какие свойства льда здесь отражены правильно. Например, показана часть шестигранной симметрии кристаллов льда — если повернуть рисунок на 120° , получится то же самое расположение. Вследствие такой симметрии все снежинки в природе шестигранны.

Из рис.4.3 можно понять главное свойство воды — ее «ненормальность»: отчего, растаяв, лед занимает меньший объем. В кристалле льда молекулы располагаются так, что атомы водорода ориентируются строго по направлению двух

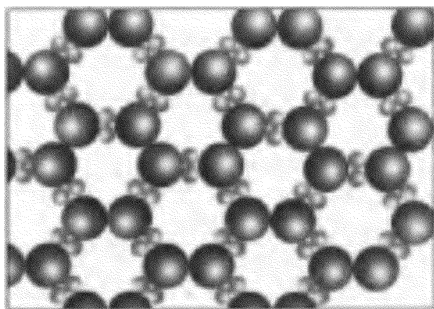


Рис. 4.3

соседних молекул. В результате возникает трехмерная кристаллическая решетка, состоящая из почти идеальных тетраэдров. Каждая молекула в его вершинах окружена четырьмя другими. У воды же нет такой упорядоченной структуры, расположение ее молекул все время меняется, но в любой момент каждую молекулу воды окружают 4–5 «соседок», так что среднее их число оказывается равным 4,4. Это означает, что молекулы воды в жидкости располагаются теснее, чем в кристалле, а потому вода плотнее льда. Большинство же простых веществ при плавлении расширяется, потому что в кристаллах атомы упакованы плотнее [62, 168, 177].

4.2. ИНТЕРЕСНЫЕ ФАКТЫ О ВОДЕ

- В среднем в организме растений и животных содержится более 50% воды.
- В составе мантии Земли воды содержится в 10–12 раз больше, чем количество воды в Мировом океане.
- При средней глубине в 3,6 км Мировой океан покрывает около 71% поверхности планеты и содержит 97,6% известных мировых запасов свободной воды.
- Если бы на Земле не было впадин и выпуклостей, вода покрыла бы всю Землю, и ее толщина была бы 3 км.
- Если бы все ледники растаяли, то уровень воды на Земле поднялся бы на 64 м и около 1/8 поверхности суши было бы затоплено водой.
- При выпаривании 1 кг морской воды в среднем образуется сухой остаток солей массой 34,5 г.
- Морская вода при обычной ее солёности замерзает при температуре $-1,91^{\circ}\text{C}$.
- Иногда вода замерзает при положительной температуре.
- При определенных условиях внутри нанотрубок молекулы воды образуют новое состояние, при котором они сохраняют способность течь даже при температурах, близких к абсолютному нулю.
- Вода отражает 5% солнечных лучей, в то время как снег — около 85%. Под лед океана проникает всего 2% солнечного света.

- Синий цвет чистой океанской воды объясняется избирательным поглощением и рассеянием света в воде.
- Официальное «химическое» название воды: дигидроген моноксид (т. е. H_2O).
- Существует следующая поговорка с использованием формулы воды: «Сапоги мои того — пропускают H_2O ». Вместо сапог в поговорке может участвовать и другая дырявая обувь.
- Вода — это одно из немногих веществ на Земле, которые расширяются при переходе из жидкой фазы в твердую (кроме воды, таким свойством обладают висмут, галлий и некоторые соединения и смеси).
- Вода может гореть, если ее поместить в атмосферу с фтором, иногда даже со взрывом. При этом выделяется кислород.
- При 20°C в комнате площадью 12 м^2 и высотой 3 м может находиться в виде пара около 600 г воды.
- Солнце испаряет на Земле за 1 мин миллиард тонн воды, каждый грамм которого уносит с собой 2265 Дж солнечной энергии. Эта энергия передается атмосфере: $2,2 \cdot 10^{10}\text{ Дж}$ за 1 мин . Столько энергии за то же время смогли бы выработать $40\,000\,000$ электростанций по 1 ГВт каждая.
- Максимум испарения мирового океана, в отличие от материков, приходится на зиму, т.к. зимой увеличивается разность температур между водой и воздухом, что ведет к усилению парообразования.
- Если к обычной воде добавить немного тонкого порошка несмачиваемой кремниевой кислоты, то образуется **сухая вода**. Она действительно суха и сыпуча, ее можно пересыпать, упаковывать в пакетики. На ощупь такая вода холодная и совсем не влажная [5, 55, 101, 130, 191].

4.3. ВЯЗКОСТЬ ЖИДКОСТЕЙ

Основы статистической теории строения жидкостей были заложены русским физиком-теоретиком **Я. И. Френкелем** (1894–1952). По этой теории молекула в жидкости бо́льшую

часть времени находится в фиксированном положении, совершая колебательное движение. Затем молекула скачком перекакивает в новое положение равновесия, где опять находится в колебательном движении. Таким образом молекула «кочует» по всему объему жидкости. Можно сказать, что с этой точки зрения молекулы жидкостей совмещают в себе как свойства молекул газов (находятся в хаотическом поступательном движении), так и свойства молекул твердых тел (совершают колебательные движения в положениях равновесия). Такое совмещение приводит, с одной стороны, к одинаковым наблюдаемым свойствам тел и, с другой стороны, к различным внутренним механизмам реализации этих свойств. В частности, это относится к вязкости газов и жидкостей.

Сила внутреннего трения, возникающая между движущимися слоями жидкости или газа, как известно, определяется уравнением Ньютона

$$F = \eta \left| \frac{du}{dz} \right| S, \quad (4.1)$$

где du/dz — быстрота изменения (градиент) скорости упорядоченного движения от слоя к слою; S — площадь контакта слоев; η — коэффициент пропорциональности, называемый вязкостью. **Вязкость** — свойство, характеризующее сопротивление течению газов и жидкостей под действием внешних сил. Хотя внешнее проявление вязкости для жидкостей и газов одинаково, но внутренние механизмы различны.

В газах расстояние между молекулами существенно больше радиуса действия молекулярных сил, поэтому вязкость газа определяется главным образом хаотическим движением молекул. Вследствие такого движения молекул между движущимися относительно друг друга слоями газа происходит постоянный обмен молекулами. Переход молекул из одного слоя в соседний, движущийся с иной скоростью, приводит к переносу от слоя к слою определенного импульса. В результате медленные слои ускоряются, а более быстрые замедляются. Перенос импульса между слоями возрастает при повышении температуры, поэтому и вязкость при этом возрастает.

В жидкостях, где расстояние между молекулами много меньше, чем в газах, вязкость обусловлена в первую очередь межмолекулярными взаимодействиями, ограничивающими подвижность молекул. В жидкости молекула может проникнуть в соседний слой лишь при образовании в нем полости, достаточной для перескакивания туда молекулы. На образование полости расходуется энергия (так называемая **энергия активации**) вязкого течения. Энергия активации падает с ростом температуры, поэтому повышение температуры ведет к уменьшению вязкости жидкостей.

Если вязкость жидкости η в формуле (4.1) зависит только от температуры и давления, то такая жидкость называется **ньютоновской**. Однако есть жидкости, называемые **неньютоновскими**, у которых η , кроме всего прочего, зависит от самой силы F : чем больше приложенная сила, тем меньше вязкость, что обуславливает их большое практическое применение (см. ст. 4.6). Газы в этом отношении всегда можно считать ньютоновскими [11, 47, 49].

4.4. СТАТИКА И ДИНАМИКА ЖИДКОСТЕЙ

Вследствие возможности молекул жидкости (и газа) свободно перемещаться относительно друг друга, справедлив **закон Паскаля**: давление жидкости в данной точке передается по всем направлениям без изменений. Напомним, что движение молекул полностью хаотично, и, следовательно, в отсутствии силы тяжести (или в состоянии невесомости) давление во всех точках жидкости будет одинаковым.

Закон Паскаля обуславливает **гидростатический парадокс**, заключающийся в том, что вес жидкости, налитой в сосуд, может отличаться от силы давления, оказываемой ею на дно сосуда. Так, в расширяющихся кверху сосудах сила давления на дно меньше веса жидкости, а в суживающихся — больше. В цилиндрическом сосуде обе силы одинаковы. Если одна и та же жидкость налита до одной и той же высоты в сосуды разной формы, но с одинаковой площадью дна, то, несмотря на различный вес налитой жидкости, сила давления

на дно одинакова для всех сосудов и равна весу жидкости в цилиндрическом сосуде. Это следует из того, что давление покоящейся жидкости зависит только от глубины под свободной поверхностью и от плотности жидкости. Поскольку гидростатическое давление всегда нормально к стенкам сосуда (в силу закона Паскаля), то сила давления на наклонные стенки имеет вертикальную составляющую, которая компенсирует вес излишнего объема жидкости в расширяющемся кверху сосуде и вес недостающего объема жидкости в суживающемся кверху сосуде.

Упорядоченное движение вязкой жидкости (или газа) без междуслойного перемешивания называется **ламинарным течением**. При увеличении скорости потока возникающие в жидкости случайные возмущения приводят к образованию хаотического **турбулентного движения**, при котором частицы жидкости совершают неустановившиеся, беспорядочные движения по сложным траекториям; в результате происходит интенсивное перемешивание жидкости. При ламинарном течении жидкости передача импульса от слоя к слою происходит за счет молекулярного механизма (вязкость), поэтому скорость потока жидкости в трубе плавно убывает от центра трубы к стенкам. При турбулентном потоке скорость почти постоянна по сечению трубы, резко убывая на самой границе жидкости со стенкой трубы. Соппротивление, оказываемое трубопроводом потоку жидкости при ламинарном режиме течения, меньше, чем при турбулентном.

Для ламинарного режима течения справедлив **закон Бернулли**, согласно которому полное давление (или **напор**) в установившемся потоке жидкости остается постоянным вдоль этого потока. Полное давление складывается из статического, весового и динамического давлений:

$$p_{\text{полн}} = p + \rho gh + \frac{\rho v^2}{2} = \text{const},$$

где ρ — плотность жидкости, h — ее высота относительно выбранного нулевого уровня, v — скорость. Этот закон установлен в 1738 г. швейцарским физиком и математиком **Даниилом Бернулли** (1700–1782).

В частности, из закона Бернулли следует, что при уменьшении сечения потока из-за возрастания скорости повышается динамическое давление и, соответственно, статическое давление падает. Явление понижения давления при увеличении скорости потока лежит в основе работы различного рода расходомеров, водо- и пароструйных насосов.

Из закона же Бернулли следует формула для скорости вытекания жидкости из сосуда через малое отверстие:

$$v = \sqrt{2gh},$$

где h — глубина отверстия относительно уровня жидкости в сосуде.

Отметим, что закон Бернулли справедлив в чистом виде только для жидкостей (и газов), вязкость которых равна нулю, т. е. жидкостей, не прилипающих к поверхности трубы. На самом деле экспериментально установлено, что скорость жидкости на поверхности твердого тела всегда в точности равна нулю. Именно поэтому на поверхностях, находящихся в потоке жидкости, всегда образуются наросты и осаднения; этим же объясняется и тот факт, что на лопастях крутящегося вентилятора всегда появляется слой пыли [49].

4.5. ЖИДКИЕ КРИСТАЛЛЫ

Жидкими кристаллами являются жидкости, молекулы которых имеют удлинённую палочкообразную форму. Силы взаимодействия «выстраивают» их параллельно друг другу и, таким образом, образуют в жидкости выделенное направление. Как и положено, молекулы совершают хаотическое движение, но с учетом единственного ограничения — при всех перемещениях сохраняется в целом выделенное направление осей молекул. Такое свойство в расположении молекул называется **дальним ориентационным порядком** (в отличие от **ближнего порядка** у молекул обычных жидкостей). У жидкости с дальним порядком будут различные оптические и тепловые характеристики в различных направлениях, т. е. она будет **анизотропной**. А ведь анизотропия всегда считалась отличительной чертой кристаллического состояния!

Жидкость описанного выше типа принадлежит обширному классу веществ, называемых **нематическими жидкими кристаллами**. Слово «немос» по-гречески означает «нить», и, действительно, молекулы таких жидких кристаллов напоминают бусинки, укрепленные на нити.

Возможны и другие типы молекулярной архитектуры, создающие анизотропию. Укладка молекул слоями и пачками приводит к еще одному классу жидких кристаллов — **смектическим**. Такая упаковка молекул создает анизотропию не только оптических, но и механических свойств, поскольку слои легко смещаются относительно друг друга. Название этой группы связано с греческим словом «смектос» — мыло. Такое расположение молекул характерно для мыльных растворов, эмульсий и т. д.

Третьим распространенным типом жидких кристаллов являются **холестерические**, в которых молекулы укладываются в плоскостях подобно описанным выше нематическим кристаллам, но сами плоскости повернуты друг относительно друга. При этом выделенное направление в ориентации молекул жидкости описывает в пространстве спираль. Названием этот класс жидких кристаллов обязан печально известному холестерину, у которого впервые были обнаружены подобные свойства.

Одним из наиболее впечатляющих эффектов жидких кристаллов, нашедшим широкое применение, является зависимость их прозрачности от величины приложенного электрического поля — при определенном значении поля жидкость становится непрозрачной. На использовании этого эффекта работают все современные жидкокристаллические мониторы и телевизоры.

Удивительные превращения происходят с лучом света при взаимодействии с холестерическим жидким кристаллом, т. е. периодической спиралью. Освещенный белым светом, он кажется окрашенным и при поворотах (смене угла наблюдения) начинает переливаться всеми цветами радуги потому, что в различных направлениях отражающие чешуйки кристалла расположены на различных расстояниях и отражают из белого цвета лишь волны определенной длины. Такой простой

эффект дает ошеломляющую возможность. Пусть участок поверхности нагрет на сотые доли градуса выше окружающих. Приложим к этой поверхности пленку с нанесенным слоем холестерического жидкого кристалла. В «горячей» точке шаг спирали чуть-чуть увеличится и на пленке появится точка иного цвета. Покрыв готовое изделие слоем холестерического вещества, можно получить цветную картину тепловых линий, на которых контрастными пятнами проступают любые дефекты и неоднородности, даже скрытые далеко в структуре, благодаря неодинаковой их теплопроводности.

Цвет окраски холестерического жидкого кристалла однозначен с температурой нагретой поверхности. Этот эффект лежит в основе разработанного преобразователя инфракрасного (теплого) изображения в видимое. Основной элемент этого устройства — пленка холестерического жидкого кристалла на тонкой черной мембране. Мембрана поглощает сфокусированное на ней тепловое излучение и передает тепло слою жидкого кристалла. Цвет жидкокристаллической пленки (в отраженном свете) зависит от температуры, поэтому при освещении пленки белым светом получается видимое изображение инфракрасного излучения. Напомним, что обычно для преобразования ИК-излучения в видимое используют преобразователи на основе фотоэмиссионных или фосфоресцирующих устройств с весьма сложной и дорогостоящей электроникой [49].

4.6. ТИКСОТРОПНЫЕ (НЕНЬЮТОНОВСКИЕ) ЖИДКОСТИ

Многие широко распространенные в быту жидкости не нашли бы применения, если бы их вязкость не уменьшалась, когда один слой жидкости сдвигают относительно другого. Такие жидкости называются **тиксотропными** или **неньютоновскими** (см. также ст. 4.3). Короче говоря, эти жидкости при малых деформациях сдвига не текут, но как только приложенная сила превысит некоторое пороговое значение, вязкость скачком уменьшается и жидкость становится текущей. Маргарин, например, было бы очень трудно размазывать при

комнатной температуре, если бы его вязкость не уменьшалась при размазывании ножом. Не менее важна и тиксотропность красок для малярных работ: они должны быть достаточно текучими, чтобы ровно ложиться на покрываемую поверхность при покраске, и в то же время достаточно вязкими, чтобы не подтекать после покраски (до того, пока не высохнут). К тиксотропным жидкостям относятся также кетчуп, желатиновые растворы, майонез, горчица, мед, крем для бритья и т. д.

Считается, что основной причиной тиксотропности жидкостей является изменение конфигурации расположения молекул под действием деформации сдвига. Например, длинные молекулы могут ориентироваться вдоль границы движущихся слоев, создаваемых при сдвиге, в результате чего вязкость уменьшается. Когда сдвигающее усилие снимается, молекулы восстанавливают свою прежнюю ориентацию и вязкость увеличивается.

Жидкая почва в болотах также представляет собой тиксотропную жидкость, и этим обусловлена опасность болотных трясин. Действительно, в любой нормальной (ньютоновской) жидкости брошенное в нее тело или плавает, или тонет в зависимости от соотношения архимедовой выталкивающей силы и силы тяжести. В принципе, такое же может наблюдаться и в тиксотропной жидкости, но если только это неживое тело. (Даже более того, если неживое тело имеет маленькую массу, то оно вообще может лежать на поверхности тиксотропной жидкости как на поверхности твердого тела.) Живое же тело в тиксотропной жидкости, в том числе и в болотной трясине, будет только тонуть (или, как говорят, «засасываться»). Связано это с тем, что любая попытка совершить движение (например, поднять руки) живым существом приводит к увеличению давления на жидкость со стороны нижних конечностей. Это приводит к уменьшению вязкости жидкости под ним и тело немного опускается вглубь. Всплыть же обратно живое тело не может, так как архимедовой силы недостаточно, чтобы уменьшить вязкость жидкости в обратном направлении. А движения живое тело будет совершать в любом случае, по крайней мере — это движения, связанные с дыханием. Хотя один вздох приводит всего лишь к мизерному погружению, но

это будет происходить неумолимо. Засасыванию также будет способствовать атмосфера, т.к. при попытке сместить тело в жидкой болотной почве образуется безвоздушная полость и атмосферное давление будет стараться заталкивать тело обратно в эту полость. Поэтому единственным спасением при попадании в трясину является наличие на расстоянии вытянутой руки твердой опоры, иначе вы — пропали. Не зря опытные люди при прохождении через болота берут длинные шесты, чтобы в случае чего использовать его в качестве такой опоры.

Вы легко можете приготовить дома тиксотропную жидкость и изучить ее свойства. Для этого нужны 120 мл клея ПВА (продается в любом магазине канцелярских товаров), 1 чайная ложка (5 мл) бурый (так называется химическое соединение тетраборат натрия; его можно купить в магазине фотохимикатов) и 0,5 л дистиллированной воды. Вылейте клей в поллитровую стеклянную банку, до краев заполните ее дистиллированной водой и хорошенько размешайте раствор. Налейте в двухлитровую чашку 1 стакан дистиллированной воды, насыпьте туда же чайную ложку бурый и помешивайте раствор, пока бурый полностью не растворится. После этого медленно, непрерывно помешивая, вылейте клей из банки в чашку с раствором бурый. Тиксотропная жидкость готова.

Теперь можно проверить ее свойства. Возьмите комок загустевшей жидкости из чашки и покатайте в руках, пока он не станет круглым. При этом жидкость быстро высыхает и шарик становится пластичным. Если уронить такой шарик на ровную поверхность, то он даже слегка подпрыгнет (как резиновый). Теперь возьмитесь за шарик обеими руками и резко потяните его в разные стороны — комок легко разрывается на части. Если же его тянуть в разные стороны медленно, то он растягивается, не разрываясь [11, 140, 149, 171].

4.7. О ПЛАВАНИИ ТЕЛ В ЖИДКОСТЯХ

Одним из самых приметных свойств подвижных сплошных сред — жидкостей и газов — на поверхности Земли (или другой планеты) является возникновение выталкивающей (ар-

химедовой) силы для тела, погруженного в эту среду. Физически появление выталкивающей силы обусловлено притяжением частичек жидкости или газа Землей. Вследствие такого притяжения вышележащие слои среды давят на нижележащие, что приводит к более высоким значениям давления в нижележащих слоях. Если пренебречь изменением плотности среды, то гидростатическое давление можно вычислить по формуле Паскаля: $p = \rho gh$, где h — глубина погружения тела в жидкость (газ); ρ — плотность жидкости (газа); g — ускорение свободного падения. Тогда можно показать, что разность этих давлений для нижней и верхней поверхностей погруженного в среду тела вызывает появление выталкивающей силы (силы Архимеда) $F_{\text{выт}} = \rho g V$, где V — объем погруженной части тела. Так как $\rho V = m$ — масса вытесненной телом жидкости (газа), то выталкивающая сила численно равна весу вытесненной телом жидкости (газа).

Из формулы для выталкивающей силы видно, что ее величина зависит как от плотности среды, так и объема погруженной в нее части тела, но не зависит от плотности самого погруженного тела. Поэтому возможны три разных случая: 1) если $F_{\text{выт}} > mg$, где mg — сила тяжести, действующая на тело со стороны Земли, то тело плавает (не тонет) на поверхности среды; 2) если $F_{\text{выт}} < mg$, то тело тонет; 3) если $F_{\text{выт}} = mg$, то тело находится в состоянии безразличного равновесия в любой точке среды. На использовании этих условий основано судоплавание: для надводных судов всегда выполняется первое условие, а вот подводные лодки используют все три условия.

Выталкивающая сила для тел в земной атмосфере достаточно мала, и во многих расчетах ею пренебрегают. С другой стороны, человек использует достаточно много устройств, действие которых основано на выталкивающей силе нашей атмосферы (самыми заметными из них являются аэростаты и дирижабли, см. ст. 1.29 на с. 61). А вот архимедова сила для тел, погруженных в жидкости, является существенной и пренебрегать ею при расчетах невозможно.

Мы все привыкли, что тяжелые сплошные тела, в том числе металлы, тонут в воде. Однако в жидкостях с большей

плотностью это может оказаться и не так. Например, в ртути многие металлы не тонут. Отсюда следующая задача.

Два сплошных цилиндра одинаковой массы и равного диаметра — алюминиевый (плотность $2,7 \text{ г/см}^3$) и свинцовый (плотность $11,3 \text{ г/см}^3$) — плавают стоймя в ртути (плотность $13,55 \text{ г/см}^3$). Который из цилиндров погружен глубже в ртуть?

Сама по себе задача не трудна, но порождает иногда ошибочные представления. Алюминиевый цилиндр в 4 раза длиннее свинцового, имеющего ту же массу и диаметр. Можно думать поэтому, что, плавая в ртути стоймя, он должен погружаться в нее глубже, чем свинцовый. С другой стороны, тяжелый свинец должен как будто глубже погружаться в жидкость при плавании, чем легкий алюминий.

Ни то, ни другое неверно: оба цилиндра погружаются при плавании на одинаковую глубину. Причина понятна: имея одинаковый вес (см. условие задачи), они по закону Архимеда должны вытеснять при плавании одинаковые объемы жидкости; а так как и диаметры их равны, то и длина погруженных частей обоих цилиндров должна быть одинакова — иначе они не вытесняли бы равных объемов ртути [95].

4.8. О «ПЛАВАНИИ» ПОВЕРХНОСТИ ЗЕМЛИ

Видоизменим задачу о цилиндрах, предложенную в предыдущей статье: во сколько раз алюминиевый цилиндр будет выступать над ртутью выше свинцового? Легко вычислить, что свинцовый цилиндр должен выступать на $0,17$ своей длины, а алюминиевый — на $0,8$. Но так как алюминиевый цилиндр длиннее свинцового в $4,2$ раза, то $0,8$ длины алюминиевого цилиндра больше $0,17$ длины свинцового в $0,8 \cdot 4,2 / 0,17 \approx 20$ раз. Итак, алюминиевый цилиндр будет возвышаться над уровнем ртути в 20 раз больше свинцового.

Рассмотренная задача имеет прямое применение в современном учении о структуре земного шара (см. ст. 3.56 на с. 366), а именно в так называемой **теории изостазии**. Изостазия (или **изостатическое равновесие**) означает гидростатическое равновесное состояние земной коры, при котором менее плотная земная кора (средняя плотность $2,8 \text{ г/см}^3$) «плавает»

в более плотном слое верхней части мантии (средняя плотность $3,3 \text{ г/см}^3$), подчиняясь закону Архимеда.

Теория изостазии возникла в результате геофизических наблюдений. Земная кора в этой теории рассматривается как совокупность призм равного сечения и веса, но разной высоты (как в нашей задаче — только у нас в задаче не призмы, а цилиндры). Тогда по соображениям, вытекающим из нашей задачи, более возвышенные части земной поверхности должны соответствовать призмам меньшей плотности, менее возвышенные — призмам большей плотности. Но мы знаем, что плотность земной коры практически неизменна. Тогда остается предположить, что под наружными возвышениями земной коры (например, под горами) имеется дефект массы (пещеры и полости) или, другой вариант, земная кора погружена в мантию на большую глубину, чем прилегающие области. Геодезические измерения вполне подтверждают эту теорию. В изостатическом равновесии находятся достаточно крупные (100–200 км) блоки (плиты) земной поверхности. Теория изостазии играет большую роль в объяснении дрейфа континентов и тектонических плит [95].

4.9. УРОВЕНЬ ВОДЫ СО ЛЬДОМ

Вот вам очень популярная задача: что произойдет с уровнем воды в стакане, где плавает кусок льда, когда этот лед растает? Повысится он или понизится?

По закону Архимеда кусок льда до таяния вытесняет количество воды, равное его собственному весу:

$$m_{\text{л}}g = \rho_{\text{в}}gV_{\text{выт.в}} \quad \text{или} \quad m_{\text{л}} = \rho_{\text{в}}V_{\text{выт.в}}.$$

После того, как лед растает, образовавшаяся вода будет иметь такую же массу: $m_{\text{обр.в}} = m_{\text{л}}$. Следовательно,

$$\rho_{\text{в}}V_{\text{обр.в}} = \rho_{\text{в}}V_{\text{выт.в}} \quad \text{или} \quad V_{\text{обр.в}} = V_{\text{выт.в}},$$

т. е. растаяв, лед заполнит в точности тот объем, который занимал раньше в воде.

Таким образом, уровень воды останется прежним [16, 89, 128].

4.10. ЛОДКА В БАССЕЙНЕ

Допустим, что в бассейне плавает лодка. Как изменится уровень воды в бассейне, если из лодки в бассейн бросить камень? Что произойдет с уровнем воды в бассейне, если в днище лодки проделать отверстие и лодка начнет погружаться? Эта задача знаменита тем, что при попытке сразу ответить на поставленные вопросы интуиция часто подводит, так что даже некоторые очень известные физики давали неправильные ответы.

Ясно, что если камень из лодки выбросить на берег бассейна, то уровень воды в бассейне понизится. Это происходит потому, что лодка становится легче, она всплывает и объем вытесняемой ею воды уменьшается.

Не так очевиден тот факт, что уровень воды в бассейне понизится и в том случае, когда камень выбрасывают в бассейн, хотя понижение уровня теперь будет несколько меньше. В самом деле, когда камень лежит на дне, вытесняемый им объем воды равен объему камня. Пока же он находился в лодке, лодка вытесняла дополнительный объем воды, масса которого согласно закону Архимеда была равна массе камня. Так как плотность камня больше плотности воды, то этот объем больше объема самого камня.

А что если из лодки в бассейн выбросить деревянный предмет, например, бревно?

Если бревно выбрасывается на берег, то тогда нет никакой принципиальной разницы со случаем, когда выбрасывается камень: уровень воды в бассейне понизится. Совсем другое дело, когда бревно выбрасывают в воду. В этом случае уровень воды в бассейне останется прежним, хотя лодка, конечно, несколько всплывет. Ведь бревно плавает на поверхности и, значит, вытесняет такой же объем воды, какой раньше (т. е. до выбрасывания бревна) дополнительно вытесняла лодка.

Итак, если выброшенный из лодки в воду предмет плавает, то уровень воды в бассейне остается без изменения. Если же предмет тонет в воде, то уровень воды понижается.

Теперь, когда мы разобрались с первым вопросом, не составит большого труда ответить на вопрос, будет ли изменяться

уровень воды в бассейне, если в днище лодки проделать отверстие. Будем считать, что заполнение лодки водой через отверстие происходит медленно, небольшими порциями, так что пока лодка не утонет, она в каждый момент находится в равновесии на поверхности воды. Пока лодка находится на плаву, уровень воды в бассейне не меняется и объем погруженной части лодки увеличивается ровно на столько, сколько воды (по объему) вошло в лодку. В некоторый момент, набрав определенное количество воды, лодка уже не сможет оставаться в равновесии на плаву и начнет погружаться на дно. С этого момента и произойдет понижение уровня воды в бассейне.

Все вышесказанное можно проверить экспериментально, взяв тазик с водой в качестве бассейна и пустую консервную банку в качестве лодки [20, 128].

4.11. ФОКУС С ПЛАВАНИЕМ ЯЙЦА В ВОДЕ

Сила Архимеда лежит в основе показа одного замечательного фокуса. Для его проведения вам нужны стеклянная банка и сырое яйцо (опыт можно провести и с картофелем).

Опустите яйцо в стеклянный сосуд, наполовину заполненный водой, — оно плавает на ее поверхности. Вы спрашиваете: «Что будет с яйцом, если подлить в сосуд воды?» Обычно отвечают, что яйцо всплывет. Тогда вы начинаете осторожно подливать воду, пока сосуд не наполнится полностью. Однако яйцо, к удивлению зрителей, остается на старом уровне и спокойно плавает внутри жидкости. В чем же секрет фокуса?

Весь секрет в том, что вначале в сосуд наливается водный раствор поваренной соли (зрители об этом не знают). По виду такой раствор ничем не отличается от чистой воды, но плотность его больше, чем плотность воды. Плотность же яйца (как и картофеля) чуть больше плотности чистой воды, но меньше, чем плотность солевого раствора. Из-за этого яйцо спокойно плавает на поверхности солевого раствора. Когда же вы начинаете подливать (очень осторожно, чтобы жидкости не смешивались) чистую воду, яйцо все так же остается на поверхности солевого раствора [38, 189].

4.12. О ТЕПЛОВОМ РАСШИРЕНИИ ЖИДКОСТЕЙ

Как известно, самым сильным расширением при нагревании отличаются газы. Это свойство газов человеком давно и с успехом используется в технике; фактически работа всех тепловых двигателей основана на этом. При обычных условиях широко распространенные газы по своим свойствам аналогичны идеальному, что во многих случаях ведет к потере ими своей индивидуальности. Это относится и к тепловому расширению: их коэффициент объемного расширения одинаков и равен $\beta = 1/273,15 \approx 0,00366 \text{ K}^{-1}$. Однако для жидкостей это уже не так и каждая из них имеет свой индивидуальный коэффициент.

Экспериментально обнаружено, что при достаточно высоких температурах ($\gtrsim 0^\circ\text{C}$) относительное изменение объема жидкостей прямо пропорционально их температуре:

$$\frac{\Delta V}{V_0} = \beta t, \quad \text{или} \quad V = V_0(1 + \beta t),$$

где V_0 — объем жидкости при температуре 0°C ; V — то же самое при температуре t ; β — **температурный коэффициент объемного расширения**, характерный для каждой жидкости.

Сильнее всего расширяется **эфир** с коэффициентом $\beta = 0,0016 \text{ K}^{-1}$, что в 32 раза больше, чем у воды при температуре 5°C ($\beta = 0,000053 \text{ K}^{-1}$), но более 2 раз меньше, чем у газов при обычных условиях. Однако эфир не является рекордсменом: существует жидкость, расширяющаяся в 9 раз сильнее эфира, — это **жидкая углекислота** (CO_2) при 20°C . Ее коэффициент расширения равен $0,015 \text{ K}^{-1}$, т. е. в 4 раза больше, чем у газов. Коэффициент расширения жидкостей вообще быстро растет с приближением к критической температуре, превосходя во многих случаях коэффициент расширения газов [95].

4.13. О СЖИМАЕМОСТИ ЖИДКОСТЕЙ

Несжимаемость жидкостей подчеркивается многими учебниками так настойчиво, что внушается мысль, будто жидкости в самом деле несжимаемы. На самом деле «несжимае-

мость жидкостей» — лишь фигуральное выражение для их весьма слабой сжимаемости **по сравнению с газами**. Действительно, по сравнению с газами сжимаемость жидкостей ничтожна: в десятки тысяч раз меньше. Если же сопоставлять сжимаемость жидкостей со сжимаемостью твердых тел, то окажется, что жидкость сжимается во много раз сильнее их.

К примеру, наиболее сжимаемый из металлов — свинец — уменьшает при всестороннем сжатии свой объем на $6 \cdot 10^{-6}$ от первоначального под давлением в 1 атм. Между тем, вода под таким же давлением сжимается на $5 \cdot 10^{-5}$ (точнее — на $1/22\,000$) от первоначального объема, т.е. приблизительно в 8 раз сильнее, и примерно также продолжает сжиматься при дальнейшем возрастании давления. По сравнению же со сталью вода сжимается в 70 раз больше. Весьма сильной сжимаемостью из жидкостей отличается азотная кислота: она сокращает свой объем под давлением в 1 атм на $3,4 \cdot 10^{-4}$ от первоначального, т.е. в 500 раз больше стали.

Бытует и другая крайность, связанная со сжимаемостью воды и состоящая в следующем. Давление воды в глубинах океана достигает огромных величин. На глубине 10 м давление воды примерно равно 1 атм, на глубине 100 м — 10 атм, на 1000 м — 100 атм и т.д. (см. ст. 1.22 на с.45, а также ст. 1.27 на с.58). Океан же может иметь глубину в несколько километров, достигая в самых глубоких частях Тихого океана более 11 км. На глубине Марианского жёлоба (11,5 км) давление достигает почти 1200 атм. Говорят, что столь чудовищное давление так уплотняет воду, что утонувшие корабли и прочие тяжелые предметы висают в ней и не тонут, как, например, железо не тонет в ртути.

Однако подобное мнение не обосновано. Если бы мы захотели сжать воду до такой плотности, чтобы в ней плавало железо, необходимо было бы уплотнить ее почти в 8 раз. Между тем для уплотнения воды только вдвое, т.е. сокращения объема наполовину, необходимо давление 11000 атм. Это соответствует глубине 110 км ниже уровня океана, чего быть не может! На самом деле вода в самом глубоком месте океана уплотнена всего лишь на 5%. Это почти не может повлиять на условия плавания в ней различных тел, тем

более что твердые предметы, погруженные в такую воду, также подвергаются этому давлению и, следовательно, тоже уплотняются.

Слабая (по сравнению с газами) сжимаемость воды давно используется в кинематографии для съемки эффектных кадров. Например, если выстрелить из ружья по сосуду, заполненному водой, то он разлетается в щепки, а вода превращается в облако пыли. Связано это с тем, что пуля проникает в воду так быстро, что ее уровень не успевает подняться. Вода поэтому должна мгновенно сжаться на величину объема пули. Возникающее сильнейшее давление разносит стенки сосуда и распыляет воду. Этим же объясняется и сильное разрушительное действие глубинных бомб и снарядов, взрывающихся под водой: если взрыв произойдет даже в 50 м от подводной лодки (но достаточно глубоко, чтобы сила взрыва не рассеялась на поверхности моря), то лодка неминуемо погибает.

Шотландский физик **П. Г. Тэт** (1831–1901) после обработки результатов глубоководных измерений кругосветной научной экспедиции корвета «Челленджер» (1872–1876 гг.) сделал интересные вычисления: если бы земное притяжение внезапно прекратилось и вода сделалась невесомой, то уровень воды в океане поднялся бы в среднем на 35 м вследствие того, что сжатая вода приобрела бы нормальный объем. Океан затопил бы при этом громадную территорию суши в 5 000 000 км² [43, 47, 70, 93, 95, 98, 168].

4.14. НОВОЕ РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ О БАССЕЙНЕ

Имеется следующая (арифметическая) задача, задаваемая учащимся, как правило, в начальной школе.

Бассейн может быть наполнен водой из крана за 8 ч, а опорожнен через выпускное отверстие (при закрытом кране) за 12 ч. За сколько времени наполнится он, если при открытом выпускном отверстии держать первоначально пустой бассейн под открытым краном?

Считается, что автором этой задачи является Герон Александрийский (см. ст. 2.36 на с. 171), и за две тысячи лет она успела проникнуть в школьные задачки по математике.

Классически эта задача решается следующим образом. Бассейн наполняется быстрее, чем опорожняется: в него ежедневно поступает $1/8$ его вместимости, а вытекает $1/12$. Значит, за каждый час вода прибывает в количестве $1/8 - 1/12 = 1/24$ вместимости всего бассейна. Ясно, что за 24 ч бассейн должен наполниться до краев.

Однако с точки зрения физики это традиционное решение является ошибочным, так как оно опирается на незаконное допущение, будто вытекание воды из бассейна с понижающимся уровнем происходит равномерной струей. На самом деле **скорость вытекания уменьшается по мере понижения уровня** согласно формуле $v = \sqrt{2gh}$ (см. ст. 4.4 на с. 376). Неправильно поэтому принимать, как делают школьники на уроках математики, что если весь бассейн опорожняется за 12 ч, то за каждый час вытекает $1/12$ ее объема. Если в начале наливания, пока уровень невысок, вытекает меньше $1/12$ объема бассейна, а при высоком уровне воды — больше $1/12$, то количество вытекающей воды в какой-то момент может стать равным и $1/8$ объема бассейна. Значит, расход может сравняться с приходом раньше, чем вода дойдет до краев бассейна, и с этого момента уровень воды повышаться больше не будет: все, что наливается из крана, будет уходить через выпускное отверстие. Понятно, что при таких условиях бассейн никогда не наполнится. Математический расчет, как увидим далее, подтверждает правильность сказанного.

Пусть при закрытом выпускном отверстии бассейн наполняется за время $\Delta t_{\text{нап}}$, а опорожняется при закрытом кране за время $\Delta t_{\text{оп}}$. Установим зависимость между этими параметрами бассейна и высотой $h_{\text{пост}}$ постоянного уровня, какого достигает вода, если бассейн наливать при открытом выпускном отверстии.

Легко видеть, что если за бесконечно малый промежуток времени dt уровень воды опускается при выливании на dh , то из выпускного отверстия за это же время должна вытечь вода объемом $S dh$, где S — площадь бассейна. Этому объему соответствует равновеликий объем столба струи из выпускного отверстия: $-S dh = sv dt$, где s — площадь выпускного отверстия; v — скорость вытекающей струи (знак минус здесь

поставлен из-за того, что dh и dt разных знаков). Отсюда найдем скорость опускания уровня воды в ванне: $-dh/dt = sv/S$. Но скорость v струи жидкости, вытекающей из отверстия сосуда, определяется известной формулой $v = \sqrt{2gh}$, поэтому

$$-\frac{dh}{dt} = \frac{s}{S} \sqrt{2gh}. \quad (4.2)$$

Выразим полученную скорость опускания уровня воды через время $\Delta t_{\text{оп}}$ опорожнения бассейна при закрытом кране. Для этого выразим dt из (4.2) и проинтегрируем обе части полученного равенства:

$$dt = -\frac{S}{s} \frac{dh}{\sqrt{2gh}}, \quad \int_0^{\Delta t_{\text{оп}}} dt = -\frac{S}{s} \int_H^0 \frac{dh}{\sqrt{2gh}},$$

$$\Delta t_{\text{оп}} = \frac{S}{s} \int_0^H \frac{dh}{\sqrt{2gh}} = \frac{S}{s\sqrt{2g}} \cdot 2\sqrt{H},$$

где H — глубина бассейна. Отсюда

$$\frac{s}{S} \sqrt{2g} = \frac{2\sqrt{H}}{\Delta t_{\text{оп}}}$$

и формула (4.2) примет вид

$$-\frac{dh}{dt} = \frac{2\sqrt{H}}{\Delta t_{\text{оп}}} \sqrt{h}. \quad (4.3)$$

С другой стороны, вода из крана при наполнении бассейна выливается с постоянной скоростью и, соответственно, скорость повышения уровня воды при закрытом выпускном отверстии можно определить по формуле

$$\frac{dh}{dt} = \text{const} = \frac{H}{\Delta t_{\text{нап}}}. \quad (4.4)$$

Уровень делается постоянным, когда скорость его понижения сравнивается со скоростью повышения, т. е. когда правая

часть (4.3) будет равна правой части (4.4):

$$\frac{2\sqrt{H}}{\Delta t_{\text{оп}}} \sqrt{h_{\text{пост}}} = \frac{H}{\Delta t_{\text{нап}}},$$

откуда доля высоты бассейна, которую составит установившийся уровень воды, равна

$$\frac{h_{\text{пост}}}{H} = \frac{\Delta t_{\text{оп}}^2}{4\Delta t_{\text{нап}}^2}. \quad (4.5)$$

После подстановки числовых данных нашей задачи получаем, что ванна нальется только на $h_{\text{пост}}/H = 9/16$ своей высоты. Сколько бы ни длилось далее наливание, уровень воды больше повышаться не будет.

Интересно, при каком же условии бассейн с открытым выпускным отверстием может быть наполнен до краев? Очевидно, тогда, когда $h_{\text{пост}}/H = 1$, т. е. когда $\Delta t_{\text{оп}} = 2\Delta t_{\text{нап}}$. Значит, если продолжительность наполнения вдвое меньше продолжительности опорожнения, бассейн и при открытом выпускном отверстии может быть наполнен до краев.

Другой вывод, который следует из формулы (4.5), состоит в том, что если кран открыт и бассейн не опорожняется мгновенно, то $h_{\text{пост}}$ никогда не равно нулю: слой воды в бассейне всегда будет иметь конечную высоту.

Возвращаясь к нашей задаче, заметим, что хотя мы определили, что бассейн заполнится лишь на $9/16$ своей высоты, невыясненным остался вопрос о времени его заполнения до этого уровня. Попробуем его найти.

Скорость повышения уровня воды в бассейне, наполняемом при открытом выпускном отверстии, получится, если из скорости (4.4) поднятия уровня при закрытом отверстии отнять скорость (4.3) опускания уровня в непополняемом резервуаре:

$$\frac{dh}{dt} = \frac{H}{\Delta t_{\text{нап}}} - \frac{2\sqrt{H}}{\Delta t_{\text{оп}}} \sqrt{h}. \quad (4.6)$$

Можно сразу же видеть, что при стремлении h к значению постоянного уровня

$$h_{\text{пост}} = \frac{\Delta t_{\text{оп}}^2}{4\Delta t_{\text{нап}}^2} H$$

скорость его повышения все уменьшается: чем ближе вода к предельному уровню, тем медленнее она к нему стремится. Ясно, что она никогда этого уровня не достигнет, а может лишь сколь угодно близко к нему подойти, поэтому время заполнения бассейна до предельного уровня бесконечно велико.

Но для целей практических можно поставить вопрос несколько иначе. Практически почти безразлично, дошла ли вода до предельного уровня или не достигла его, скажем, на 0,01 долю его высоты. Продолжительность же такого «почти достижения» вполне возможно вычислить. Для этого необходимо выразить из (4.6) dt и проинтегрировать обе части полученного выражения. Для нашей задачи соответствующий расчет времени заполнения бассейна до уровня $0,99h_{\text{пост}}$ дает значение 38,7 ч (сравните со значением 24 ч из первого решения) [95].

4.15. ВОДЯНЫЕ ЧАСЫ

Почему в старину повсеместно применялись песочные часы, а водяные — очень редко?

Это связано с тем, что процессы, происходящие в водяных и песочных часах, различны. В песке внутреннее трение имеет значительную величину (значительно бóльшую, чем у воды), поэтому в песчаном грунте можно сделать небольшой свод, и он будет держаться. Но если мы будем все больше и больше расширять этот свод, то он рано или поздно обрушится. На этом принципе и работают песочные часы. Если хорошо приглядеться к ним, то можно увидеть, что сразу же после их переворачивания сверху высыпается немного песка; затем в верхней колбе у отверстия образуется постоянно обрушивающийся свод, величина которого зависит только от сорта песка, определяющего внутреннее трение в нем. Свод этот имеет постоянную высоту, и безразлично, какова будет высота слоя

песка над сводом, ибо давление песка у отверстия будет постоянным. Поэтому и скорость истечения песка будет тоже постоянной.

У воды же вследствие малости внутреннего трения скорость истечения воды v зависит от высоты ее уровня h : $v = \sqrt{2gh}$ (см. ст. 4.14). Поэтому, если из сосуда, вмещающего, например, 30 л воды, в первую секунду вытекает 1 л, то полное опорожнение сосуда произойдет не за 30 с, как если бы вода вытекала равномерно, а за вдвое больший срок. Для часов такая неравномерность не годится.

Знаменитый французский физик **Э. Мариотт** (1620–1684) придумал сосуд (**сосуд Мариотта**), из которого хотя бы часть времени жидкость вытекает равномерно (рис. 4.4).

Это бутылка с узким горлом, заполненная жидкостью, через пробку которой вставлена стеклянная трубка 1. Если открыть кран 3 ниже конца трубки 1, то жидкость будет выливаться из него с одним и тем же напором, пока уровень воды в сосуде не опустится до нижнего конца 2 трубки.

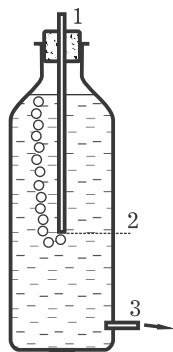


Рис. 4.4

Как это происходит? При открытии крана 3 под действием атмосферы прежде всего выливается вода из стеклянной трубки 1. Уровень жидкости внутри нее опускается до конца 2 трубки. Далее воздух через трубку 1 поступает в верхнюю часть сосуда и теперь выталкивает через кран 3 воду сосуда. При этом на уровне 2 давление равно атмосферному. Значит, вода из крана 3 вытекает лишь под давлением слоя воды 2–3, потому что давление атмосферы изнутри и снаружи сосуда уравнивается. А так как толщина слоя 2–3 остается постоянной, то и струя вытекает с одинаковой скоростью.

Сосуд Мариотта достаточно легко сконструировать самостоятельно из пластиковой бутылки из-под лимонада и трубочки от кока-колы. Следует заметить, однако, что в качестве измерителя времени сосуд Мариотта не прижился, видимо, из-за сложности [8, 20, 44].

4.16. ВОДЯНОЙ МЕТРОНОМ

Воспользовавшись идеей, заложенной в конструкцию сосуда Мариотта (см. ст. 4.15), можно создать устройство, которое будет отмерять время как в настоящих часах — с помощью периодических (колебательных) процессов. Поскольку процессы в настоящих часах являются саморегулирующимися, то предлагаемую аэрогидродинамическую систему можно назвать **автоколебательной**.



Рис. 4.5

Нужны две полуторалитровые пластиковые бутылки из-под лимонада и трубочка от кока-колы длиной 15 см и внутренним диаметром 4–5 мм. Отвинтите крышки и проделайте в них отверстия, чтобы через них могла проходить трубочка от кока-колы. Далее крышки с пропущенной через них трубочкой надо закрепить доньшками, например, с помощью пластилина или полимерного клея. Теперь налейте в одну бутылку примерно на треть воду и навинтите на нее систему из крышек с трубкой. Сверху надо закрутить вторую бутылку (пустую). Часы готовы (рис. 4.5).

Переверните систему — вода сразу же начинает вытекать через трубку в нижнюю бутылку. Однако примерно через секунду струя самопроизвольно перестает течь, и через трубку из нижней бутылки в верхнюю продавливается порция воздуха. Потом вода опять начинает вытекать и все повторяется снова.

Система действительно является автоколебательной, так как период смены встречных потоков воды и воздуха через соединительную трубку определяется разницей давлений в верхней и нижней бутылках и регулируется автоматически. О колебаниях давления в системе свидетельствует поведение боковых стенок верхней бутылки, которые в такт с выпуском воды и впуском воздуха периодически сдавливаются и расширяются [174].

4.17. СИФОН

Когда необходимо перекачивать жидкость из одной емкости в другую, частенько пользуются **сифоном** (от древнегреч. *σιφων* — трубка, насос). Сифон — простейшее устройство для перекачки жидкостей — представляет собой шланг (рис. 4.6, а), один конец которого опускается в перекачиваемую жидкость, а другой — в пустую емкость. Для того, чтобы жидкость начала перетекать, предварительно необходимо из шланга удалить воздух. Для этого можно погрузить весь шланг в жидкость, чтобы она полностью заполнила его. Теперь, заткнув один конец шланга пальцем, необходимо вытянуть его в пустую емкость — из шланга непрерывной струей польется жидкость.

Вопреки распространенному мнению жидкость в сифоне течет не под действием атмосферного давления — известно, что сифоны могут действовать и в вакууме. Когда сифон начинает действовать, в его выходном колене находится больше жидкости, чем во входном. Под действием возникающей разности масс жидкость поднимается вверх, перетекает через перегиб шланга и вытекает из сифона. При этом жидкость в сифоне представляет собой одно целое — **жидкую нить**, удерживаемую от разрыва внутренними межмолекулярными силами, существующими в самой жидкости.

Хорошей механической аналогией сифону является движение веревки, перекинутой через невесомый блок (рис. 4.6, б). Движение веревки в такой системе осуществляется за счет разницы масс частей веревки по разные стороны от блока, причем разность масс все время остается постоянной (пока достаточен запас веревки). Так же, как и в сифоне для того,

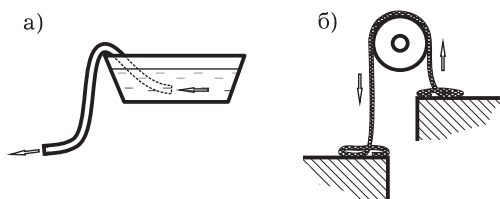


Рис. 4.6

чтобы веревка начала свое движение, необходимо ее вытянуть, перекинув через блок, на достаточную длину.

Из вышесказанного понятно, что жидкая нить в сифоне находится в растянутом состоянии. Если вы, однако, думаете, что ее легко разорвать, то ошибаетесь — прочность жидкостей на разрыв огромна. Например, для воды она достигает почти 10 000 атм, что сравнимо с прочностью стальной проволоки. Наше представление о легкости, с какой жидкости разделяются на части, связано с наблюдением поверхностного переливания, но не внутреннего разрыва. Механической аналогией этому явлению может служить растягивание бумажного листа: пока лист целый, необходимо прикладывать достаточно большое усилие, чтобы разорвать его; но как только мы сделаем у края листа поперечный разрез, то он легко разрывается даже при малых усилиях.

Из сказанного выше следует, что теоретически перегиб сифона можно поднимать на очень большую высоту, и жидкая нить при этом не разорвется. Практически, однако, положение перегиба ограничено небольшими высотами. Дело в том, что растянутое состояние жидкости является неустойчивым состоянием и выходом из нее для жидкости является образование пузырьков пара (это так называемое явление **кавитации**). Кроме того, в любой жидкости имеются растворенные газы (см. ст. 4.54 на с. 452). Чем выше перегиб сифона, тем меньше становится внутри него давление — за счет растяжения частями жидкости в разных коленах. Если перегиб сифона поднять достаточно высоко, то давление в жидкости может понизиться до такой степени, что в ней начнут образовываться пузырьки пара и выделяться пузырьки растворенных газов.

Именно этим и ограничивается высота сифона, так как пузырьки нарушают межмолекулярные связи внутри жидкости и уменьшают тем самым прочность жидкости на разрыв (см. выше пример с растяжением бумажного листа). При атмосферном давлении сифоны действуют лучше, чем в вакууме, поскольку в этом случае давление жидкости в сифоне выше, а это ведет к увеличению высоты, на которой начнут образовываться пузырьки.

Кстати, правильное объяснение работы сифона было дано еще 2000 лет назад великим греческим механиком Героном Александрийским (см. ст. 2.36 на с.171). Позднее, видимо, эти знания были потеряны, т.к. древние римляне, подводившие к городам воду с горных источников по специальным каналам-акведукам, обязательно учитывали уклон для течения воды, прорубая, в случае необходимости, тоннели через встречающиеся на пути возвышенности, хотя могли этого не делать [5, 38, 51, 95, 118, 131, 140, 150].

4.18. ЗАПУСК СИФОНА

Как уже указывалось в предыдущей статье, для того, чтобы сифон начал работать, его надо предварительно заполнить перекачиваемой жидкостью (чтобы образовалась жидкая нить). Самый простой способ сделать это — погрузить весь шланг в жидкость, а затем вытянуть один конец шланга, заткнув его пальцем. Однако на практике не всегда имеется физическая возможность для таких действий.

Другой распространенный способ — вытягивание жидкой нити путем создания в сифонной трубке разрежения, например, ртом. Наверное, такой процесс многие наблюдали в жизни — это когда водители отливают бензин из бака автомобиля. Однако такой способ нежелателен: во-первых, это не гигиенично, а во-вторых, можно с большой вероятностью глотнуть бензин, что неприятно и, главное, вредно для человеческого организма. Поэтому сифонную трубку необходимо модернизировать.

Для этого у одного из концов сифонной трубки сделайте небольшую дырку и этот конец пропустите через два отверстия в небольшой пластиковой бутылочке у ее основания так, чтобы дырка оказалась внутри бутылочки (рис.4.7). Трубку в отверстиях необходимо загерметизировать. Теперь жидкость можно всасывать через бутылочку,

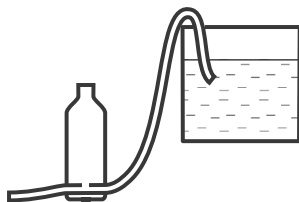


Рис. 4.7

заткнув пальцем конец трубки. Как только жидкость появится в бутылочке, палец с конца трубки можно убрать — сифон начнет действовать, а вы избежите опасности глотнуть жидкость.

Существует и третий (достаточно малоизвестный) способ создания первоначальной жидкой нити в сифоне. Его принцип понятен из следующего опыта.

Берется стеклянная трубка и ее верхнее отверстие плотно закрывается пальцем. В таком виде трубка погружается в сосуд с водой где-то на половину ее высоты. При этом в трубку проникнет совсем мало воды, т.к. этому мешает сжатый в трубке воздух. При отнятии пальца вода в трубке устремляется вверх, и можно увидеть, что в первый момент она поднимется по трубке выше, чем уровень воды в сосуде; лишь затем уровни в трубке и вне ее сравняются. Объясняется это тем, что в момент отнятия пальца вода в нижнем конце трубки обладает скоростью $v = \sqrt{2gh}$, где h — глубина конца трубки под уровнем воды в сосуде (см. ст.ст. 4.4, 4.14). При дальнейшем подъеме воды в трубке скорость эта не уменьшается действием тяжести, так как движущаяся порция воды все время подпирается снизу другими порциями восходящей воды. В итоге вода, движущаяся в трубке, достигает уровня воды в сосуде с начальной же своей скоростью $v = \sqrt{2gh}$. Нетрудно сообразить, что теоретически она должна взлететь вверх еще на такую же высоту h . Однако трение заметно уменьшает высоту этого подъема.

Легко догадаться, как может быть использовано описанное явление для пуска в действие сифона. Закрыв плотно пальцем один конец сифона, погружают другой в жидкость возможно глубже для увеличения начальной скорости. Затем быстро отнимают палец от трубки: жидкость поднимается в ней выше наружного уровня, перельется через перегиб в другое колено и сифон начнет работать [51, 95, 140].

4.19. АВТОМАТИЧЕСКИЙ СИФОН

Все описанные в предыдущей статье способы пуска в действие сифона в реальной жизни малопрактичны. Возможны,

однако, такие схемы пуска сифона, которые автоматизируют этот процесс.

Один из вариантов такого автоматического сифона приведен на рис. 4.8, а. Для его изготовления нужна пластиковая бутылка из-под лимонада, в пробке которой надо проделать два отверстия под диаметр сифонной трубки. Трубка сифона разрезается на две части, которые вдеваются в отверстия пробки и герметично закрепляются (в начале опытов для герметизации можно использовать пластилин). В принципе, автоматический сифон готов.

Перед применением сифона бутылку надо наполнить той же жидкостью, что и перекачиваемая. Закрутите пробку на наполненную бутылку (вращая саму бутылку) и опустите одну трубку в жидкость, а другую — в пустую емкость. Переверните бутылку — жидкость через колено 2 начнет вытекать в пустую емкость, образуя в бутылке над жидкостью разрежение (рис. 4.8, б). Это разрежение ликвидирует вначале воздушную пробку в колене 1 сифона, а затем вытянет жидкую нить — сифон заработал. После этого уровень жидкости в бутылке не будет меняться. (В принципе, можно было бы сначала перевернуть бутылку, дождаться, когда из трубок польется жидкость, и только после этого сунуть трубку 1 в перекачиваемую жидкость — в этом случае в трубке 1 не будет воздушной пробки.)

Еще один вариант схемы для автоматического запуска сифона был предложен в 1915 г. русским изобретателем **И. Блаженовым**, а затем в 1935 г. — **С. Д. Платоновым** (принципиально схемы не отличаются друг от друга). Эта

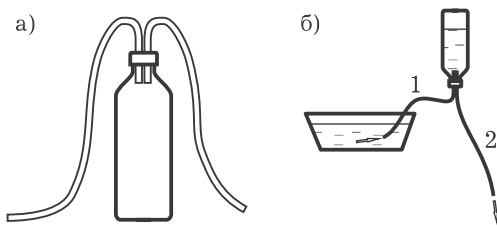


Рис. 4.8

схема также достаточно проста, так что ее легко можно сконструировать самостоятельно.

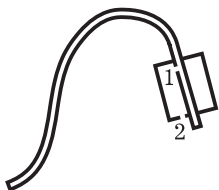


Рис. 4.9

В сифонной трубке (желательно, прозрачной) на некотором расстоянии от одного из ее концов необходимо проделать небольшое отверстие 1 (рис. 4.9). Площадь его должна быть не более $0,5\text{--}1\text{ мм}^2$. Затем надо взять закрытую пластмассовую емкость (подойдет пластиковая бутылочка подходящих

размеров; на рис. 4.9 для простоты емкость имеет цилиндрическую форму) и шилом проколоть в ней отверстия в диаметрально противоположных точках. Эти отверстия круглым надфилем необходимо расширять до тех пор, пока трубка не будет с трением входить в них. Трубку надо продеть в сделанные отверстия так, чтобы отверстие на самой трубке оказалось внутри емкости вблизи его поверхности. Соединение трубки с емкостью должно быть герметичным (вначале используйте пластилин). В емкости вблизи конца трубки необходимо проколоть еще одно отверстие 2; его первоначальный диаметр должен быть примерно 1 мм.

Теперь необходимо испытать сифон. Для этого свободный конец сифона опустите в пустую емкость, а другой конец сифона с емкостью — в находящееся на табуретке ведро с водой. Почти сразу же в этом колене сифона должен появиться поднимающийся вверх столб воды, разделенный пузырьками воздуха (это можно наблюдать, если у вас трубка прозрачная). Вода дойдет до места перегиба сифона и далее будет выливаться в пустую емкость. Через небольшой промежуток времени из отверстия сифона должна уже бить сплошная струя (без пузырьков воздуха). Если опыт не получается, нужно понемногу увеличивать диаметр отверстия в емкости у конца шланга. После отладки сифона емкость на трубке можно закрепить водоотталкивающим клеем.

Как работает этот автоматический сифон? Когда сифон опускают в ведро, вода поднимается по трубке и перекрывает отверстие 1 в ее стенке. Одновременно вода начинает заходить внутрь емкости через отверстие 2 и уменьшает объем

воздуха, при этом давление воздуха повышается. В какой-то момент в отверстие 1 трубки «продавливается» маленький воздушный пузырек, который отсекает небольшой столбик воды в трубке и поднимает его вверх. Поднимающаяся следом по трубке вода вновь перекрывает отверстие 1 в трубке, и снова сжатый воздух проталкивается в виде пузырька в это отверстие и отсекает новую порцию воды. Таким образом, в трубке образуется воздушно-водяной столб, средняя плотность которого меньше плотности воды. Под действием гидростатического давления этот столб поднимается до перегиба сифона, выливается через второй конец трубки и, когда емкость на первом конце полностью заполнится водой, «вытягивает» за собой сплошной поток воды — сифон начинает работать.

Этот вариант сифона выгодно отличается от первого тем, что не требует никаких подготовительных действий [88, 77, 95, 214].

4.20. СИФОН И УНИТАЗ

Знаете ли вы, что с сифонами мы сталкивается каждый день? Да, да, это обыкновенные унитазы в туалетах. Во всех современных унитазах между раковиной и канализационной трубой имеется сифон. В раковине постоянно остается чистая вода, образуя пробку, которая не позволяет запаху из канализации проникать в помещение. Когда в раковину унитаза наливается вода из бачка, ее уровень во входном колене сифона поднимается. Это приводит к тому, что вода начинает перетекать из входного колена сифона в выходное — сифон начинает действовать. Сильный поток в сифоне и общая турбулентность потока воды, вливающегося в раковину унитаза, удаляют все, что там находится.

Считается, что современный вариант смывного унитаза изобрел в 1861 г. английский сантехник **Томас Крэппер** (1836–1910), хотя известно, что различными вариациями устройств подобного рода человечество эпизодически пользовалось с давних времен. Сейчас нам трудно это оценить, однако изобретение унитаза было делом непростым, и Крэпперу с коллегами пришлось серьезно потрудиться. Испытания

«смывной способности» унитазов проводились с самыми разнообразными вещами. Чего там только не было! Изобретатели сочли, что достигли успеха, когда в 1884 г. «суперсмывка» унесла прочь 10 яблок со средним диаметром в 4,5 см; 1 плоскую мочалку диаметром 11 см; 3 воздушных шарика; замазку, размазанную по раковине, и 4 куска бумаги, плотно прилипшие в ней». Поистине чудо техники!

Кстати, унитазы в Англии до сих пор называются *кренперами*, хотя его официальное название на английском языке, соответствующее сути устройства, — *ватерклозет* (т.е. «водяная заглушка»). В русском же языке слово «унитаз» закрепилось из-за того, что первые поставки унитазов в Россию в начале XX в. производились испанской компанией «Unitas» (по-латыни — «единство»). Что ж, очень символичное название... [140, 148]

4.21. СОСУД ТАНТАЛА

Еще одно интересное применение сифона (см. предыдущие статьи) — так называемый «сосуд (чаша) Тантала». Этот автомат широко стал известен в конце XIX в., хотя его придумал древнегреческий механик **Герон Александрийский** еще 2000 лет тому назад. Свое название устройство получило по греческому мифу, согласно которому лидийский царь Тантал был осужден Зевсом на вечные муки: стоя в воде, Тантал не мог напиться, хотя вода и поднималась до рта, — стоило ему немного наклониться, как вода мгновенно исчезала.



Рис. 4.10

Для изготовления автомата понадобятся пластиковая бутылка, резиновая трубка (или, на худой конец, трубочка от кока-колы) и пластилин. Надо отрезать верхнюю часть бутылки, а в дне сделать небольшое отверстие. В отверстие необходимо плотно вставить резиновую трубку так, чтобы ее один конец свободно свисал из бутылки вниз, а другой конец надо свернуть петлей внутри бутылки так, чтобы выходное отверстие было у самого дна, но не упиралось в него (рис. 4.10).

Теперь поставьте бутылку под тонкую струю воды (например, из крана). Когда вода постепенно заполнит сосуд, заполнится и резиновая трубка до верхней петли в бутылке. А дальше вода через трубку начнет выливаться сама — у нас получился сифон. Вытекание прекратится, когда уровень воды в бутылке достигнет выходного отверстия трубки у дна. Сосуд наполняется вновь, и вновь в определенный момент вода начинает сливаться.

Ясно, что струйка воды из-под крана должна быть тоньше вытекающей через трубку струи. Тогда прибор через определенные промежутки времени будет наполняться, а затем опорожняться. Каждый раз будет вытекать определенная порция воды.

«Сосуд Тантала» фактически является реле времени. Например, бывает нужно, чтобы какой-то аппарат начал работать не сразу (как только в него поступил сигнал о включении), а спустя некоторое время, т.е. необходима выдержка во времени. Изменением величины петли резиновой трубки можно добиться, что вытекание воды будет происходить через точно заданное время. Такой автомат можно назвать **водяным реле**. Можно даже удвоить такие реле. В этом случае вода из первого сосуда будет переливаться в расположенный под ним второй сосуд, а второй сосуд начнет действовать тогда, когда первый сосуд полностью опорожнится (см. следующую статью).

Кстати, механизм, очень похожий на сосуд Тантала, используется в унитазах для быстрого опорожнения смывных бачков, а также для предотвращения их переполнения [8, 38, 131, 132, 150, 174].

4.22. «ПОЮЩАЯ ПТИЧКА» ГЕРОНА

Известна игрушка «Поющая птичка», создателем которой является древнегреческий механик **Герон Александрийский**. Работа автомата основана на применении сифона, вернее, его разновидности — водяного реле (см. предыдущую статью). Игрушку несложно изготовить самостоятельно из подручных средств.

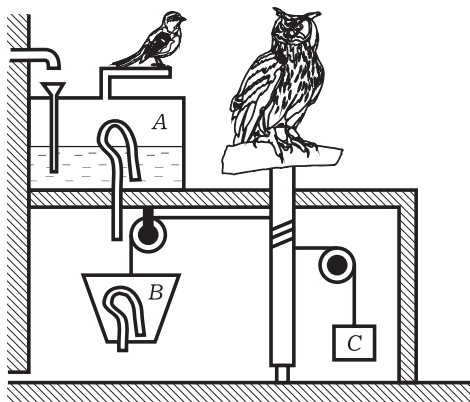


Рис. 4.11

Схематически устройство игрушки приведено на рис. 4.11. Вода, втекающая из крана в сосуд *A*, вытесняет из него воздух по трубке к макету птички. В птичку вмонтирован свисток, поэтому при прохождении через него вытесняемый воздух вызывает свист. Это будет продолжаться до тех пор, пока не сработает водяное реле сосуда *A*, после чего вода из него начинает переливаться в сосуд *B*. Так как при этом из сосуда *A* через водяное реле вытекает воды больше, чем втекает из крана, то объем воздуха в нем начинает увеличиваться, поэтому птичка перестает свистеть. Через некоторое время масса воды в сосуде *B* становится настолько большой, что перетягивает груз *C* и макет совы поворачивается к птичке. Еще через некоторое время срабатывает водяное реле в сосуде *B* и вода из него выливается. После этого груз *C* перетягивает сосуд *B*, сова отворачивается в первоначальное положение, а птичка начинает свистеть. Далее процесс повторяется.

Тонкая настройка игрушки по времени производится изменением величины петли трубок водяных реле [8].

4.23. «СТЕРЕГУЩАЯ ПТИЦА» ФИЛОНА

Предлагаем вам еще одну игрушку, периодическая работа которой основана на применении водяного реле (см. ст. 4.21).

Ее сконструировал великий древнегреческий инженер **Филон Византийский** (II в. до н. э.).

Устройство игрушки схематически приведено на рис. 4.12. Фигура птенца установлена на внешней трубке 6, закрепленной к крышке сосуда с отверстием. Птица-мать сидит в гнезде на внутренней трубке 7, проходящей сквозь внешнюю трубку 6 и закрепленной к плавающей платформе 3 из пробки. Через внутреннюю трубку 7, в свою очередь, проходит шток 4, один конец которого жестко скреплен с дном сосуда, а второй — к крыльям птицы. Модель змеи прикреплена к поплавку 5.

Если через отверстие 1 наливать воду, то через некоторое время поплавок 5 начнет подниматься вверх, а вместе с ним — и фигурка змеи, «угрожая» птенцу. Еще через некоторое время вода доходит до платформы 3, она тоже начинает подниматься, толкая птицу. Птица распускает крылья и принимает воинственную позу. В этот момент срабатывает водяное реле 2 и уровень воды начинает опускаться, соответственно опускаются змея и птица, которая, к тому же, складывает крылья. Через некоторое время процесс повторяется.

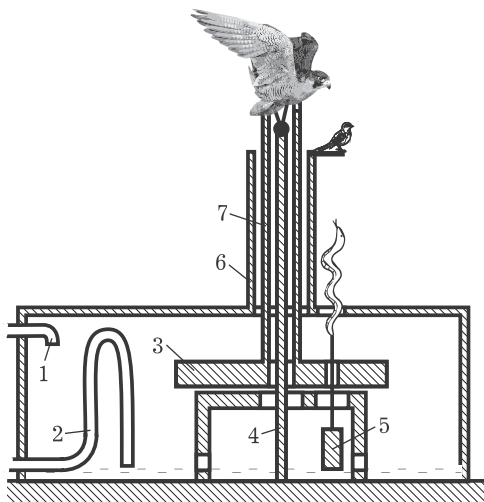


Рис. 4.12

Кроме таких игрушек для забавы, Филон создавал и практические автоматы. Например, это был сосуд со встроенным внутрь довольно загадочным механизмом, позволявшим гостям мыть руки. Над водопроводной трубой была вырезана рука, державшая шар из пемзы. Когда гость брал его, чтобы вымыть руки перед обедом, механическая рука исчезала внутри механизма и из трубы текла вода. Через какое-то время вода переставала течь и появлялась механическая рука с новым куском пемзы, приготовленным для гостя. К сожалению, Филон не оставил детального описания, как работало это исключительное механическое чудо, однако оно, по-видимому, было основано на тех же принципах, что и приведенный выше механизм игрушки [50].

4.24. ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЙ МЕХАНИЗМ

Устройство, перераспределяющее движение и энергию, в технике называется **механизмом** (от греч. *μηχανή* — машина). Обычно этим словом называют сочетание деталей, сделанных из твердого вещества (рычаги, шестерни и т.п.). Однако могут быть механизмы и из жидкостей и даже из газов. Примером механизма такого рода является вода в пробирке.

Необходимо налить воду в обыкновенную пробирку и, придерживая ее рукой, уронить ее с небольшой высоты на поверхность стола, сохраняя вертикальное положение (рис. 4.13, а). Поверхность стола должна быть достаточно твердой, чтобы дно пробирки произвело жесткий удар. В момент такого уда-

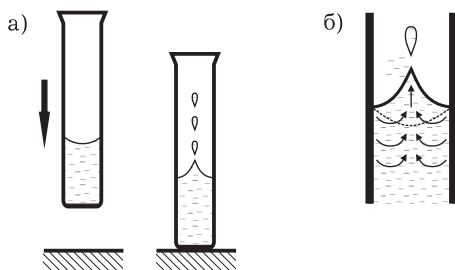


Рис. 4.13

ра находящаяся в пробирке вода резко тормозится — возникают очень большие ускорения, жидкость становится как бы очень тяжелой. Мениск воды в пробирке, имеющий вследствие действия капиллярных сил вогнутую форму, быстро выравнивается, и из его центральной части вверх по оси пробирки стремительно вырывается тонкая струя воды. Взлетающая вверх струя воды распадается на капли, причем первая из них взлетает на высоту, существенно превосходящую высоту падения пробирки. Это значит, что энергия воды в пробирке в момент удара перераспределяется таким образом, что небольшая часть воды вблизи центральной части мениска получает большую скорость и стремительно выбрасывается вверх (рис. 4.13, б).

Описанный гидродинамический механизм используется, например, в **кумулятивных снарядах**, в которых энергия при взрыве концентрируется вдоль его оси. Для этого во взрывча-



Рис. 4.14

том веществе делается выемка и в снаряд вкладывается металлическая вогнутая облицовка (рис. 4.14). Сила взрыва сжимает металл облицовки, облицовка разрушается и создается тонкая металлическая струя, по своим свойствам похожая на жидкость. Скорость этой струи может (при соответствующей форме облицовки) достигать до 90 км/с (более 320 000 км/ч). Ни одна броня не выдерживает таких снарядов (правда, только при перпендикулярном попадании снаряда на броню). Первые кумулятивные снаряды начала широко использовать фашистская Германия во время Второй мировой войны — это были противотанковые фауст-патроны [75, 88, 168].

4.25. ВОДЯНОЙ НАСОС ТАРАННОГО ТИПА

Жидкости, в отличие от газов, практически несжимаемы, почти как твердые тела (см. ст. 4.13 на с. 388). И это определяет их интересное поведение, если они оказываются в ловушке. Например, если трубку, в которой быстро течет вода, внезапно перекрыть, то энергия движущейся воды может

наделать бед. Так как жидкость сжимается с большим трудом, то скоростной напор воды развивает очень высокое давление, нередко рвущее трубы. Это явление называется **гидравлическим ударом**. Поэтому в квартирах и делают краны медленно закрывающимися, чтобы не возникали гидравлические удары.

Давление, развиваемое при гидравлическом ударе, прямо пропорционально длине трубы и времени, в течение которого происходит закрытие трубы: чем быстрее перекрывается вода, тем сильнее удар. Из опыта найдена следующая формула для вычисления давления при гидравлическом ударе воды:

$$p_{\text{уд}} = 0,015 \frac{vl}{\Delta t} \text{ (атм)},$$

где v — скорость течения воды в трубе (м/с); l — длина трубы (м); Δt — время, в течение которого запирается кран (с). Например, если труба, в которой вода течет со скоростью 1 м/с и длина которой 1 000 м, закрывается в течение 1 с, то давление в ней возрастает под действием гидравлического удара до $p_{\text{уд}} = 0,015 \cdot 1 \cdot 1\,000/1 = 15$ атм.

Но нет худа без добра — гидравлический удар можно заставить работать и на пользу. С его помощью можно подавать воду вверх, причем без насосов и затраты энергии. Устройство, позволяющее это делать, называется **гидравлическим тараном** (рис. 4.15).

В магистральную трубу 1 вставляется еще одна вертикальная труба 2, на днище которой имеется клапан 3. В конце трубы 1 помещен особый клапан 4, который в случае неподвижной воды или малой скорости ее течения находится в открытом состоянии благодаря пружине. Чем больше скорость

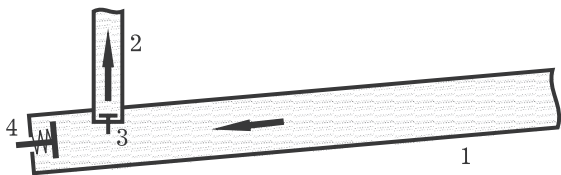


Рис. 4.15

воды при вытекании из трубы 1, тем меньше давление, поэтому клапан 4 автоматически срабатывает тогда, когда скорость истечения воды через него наибольшая, перекрывая поток воды и создавая гидравлический удар. При этом давление в трубе 1 моментально подскакивает и часть воды продавливается в трубу 2, преодолевая гидростатическое давление в ней. Как только давление в магистральной трубе 1 падает, клапан 4 за счет пружины открывается снова, вода начинает течь, и все повторяется. Клапан 3 не позволяет воде вытекать обратно из трубы 2.

С помощью гидравлического тарана можно поднимать воду на десятки метров. Он применяется там, где имеется запас воды, значительно превышающий потребное количество, и где есть возможность расположить саму установку ниже уровня источника воды. Получил распространение в сельском хозяйстве (главным образом в Средней Азии), а также для водоснабжения небольших строек и т. п.

А тараном устройство названо потому, что при его работе слышны методично чередующиеся удары, почти как в древности у таранов, которыми пробивали стены. Да вы, наверное, и сами слышали такие звуки в квартирах, когда при открытии водопроводного крана иногда (при определенных условиях) он начинает работать в режиме гидравлического тарана и весь дом аж дребезжит и сотрясается [20, 43, 75, 95, 149, 168].

4.26. ДОМАШНИЙ ФОНТАН

Исторически впервые устройство фонтана было описано две тысячи лет назад древним механиком **Героном Александрийским** (см. также о Героне ст.ст. 2.36, 4.14, 4.17). Фонтан Герона состоит из трех сосудов (рис. 4.16, а): верхнего открытого 1 и двух герметически замкнутых шарообразных 2 и 3, которые соединены тремя трубками. В исходном состоянии шар 2 наполнен водой, а шар 3 — пустой. Когда в сосуд 1 наливается немного воды, фонтан начинает действовать: вода переливается по трубке из сосуда 1 в сосуд 3, вытесняя оттуда воздух в шар 2; под давлением поступающего воздуха вода из 2 устремляется по трубке вверх и бьет фонтаном над

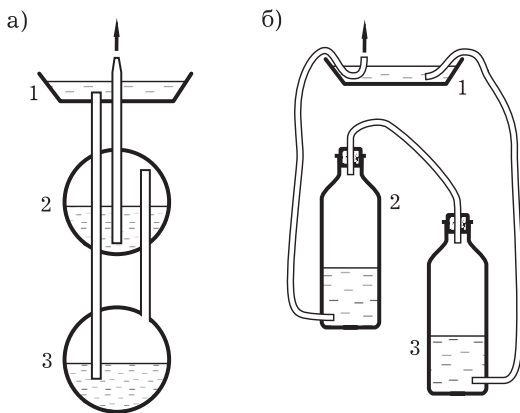


Рис. 4.16

сосудом 1. Когда же шар 2 опорожнится, фонтан перестает работать.

Фонтан такого же устройства можно соорудить и дома (рис. 4.16, б). Для этого нам понадобятся две пластиковые бутылки из-под лимонада в качестве шаров, пластиковая одноразовая тарелка (можно взять обычную) в качестве верхнего сосуда и пластиковые трубки от одноразового медицинского набора для капельниц (сгодятся и резиновые трубки). Места соединения трубок с бутылками нужно загерметизировать с помощью пластилина (или с помощью водостойкого клея). Загнутые концы трубок надо закрепить на тарелке (верхнем сосуде) так, как показано на рис. 4.16, б (также с помощью пластилина).

В таком виде прибор гораздо удобнее для употребления: когда вся вода из бутылки 2 перельется через сосуд 1 в бутылку 3, можно просто переставить бутылки 2 и 3, изменить форму концов трубок в верхнем сосуде 1, и фонтан вновь начнет действовать.

Такой самодельный фонтан в отличие от фонтана Герона дает возможность произвольно изменять расположение сосудов и изучать, как влияет расстояние между сосудами на высоту струи [51, 92].

4.27. О ПОВЕРХНОСТНОМ НАТЯЖЕНИИ

Жидкости состоят из весьма подвижных молекул, пере-скакивающих из одного положения равновесия в другое и некоторое (очень короткое) время совершающих колебатель-ные движения в этих положениях равновесия. Расположены молекулы очень близко друг к другу, поэтому жидкости труд-но сжимать. Также понятно, почему жидкости легко меняют форму — раз молекулы постоянно «скачут», то их поведение похоже на поведение молекул в газах.

Хотя молекулы в целом электрически нейтральны, на очень малых расстояниях (порядка нескольких единиц собственных размеров) отрицательные электроны одних молекул могут вза-имодействовать с положительными ядрами других молекул. Причем в зависимости от расстояния между молекулами си-лы взаимодействия могут быть силами как притяжения, так и отталкивания (рис. 4.17). На очень малых расстояниях, когда молекулы почти вплотную подходят друг к другу, они очень сильно отталкиваются. Не будь этого отталкивания, молекулы тотчас проникли бы друг в друга (места для этого достаточ-но!) и весь кусок вещества стянулся бы практически до одной молекулы. А при расстояниях, в несколько раз превышающих диаметр молекулы, между ними действуют уже силы притяже-ния, причем эти силы по мере сближения молекул до опреде-ленного расстояния увеличиваются. В твердых телах благода-ря такому характеру взаимодействия молекул обеспечивается прочность и упругость твердых материалов, а в жидкостях — **поверхностное натяжение**.

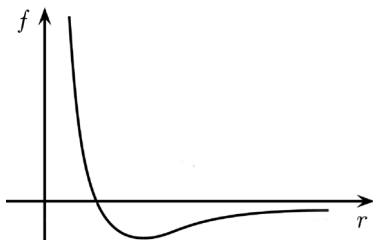


Рис. 4.17

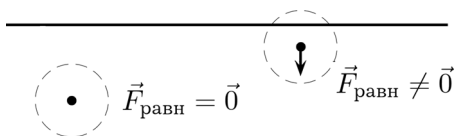


Рис. 4.18

Молекулы у поверхности жидкости находятся в иных условиях, чем молекулы в глубине (рис. 4.18). Молекулу в глубине жидкости окружает со всех сторон одинаковое количество молекул, так что равнодействующая сила взаимодействия с другими молекулами в среднем равна нулю: $\vec{F}_{\text{равн}} = \vec{0}$. Молекула же у поверхности жидкости подвергается воздействию других молекул в основном только со стороны жидкости. Плотность газа и пара над поверхностью жидкости намного меньше плотности самой жидкости и, следовательно, силами взаимодействия молекулы жидкости в поверхностном слое с молекулами газа и пара можно пренебречь. Силы притяжения, действующие на молекулу поверхностного слоя со стороны всех остальных молекул в глубине жидкости, дают равнодействующую силу $\vec{F}_{\text{равн}}$, направленную вниз. Таким образом, поверхностные молекулы все время находятся под действием сил, поэтому они обладают дополнительной потенциальной энергией, которую называют **поверхностной**. Здесь уместна аналогия с телом, поднятым от поверхности Земли на некоторую высоту h — на него тоже все время действует сила тяжести mg и поэтому оно обладает потенциальной энергией mgh .

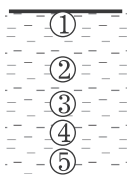


Рис. 4.19

В результате действия сил притяжения и отталкивания плотность жидкости в поверхностном слое меньше, чем внутри. В самом деле, на молекулу 1 (рис. 4.19) действует сила отталкивания со стороны молекулы 2 и силы притяжения всех остальных молекул (3, 4, 5 и т. д.). На молекулу 2 действуют такие же силы притяжения со стороны лежащих в глубине молекул и сила отталкивания со стороны молекулы 3. Но, кроме того, действует еще сила отталкивания со стороны молекулы 1,

которая сближает молекулы 2 и 3. В результате расстояние между молекулами 1 и 2 в среднем больше расстояния между молекулами 2 и 3 и т. д. Это продолжается до тех пор, пока не перестанет сказываться близость молекул к поверхности. Таким образом, молекулы поверхностного слоя находятся в среднем на больших расстояниях друг от друга, чем молекулы внутри жидкости.

Увеличение поверхности жидкости должно сопровождаться возникновением новых участков разреженного поверхностного слоя. А это требует совершения работы против сил притяжения между молекулами (чтобы раздвинуть их в поверхностном слое). Вот этим-то и объясняется появление **сил поверхностного натяжения** — жидкость стремится сократить свою поверхность, чтобы не совершать лишнюю работу по раздвиганию молекул (это так называемый **принцип минимума потенциальной энергии**). Ясно, что стремление жидкости к сокращению поверхности обуславливает тот факт, что силы поверхностного натяжения $F_{\text{пов}}$ направлены **по касательной** к поверхности жидкости, хотя на микроуровне на молекулы в поверхностном слое действуют равнодействующие силы $F_{\text{равн}}$, направленные **перпендикулярно** к поверхности, т. е. $\vec{F}_{\text{пов}} \perp \vec{F}_{\text{равн}}$.

Наличие сил поверхностного натяжения можно эффективно продемонстрировать с помощью П-образного каркаса с подвижной нижней перемычкой (рис. 4.20). Такую систему можно легко сконструировать из медной проволоки от сгоревшего трансформатора. Если получающийся замкнутый контур заполнить жидкостью (лучше всего мыльным раствором), то она сразу же, стремясь уменьшить свою поверхность (вернее, две поверхности), начнет перемещать подвижную нижнюю перемычку против силы тяжести.

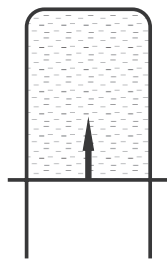


Рис. 4.20

Величина силы поверхностного натяжения различна для разных жидкостей. Индивидуальной характеристикой жидкости в этом смысле является **коэффициент поверхностного**

натяжения (или просто **поверхностное натяжение**) — величина силы поверхностного натяжения, приходящаяся на единицу длины контура, на который действует эта сила:

$$\sigma = \frac{F_{\text{пов.}}}{\Delta l}.$$

Можно показать, что численно σ равен величине поверхностной энергии единицы поверхности жидкости:

$$\sigma = \frac{\Delta E_{\text{пов.}}}{\Delta S}.$$

Поверхностное натяжение как бы «обнимает» жидкость, и поэтому в свободном состоянии она принимает форму, при которой для данного объема площадь поверхности минимальна. А такой формой является сфера (шар). Однако на поверхности Земли жидкости не являются свободными, так как подвержены притяжению Земли и, возможно, других сил. Поэтому мы в повседневной жизни капли жидкостей наблюдаем в деформированном виде.

Несмотря на необычайную тонкость поверхностного слоя (около $5 \cdot 10^{-10}$ м — практически можно считать этот слой мономолекулярным), он оказывает на охватываемую им массу жидкости огромное давление — для некоторых жидкостей оно достигает десятков тысяч атмосфер. И, кстати, существование таких давлений объясняет слабую сжимаемость жидкостей: жидкости всегда сильнеешим образом сдавлены, и прибавка к десяткам тысяч атмосфер еще даже целой сотни атмосфер мало меняет дело.

На границе с воздухом больше всего величина поверхностного натяжения у металлов. Например, у расплавленного золота она равна 1,1 Н/м; у других металлов поменьше: у свинца — 0,45 Н/м, у ртути — 0,47 Н/м, у алюминия — 0,52 Н/м. Для обычных жидкостей (кроме ртути) рекордсменом является вода — 0,073 Н/м, еще меньше у керосина — 0,029 Н/м, у спирта — 0,023 Н/м и меньше всего у эфира — 0,017 Н/м [23, 43, 47, 125, 126].

4.28. СМАЧИВАНИЕ ЖИДКОСТИ

Вообще говоря, все вышесказанное в предыдущей статье об особых условиях, в которых находятся молекулы на границе жидкости, можно распространить и на газы, и на твердые тела — они тоже обладают поверхностной энергией. Однако в большинстве случаев силами поверхностного натяжения газов можно пренебречь в силу их малой плотности по сравнению с плотностями жидкостей и твердых тел. Поверхностная энергия твердых тел очень существенна, но ее влияние на макроуровне для нас визуально никак не обнаруживается, так как молекулы твердых тел зафиксированы в узлах кристаллической решетки и не могут перемещаться (но, тем не менее, влияние их поверхностной энергии очень существенно на микроуровне; см., например, ст. 5.6 на с. 473 и ст. 5.23 на с. 500). И только в жидкостях существенность поверхностных сил приводит к наблюдаемым нами искривлениям формы жидкости за счет возможности молекул к перемещениям.

Из вышесказанного следует, что если речь идет о границе контакта нескольких тел, то необходимо рассматривать в первую очередь взаимодействия твердых тел и жидкостей. На линии контакта твердого тела и жидкости возможны два случая:

- 1) молекулы жидкости сильнее взаимодействуют с молекулами твердого тела, чем «со своими»;
- 2) молекулы жидкости сильнее взаимодействуют «со своими» молекулами, чем с молекулами твердого тела.

В первом случае говорят о **смачивании** жидкостью твердого тела. В такой ситуации жидкость стремится растечься по поверхности твердого тела, так как молекулы жидкости «растаскиваются» молекулами твердого тела по своей поверхности за счет более сильного притяжения. На молекулу жидкости на линии контакта твердого тела и жидкости действуют две силы: сила $F_{\text{ж}}$ со стороны «своих» молекул и сила $F_{\text{ТВ.Т}}$ со стороны молекул твердого тела (рис. 4.21, а). Так как $F_{\text{ТВ.Т}} > F_{\text{ж}}$, то их равнодействующая $F_{\text{равн}}$ направлена вглубь твердого тела. В предыдущей статье было показано, что равнодействующая $F_{\text{равн}}$ молекулярных сил перпендикулярна силе

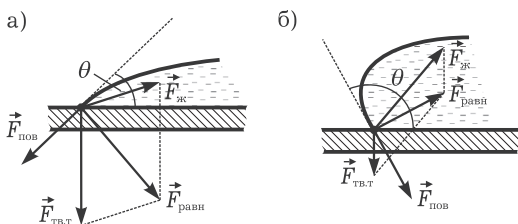


Рис. 4.21

поверхностного натяжения $F_{\text{пов}}$ и, соответственно, самой поверхности жидкости. Значит, угол θ , образуемый между касательными к поверхностям жидкости и твердого тела, может служить количественной мерой смачивания жидкостью данного твердого тела. Этот угол называется **краевым**. При смачивании краевой угол лежит в промежутке $0 \leq \theta < 90^\circ$.

Во втором случае говорят о **несмачивании** жидкостью твердого тела. В этой ситуации молекулы жидкости сильнее притягиваются друг к другу и совсем мало «обращают внимание» на молекулы твердого тела: $F_{\text{ж}} > F_{\text{тв.т}}$ (рис. 4.21, б). Это ведет к тому, что при несмачивании равнодействующая $F_{\text{равн}}$ молекулярных сил направлена вглубь жидкости и краевой угол $90^\circ \leq \theta < 180^\circ$.

Равенства $\theta = 0^\circ$ и $\theta = 180^\circ$ соответствуют предельным случаям, называемым **полным смачиванием** и **полным несмачиванием** соответственно. Почти полное смачивание, например, обнаруживается, если капнуть воду на поверхность чистого стекла; вода в этом случае растекается почти до мономолекулярного слоя. Полное несмачивание наблюдается, если на то же стекло попадет маленькая капелька ртути; она будет иметь форму шарика с очень маленькой точкой контакта со стеклом.

Несмачивание может приводить к интересным явлениям. Например, иголка, смазанная жиром, может держаться на поверхности воды. Или, если решето смазать жиром, то достаточно тонкий слой воды не будет протекать через него (см. ст. 4.46 на с. 443). Некоторые насекомые, например, водомерки, используют явление несмачивания для передвижения по поверхности воды.

Смачивание (или несмачивание) приводит к тому, что поверхности жидкостей на границе контакта с твердыми телами всегда искривлены. Такие искривленные поверхности жидкостей называются **менисками** (от греч. *менискос* — лунный серп). Если размеры мениска сравнимы с характерным размером сосуда, в котором находится жидкость, то такой сосуд для данной жидкости образует **капилляр** (от лат. *капиллус* — волос). Все физические явления, связанные с искривлениями поверхностей жидкостей, называются **капиллярными**.

Наиболее известным капиллярным явлением является поднятие (при смачивании) или опускание (при несмачивании) жидкости в капилляре. При смачивании молекулы твердого тела тянут молекулы жидкости вверх до тех пор, пока сила тяжести поднятой жидкости не уравнивает силу поверхностного натяжения (рис. 4.22, а). Это равносильно тому, что давление жидкости под вогнутым мениском меньше, чем под плоской поверхностью. Дополнительное давление жидкости под мениском называется **добавочным лапласовым давлением** (или **капиллярным давлением**) в честь французского ученого **П. Лапласа** (1749–1827), получившего в 1806 г. для него математическое выражение. Для круглого капилляра радиуса R это выражение имеет вид

$$p_{\text{доб}} = \frac{2\sigma \cos \theta}{R}. \quad (4.7)$$

Так как добавочное давление компенсируется гидростатическим давлением ρgh столба поднятой жидкости, то можно

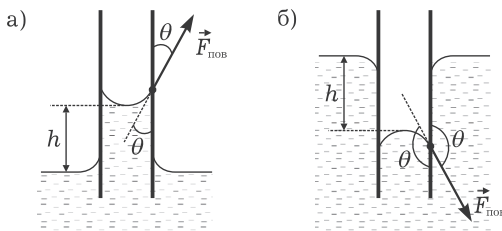


Рис. 4.22

легко получить высоту подъема жидкости в капилляре:

$$\frac{2\sigma \cos \theta}{R} = \rho g h \quad \text{или} \quad h = \frac{2\sigma \cos \theta}{\rho g R}. \quad (4.8)$$

В случае несмачивания (рис. 4.22, б) жидкость в капилляре опускается, что равносильно тому, что под выпуклым мениском давление жидкости больше, чем под плоской поверхностью. Формулы (4.7) и (4.8) остаются в силе и в этом случае [11, 23, 47, 98, 107, 125, 126].

4.29. ШАРООБРАЗНАЯ ФОРМА ЖИДКОСТИ

Из статьи 4.27. видно, что если бы жидкость находилась в состоянии невесомости (т. е. в свободном состоянии), то она приняла бы форму идеального шара вследствие стремления ее минимизировать свою поверхность. К сожалению, создать такое состояние в земных условиях затруднительно. В принципе состояние невесомости можно смоделировать, если тела будут свободно падать на поверхность Земли под действием его притяжения (именно в таком состоянии находятся космические корабли, обращающиеся по геоцентрической орбите вокруг Земли). Этим свойством издавна пользовались оружейники для отливки круглых пуль (дробь), разбрызгивая расплавленный свинец с большой высоты. Однако опыты подобного типа кратковременны, что затрудняет проведение наблюдений. Сейчас, конечно, на помощь может прийти современная цифровая видеотехника, которая позволяет осуществлять съемки с очень большой скоростью (режим скоростной съемки). Тем не менее, как вы думаете, какие еще явления или опыты являются лучшим доказательством того, что жидкости в невесомом состоянии принимают строго шарообразную форму?

Такой опыт, подтверждающий шарообразность невесомой жидкости, проводил в свое время бельгийский физик **Ж. А. Ф. Плато** (1801–1883). Для этого он пускал оливковое масло в смесь спирта и воды, при этом плотность смеси подбиралась равной плотности оливкового масла. Так как масло не растворялось в смеси и сила тяжести компенсировалась архи-

медовой силой, то оливковое масло оказывалось в состоянии невесомости и оно собиралось в капли в форме шара. При проведении домашних опытов проще поступить с точностью до наоборот: взять баночку с растительным (например, подсолнечным) маслом и капать туда смесь воды и спирта. В этом случае легче подобрать плотность спиртовой смеси, просто потихонечку добавляя в воду спирт и капая смесь в масло.

Еще более строгое доказательство шарообразности невесомой жидкости возможно из совершенно неожиданной научной области, а именно — из оптики. Объектом, служащим лучшим доказательством, является **радуга**. Теория радуги утверждает, что малейшее отклонение формы капель воды от геометрически правильного шара должно заметно сказаться на виде радуги, а при более значительных отклонениях радуга вовсе не может образоваться. Имеются в виду очень маленькие капельки воды размерами менее 2 мм, для которых сила поверхностного натяжения преобладает над силой тяжести. Именно из таких капелек состоят туманы (см. ст. 3.9 на с. 289) и дождевые облака (см. ст. 3.11 на с. 294). Те же капли, которые падают во время дождя на землю, по размерам намного больше и не имеют форму сферы (см. следующую статью).

Теория радуги позволяет приближенно оценивать диаметр капель дождя по виду радуги. При диаметре капель 1–2 мм наблюдаются очень яркий фиолетовый и почти столь же яркий зеленый цвета; хорошо видна красная дуга радуги и едва заметна голубая. При уменьшении диаметра капель до 0,5 мм наблюдается заметное ослабление красного цвета, который практически полностью исчезает при диаметре 0,2 мм. При диаметре 0,08–0,1 мм в радуге сохраняется ярким лишь фиолетовый цвет; в целом же радуга уширяется и бледнеет. Когда же диаметр капель становится меньше 0,05 мм, то наблюдается белая радуга [2, 11, 23, 51, 84, 95, 98, 130, 138, 171].

4.30. ФОРМА ДОЖДЕВОЙ КАПЛИ

Какую форму имеет дождевая капля? Если вы думаете, что форму сферы, то ошибаетесь. Как уже было сказано в предыдущей статье, в земных условиях шарообразность капе-

лек жидкости сохраняется, покуда сила поверхностного натяжения превосходит другие действующие на каплю силы. Одной из таких сил, от которой нам на Земле некуда спрятаться, является сила тяжести (сила гравитационного притяжения Земли). Пусть диаметр капли равен d . Так как поверхностная энергия пропорциональна площади капли $S \sim d^2$, а потенциальная энергия в поле тяжести Земли пропорциональна массе $m = \rho V \sim d^3$, то их отношение $E_{\text{грав}}/E_{\text{пов}}$ пропорционально диаметру капли.

Значит, при достаточно малых диаметрах существенна сила поверхностного натяжения, а при достаточно больших — сила тяжести. Из-за этого в форме шара мы наблюдаем только маленькие капельки воды, и это при условии, что капелька лежит на несмачиваемой поверхности.

Вы можете возразить, что при свободном падении дождевой капли независимо от ее диаметра должно наступить состояние невесомости, поэтому капля обязательно примет шарообразную форму. Однако в том-то и дело, что падение капли не является свободным — на нее действует сила аэродинамического сопротивления. Это сопротивление и сопровождающие его эффекты приводят к тому, что капля принимает почти плоскую форму.

Действительно, с одной стороны, поверхностное натяжение стремится стянуть каплю в шарик. С другой стороны, на каплю действуют сила тяжести, под действием которой капля ускоряется. Но как только возрастает скорость, сразу же становится существенной сила сопротивления среды. Поток набегающего воздуха, направленный в середину капли, давит на каплю «в лоб», а слои воздуха, обтекающие каплю с боков, сужаются и, согласно закону Бернулли, в них понижается давление (см. ст. 4.4 на с. 376). В результате капля принимает форму «блинчика», увеличивая свою «парусность». (Позади капли также образуются вихри и, соответственно, разрежение, но гораздо более слабое, чем по бокам.) Этот «блинчик» при падении может хаотически переворачиваться, деформироваться, разделяться на несколько капель, сливаться с другими каплями и т. д.

Если вы являетесь обладателем хорошей видеокамеры, то можете попытаться заснять падение капель воды в скоростном режиме — уверяем вас, это зрелище стоит того. Если же у вас нет такой техники, то вышесказанное можно проверить в домашних условиях при чаепитии с вареньем. Капните в стакан с чаем варенье (падающая в чае капля варенья будет моделью водяной капли, падающей в воздухе). Вопреки всем ожиданиям капля варенья будет скорее похожа на опускающуюся плашмя лепешку, чем на шар [77].

4.31. КАПИЛЛЯРНЫЕ ВОЛНЫ

Откройте на кухне водопроводный кран так, чтобы из него вытекала слабая спокойная (ламинарная) струя воды. Вы обнаружите, что чем дальше расстояние от крана, тем тоньше струя. Это и понятно: в поле тяжести Земли вода ускоряется и чем дальше от крана, тем скорость струи больше. Если взять два сечения струи (рис. 4.23), то за одно и то же время через них должны проходить одни и те же объемы воды: $V_1 = V_2$. Значит,

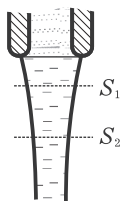


Рис. 4.23

$$S_1 v_1 \Delta t = S_2 v_2 \Delta t \quad \text{или} \quad S_1 v_1 = S_2 v_2.$$

Так как $v_2 > v_1$, то $S_2 < S_1$.

По идее, струя должна утончаться бесконечно, а ее скорость должна все увеличиваться, пока не встретит на своем пути преграду. Но тут в дело вступают другие факторы: вода растягивается, что ведет к уменьшению давления внутри нее, а это приводит к появлению пузырьков газа и пара (см. по этому поводу ст. 4.17 на с. 397); вязкое трение внутри струи и на границе с воздухом приводит к турбулентности; окружающий воздух никогда не спокоен, поэтому может возмущать тонкую струю и т. д. Все эти факторы должны были бы нарушить «красивое» течение

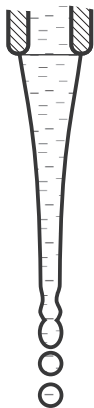


Рис. 4.24

жидкости, но до их проявления дело даже не доходит: вы видите, что уже на достаточно коротком расстоянии от крана струя распадается на отдельные капли, причем практически одинакового размера (т. е. на турбулентность это не похоже) (рис. 4.24). Различить отдельные капли невооруженным глазом, конечно, трудновато, но если у вас есть хорошая видео- или фотокамера, сделайте снимок струи в режиме скоростной съемки.

Другая возможность проверки: подставьте под струю пустую пластиковую полуторалитровую бутылку из-под минералки и начинайте отдалять ее от крана. На некотором расстоянии вода начнет барабанить по бутылке — струя распалась на капельки. И третья возможность увидеть капельки — воспользоваться стробоскопом (практически все современные смартфоны имеют видеокамеры со вспышкой, и с помощью специальных программ лампу фотовспышки можно заставить работать как стробоскоп).

Кто внимательно читал предыдущие статьи, наверное, уже начал догадываться, что в образовании капелек должны быть «виноваты» силы поверхностного натяжения. Это действительно так, и в этом можно легко убедиться. Нанесите на указательный палец капельку слюны. Сведите большой и указательный пальцы вместе так, чтобы капля соприкоснулась с обоими пальцами и затем разведите их на расстояние 10–15 мм друг от друга: между пальцами получится тонкий цилиндр из слюны. Наблюдая за ним, вы заметите, что через несколько секунд после образования цилиндр распадается на отдельные капли, висящие на «тоненькой ниточке» и находящиеся почти на одинаковых расстояниях друг от друга. (Видимо, в человеческой слюне, как и в жидкости, из которой паук сплетает свою паутину, имеются компоненты, быстро загустевающие на воздухе и образующие ту «тоненькую нить», на которой располагаются капли.)

Аналогичное явление вы сможете наблюдать, если опустите волос (или тонкий медный провод) в нитролак: вынув его, вы обнаружите обволакивающую волос пленку лака, которая спустя определенное время распадается на капли точно так же, как слюна.

Все эти опыты и наблюдения показывают, что достаточно длинный жидкий цилиндр неустойчив и может распасться на капли. Жидкая струя из крана — это тоже длинный жидкий цилиндр, только наблюдаемый из системы отсчета, в которой он движется. Следовательно, причина распада на капли струи и жидкого цилиндра одина. Что же это за причина?

Это — **капиллярные волны**. Их достаточно легко наблюдать: возьмите в руку иглу и аккуратно поднесите к струе в том месте, где она еще не распалась на капли. Как только вы прикоснетесь к ее поверхности, сразу обнаружите, что она деформировалась: снизу и сверху от точки возмущения на гладкой поверхности струи появляются характерные «морщинки». Это и есть капиллярные волны. Замечательное свойство капиллярных волн на струе заключается в том, что движутся они навстречу течению воды со скоростью, равной скорости течения воды в струе. Поэтому относительно самой струи или водопроводного крана капиллярные волны неподвижны. Во всех иных отношениях они совершенно схожи с теми бегущими волнами, которые вы можете получить, прикоснувшись пальцем к поверхности налитой в блюдце воды.

Причина появления капиллярных волн следующая. Как уже говорилось в предыдущих статьях, жидкость принимает такую форму, чтобы ее поверхностная энергия с учетом других сил (в частности, силы тяжести) была минимальна (принцип минимума потенциальной энергии; см. ст. 4.27 на с. 413). Деформируя поверхность жидкости в некоторой точке, вы увеличиваете ее поверхностную энергию. Это приводит к тому, что поверхность жидкости начинает принимать другую форму с минимальной энергией, во время которого частички жидкости приобретают определенную скорость и по инерции «перемахивают» через состояние равновесия — возникают колебания поверхности (аналогично колебаниям груза на пружине). От этих колебаний в окружающие точки распространяется бегущая волна — это и есть капиллярная волна.

Возмущающим фактором может быть что угодно: колебания крана, изменение скорости течения жидкости, воздействия звука, неровности отверстия крана, мельчайшие пузырьки газа или пара в жидкости, перепады температуры,

изменения химического состава жидкости и т. д. и т. п. — просто невозможно перечислить все то, что может явиться причиной возникновения капиллярных волн. Таких волн в данный момент времени на поверхности жидкости может быть очень много, но не все они приводят к распаду струи-цилиндра — большинство, как и полагается, затухают, переводя свою энергию в тепло (такое наблюдается, если вы бросите камушек в спокойную гладь воды). У тех же волн, которые «повинны» в распаде струи на капли, должно быть все наоборот: амплитуда их колебаний с течением времени должна возрасти, чтобы в конце концов во впадинах между горбами волны струя «перерезалась» на отдельные капли. Как известно, основной характеристикой волны (кроме амплитуды) является ее длина λ — расстояние между двумя последовательными горбами волны. Значит, из всего множества образующихся капиллярных волн усиливаться будут только те, чьи длины волн λ подчиняются определенному условию. Условия эти грубо можно оценить следующим образом.

Ясно, что суммарная поверхностная энергия образовавшихся капель после распада струи должна быть меньше поверхностной энергии струи-цилиндра до распада: $\sum E_k < E_{\text{ц}}$ (иначе струе энергетически невыгодно распадаться). Так как поверхностная энергия пропорциональна площади поверхности жидкости (коэффициентом этой пропорциональности является поверхностное натяжение σ ; см. ст. 4.27 на с. 413), то

$$\sum S_k < S_{\text{ц}}. \quad (4.9)$$

Пусть длина невозмущенного жидкого цилиндра составляет l , а ее радиус $r_{\text{ц}}$. Тогда его боковая поверхность равна

$$S = 2\pi r_{\text{ц}} l. \quad (4.10)$$

Если цилиндр распадается на N одинаковых капелек радиуса r_k , то объем одной капельки равен

$$V_k = \frac{4}{3}\pi r_k^3 = \frac{V_{\text{ц}}}{N} = \frac{\pi r_{\text{ц}}^2 l}{N},$$

откуда ее радиус

$$r_k = \left(\frac{3 r_{\text{ц}}^2 l}{4 N} \right)^{1/3}.$$

Тогда суммарная площадь поверхности капелек равна

$$\sum S_k = N \cdot 4\pi r_k^2 = N \cdot 4\pi \left(\frac{3 r_{\text{ц}}^2 l}{4 N} \right)^{2/3}. \quad (4.11)$$

Подставляя (4.10) и (4.11) в (4.9), получим

$$2N \left(\frac{3 r_{\text{ц}}^2 l}{4 N} \right)^{2/3} < r_{\text{ц}} l.$$

Далее учтем следующее: если цилиндр распадается на N капелек, то в его длине должно уместиться столько же длин λ капиллярной волны, вызвавшей этот распад: $l = \lambda N$. Подставляя это значение в предыдущее неравенство, получим

$$2 \left(\frac{3}{4} r_{\text{ц}}^2 \lambda \right)^{2/3} < r_{\text{ц}} \lambda \quad \text{или} \quad \lambda > 4,5 r_{\text{ц}}. \quad (4.12)$$

Таким образом, если на жидком цилиндре появятся капиллярные волны с длиной волны, в 4,5 раза превышающей радиус цилиндра, то распад жидкого цилиндра на капли вследствие этих деформаций энергетически выгоден. Другими словами, если длина цилиндра в 4,5 раза больше его радиуса, то при наличии возмущений жидкий цилиндр распадется на отдельные капли.

Чтобы проверить полученный результат, сделайте еще один опыт. Откройте водопроводный кран и затем постепенно прикрывайте его так, чтобы получилась струя воды, сплошной участок которой имеет длину 5–8 см. Введите в этот участок вблизи места распада струи выпуклой поверхностью вверх чистую чайную ложку (ложка будет играть роль возмущающего фактора). На струе вы увидите капиллярные волны подобные тем, которые вы уже наблюдали раньше с помощью иголки. Теперь постепенно начинайте поднимать ложку. Вы обнаружите, что длина капиллярных волн растет и, как только она

достигает определенной величины, струя внезапно распадается на капли. Попробуйте приблизительно определить длину капиллярной волны и радиус струи, и сопоставить их с условием распада (4.12).

В заключение заметим, что более точное соотношение распада струи, следующее из теории, имеет вид $\lambda > 2\pi r_{\text{ц}}$. Эта задача была решена еще в конце XIX в. английский физиком лордом Рэлеем (Дж. В. Стреттом) (1842–1919) [29, 76, 125].

4.32. НЕОЖИДАННОЕ ПРИМЕНЕНИЕ ПОВЕРХНОСТНОГО НАТЯЖЕНИЯ

В романе французского писателя Ж. Верна «Пятнадцатилетний капитан» описывается следующий сюжет.

«... Молодой капитан не колебался ни одной минуты. Он круто повернул штурвал и направил корабль в узкий извилистый проход. В этом месте море бушевало особенно яростно. Волны стали заливать палубу.

Матросы стояли на носу возле бочек с жиром, ожидая приказа капитана.

— Лей ворвань*! — крикнул Дик. — Живей!

Под слоем жира, который потоками лился на волны, море успокоилось, словно по волшебству, с тем чтобы через минуту забушевать с удвоенной яростью. Но этой минуты затишья было достаточно, чтобы «Пилигрим» проскочил за линию рифов...»

Как вы думаете, какое физическое явление помогло героям романа проскочить опасный участок?

Здесь помощь оказало явление поверхностного натяжения. У жира поверхностное натяжение меньше, чем у воды, поэтому на контур масляного пятна со стороны остальной поверхности воды будет действовать сила поверхностного натяжения, направленная наружу от масляного пятна. Этой силы вполне достаточно, что на короткое время погасить волны в области разлитого жира [98, 138].

*Ворвань — китовый жир.

4.33. МАССА КАПЛИ ВОДЫ

Как известно, с увеличением температуры увеличивается интенсивность хаотического движения молекул, что обуславливает уменьшение интенсивности межмолекулярного взаимодействия. Это, в свою очередь, ведет к снижению поверхностного натяжения жидкостей, обращаясь в нуль при критической температуре. При критической температуре исчезает разница между жидкостью и паром, жидкость утрачивает способность собираться в капли и превращается в пар при любом давлении.

Экспериментально замечено, что **поверхностное натяжение уменьшается прямо пропорционально росту температуры**. Например, поверхностное натяжение обычной воды уменьшается на 0,23% на каждый градус повышения температуры. На основе этого факта можно прийти к интересному выводу, если задаться следующим вопросом: в каком случае из водопроводного крана падают более тяжелые капли — когда вода горячая или когда она холодная?

Вес отрывающейся капли зависит от величины поверхностного натяжения жидкости — капля отрывается тогда, когда ее вес достаточен для разрыва поверхностной пленки на шейке образующейся капли (рис. 4.25). Если радиус шейки сужения равен r , а коэффициент поверхностного натяжения σ , то отрыв капли произойдет в тот момент, когда $2\pi r\sigma = mg$, откуда масса капли $m = 2\pi r\sigma/g$. Пренебрегая несущественным изменением плотности воды при изменении температуры (около 0,02% на каждый градус изменения температуры, см. табл. 3.7 на с. 343), делаем вывод, что чем ниже температура, тем тяжелее капли.

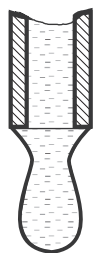


Рис. 4.25

Прикинем, как велика разница между массами холодной и горячей капель. Пусть температура горячей воды для простоты равна 100°C , а температура холодной 20°C (комнатная температура). При температуре 100°C поверхностное натяжение воды ослабевает на 23% по сравнению с величиной его при 0°C , а при 20°C — на 4,6% меньше, чем при 0°C .

Значит, относительная разница в массе капель составит

$$\frac{m_{\text{хол}} - m_{\text{гор}}}{m_{\text{гор}}} = \frac{\sigma_{\text{хол}} - \sigma_{\text{гор}}}{\sigma_{\text{гор}}} = \frac{95,4 - 77}{77} = 0,24.$$

Разница в 24% — это весьма заметная величина, которую легко можно измерить на практике.

Зависимость поверхностного натяжения от температуры также означает, что жидкость при низких температурах по капиллярной трубке поднимается выше, чем при высоких температурах [2, 95, 138].

4.34. ВЫВЕДЕНИЕ ЖИРНЫХ ПЯТЕН

Упомянутая в предыдущей статье зависимость поверхностного натяжения от температуры подсказывает способ выведения жирных пятен с тканей. Для этого необходимо пятно на ткани с одной стороны прогреть утюгом, а с другой стороны к нему приложить какой-нибудь материал, хорошо впитывающий жир, например, хлопчатобумажную материю.

Этот способ основан на том, что поверхностное натяжение жидкостей уменьшается с повышением температуры. Поэтому если температура в различных частях жидкого пятна различна, то жир стремится двигаться от нагретого места (утюга) к холодному (хлопчатобумажной материи) [95, 98].

4.35. ПОВЕРХНОСТНОЕ НАТЯЖЕНИЕ И КОСМОС

Летчик-космонавт №4 бывшего Советского Союза **П. Р. Попович** (1930–2009) во время своего первого полета в 1962 г., находясь в кабине космического корабля в условиях невесомости, произвел наблюдения за закупоренной стеклянной колбой, заполненной примерно на две трети водой. В спокойном состоянии воздух собирался в один большой пузырь в середине колбы, а вокруг него образовывалась водяная оболочка. При взбалтывании воздух разбивался на множество мелких пузырьков, которые затем опять постепенно собирались в один в середине колбы. Как объясняется это наблюдение?

Объясняется это тем, что силы сцепления между молекулами воды и стекла больше сил сцепления между молекулами самой воды, из-за чего вода для стекла является смачивающей жидкостью. Как известно, если в земных условиях капнуть воду на очищенную горизонтальную поверхность стекла, то она растечется почти до мономолекулярного слоя. Поэтому и в условиях невесомости вода в колбе беспрепятственно растекается по всей его внутренней поверхности (в обычных условиях этому мешает сила тяжести). Воздух при этом оказывается внутри воды. Силы поверхностного натяжения максимально сокращают свободную поверхность воды (см. по этому поводу ст. 4.29), вследствие чего воздушный пузырь стремится приобрести сферическую форму [8].

4.36. ЗАДАЧА, ПРИВОДЯЩАЯ К ПОЛЕЗНОМУ ВЫВОДУ

Имеются две тонкие стеклянные трубки (капилляры), расширяющиеся к одному концу (т. е. в виде длинного усеченного конуса). В первую трубку введена капля ртути, во вторую — капля воды. Что будет происходить с каплями в трубках?

Так как ртуть не смачивает стекло, то ее свободные поверхности в трубке имеют выпуклую форму (краевой угол θ больше 90°) и добавочное лапласово давление направлено с обеих сторон внутрь жидкости (см. ст. 4.28 на с. 417). Но мениск в узкой стороне трубки имеет меньший радиус кривизны, значит, добавочное давление с этой стороны больше (см. формулу (4.7) там же). Тогда ясно, что за счет разницы давлений ртуть выталкивается в сторону широкого конца трубки.

Вода смачивает стекло (краевой угол θ меньше 90°), поэтому ограничена с обеих сторон вогнутыми менисками и направление действия лапласова давления противоположно. Более изогнутый мениск сильнее увлекает жидкость, поэтому столбик воды перемещается в сторону узкого конца трубки.

Итак, столбики жидкостей двигаются в трубках по противоположным направлениям: ртутный — к широкому концу, водяной — к узкому.

А теперь — полезное обобщение этой задачи: способность воды переходить в капиллярных каналах из широких трубочек в узкие имеет важное значение для сохранения влаги в почве. Если верхний слой почвы плотный, т. е. содержит в себе узкие каналы, а нижние слои — рыхлые, т. е. содержат в себе много широких каналов, то верхний слой легко пополняется водой из нижнего слоя. Если же, наоборот, нижний слой плотный, а верхний — рыхлый, то этот верхний слой, высохнув, не принимает влагу из нижнего слоя (так как вода не переходит из узких каналов в широкие, но лишь из широких в узкие) и остается поэтому сухим. Отсюда вытекает и одно из средств борьбы с засухой — рыхление поверхностного слоя почвы. Как правило, для сохранения в почве влаги разрыхляют ее верхний слой на глубину 2 см или даже менее. При этом узкие каналы в этом слое разрушаются и заменяются более широкими, которые не могут всасывать воду снизу. Таким образом, верхний рыхлый слой предохраняет собой всю остальную толщу почвы от иссушающего действия ветров и солнечных лучей [95, 98, 126].

4.37. ЗАГАДКА КАПИЛЛЯРНЫХ ЯВЛЕНИЙ

В ст. 4.28 (с. 417) уже указывалось, что наиболее известным капиллярным явлением является изменение уровня жидкости в погруженном в нее капилляре. Как видно из формулы (4.8) этой статьи, высота подъема жидкости зависит от радиуса капилляра, находясь с ним в обратно пропорциональной зависимости. Человек любознательный может задаться вопросом: за счет какого же источника энергии поднимается (опускается) жидкость? Ведь никаких видимых изменений ни с капилляром, ни с жидкостью не происходит.

На самом деле, конечно же, изменение есть, только зафиксировать его очень сложно. Поднятие смачивающей жидкости в капиллярных трубках происходит за счет убыли внутренней энергии жидкости, т. е. фактически — с понижением температуры. Однако это понижение настолько мало, что его очень трудно обнаружить.

Действительно, пусть масса жидкости, вошедшей в капилляр, равна m и высота подъема составила h . Тогда произведенная капиллярными силами работа по увеличению потенциальной энергии жидкости в поле тяжести Земли может быть записана следующим образом:

$$A_{\text{кап}} = \frac{1}{2} mgh.$$

(Множитель $1/2$ введен потому, что центр тяжести жидкости в капилляре оказывается поднятым на высоту $h/2$ над поверхностью жидкости в сосуде.) Эта работа по величине равна убыли внутренней энергии: $A_{\text{кап}} = \Delta U$. Согласно I началу термодинамики, изменение внутренней энергии возможно двумя способами: передачей (в данном случае — отнятием) некоторого количества теплоты и совершением работы: $\Delta U = \Delta Q + A'$. Так как объем жидкости не меняется, то $A' = 0$. Значит,

$$A_{\text{кап}} = \Delta Q = cm\Delta T,$$

где c — удельная теплоемкость жидкости. Отсюда

$$\Delta T = \frac{A_{\text{кап}}}{cm} = \frac{1}{2} \frac{mgh}{cm} = \frac{1}{2} \frac{gh}{c}.$$

Подставив сюда из формулы (4.8) высоту подъема жидкости в капилляре, получим:

$$\Delta T = \frac{1}{2} \frac{g}{c} \frac{2\sigma \cos \theta}{\rho g r} = \frac{\sigma \cos \theta}{\rho c r},$$

где σ — коэффициент поверхностного натяжения жидкости; ρ — ее плотность; r — радиус капиллярной трубки; θ — краевой угол.

Пусть радиус капиллярной трубки равен 1 мм, а жидкостью является вода, для которой $c = 4190$ Дж/(кг·град), $\sigma = 0,072$ Н/м, $\rho = 1000$ кг/м³. Будем считать смачивание полным: $\theta = 0$. Тогда

$$\Delta T = \frac{0,072 \cdot \cos 0}{1000 \cdot 4190 \cdot 0,001} \approx 1,7 \cdot 10^{-5} \text{ град.}$$

Чтобы обнаружить такое изменение температуры, нужно специальное измерительное оборудование. Фактически же понижение температуры будет еще меньше, так как работа капиллярных сил совершается за счет убыли внутренней энергии всей жидкости, а не только ее части, вошедшей в капилляр. Разумеется, через некоторое время возникшая разность температур между жидкостью и окружающей средой исчезает, что еще больше затрудняет ее обнаружение [20, 70].

4.38. КАК ГОТОВИТЬ МЫЛЬНЫЙ РАСТВОР

Умеете ли вы выдувать мыльные пузыри? Это не так просто, как кажется: умение выдувать большие и красивые пузыри — своего рода искусство, требующее упражнений. Великий английский ученый **лорд Кельвин** (У. Томсон) писал: «Выдуйте мыльный пузырь и смотрите на него: вы можете заниматься всю жизнь его изучением, не переставая извлекать из него уроки физики».

Из жидкостей (кроме жидких металлов) вода сильнее всего склонна к шарообразованию, т. е. к сокращению своей поверхности. Хотя раствор мыла в воде почти в 2 раза снижает поверхностное натяжение, но дает удивительное свойство образовывать пузыри. Связано это с тем, что мыло богато поверхностно-активными веществами (ПАВ), молекулы которых вытянуты и их концы по-разному относятся к воде: один конец охотно соединяется с водой, а другой — к воде безразличен. Поэтому мыльная пленка как бы «армавирована» (т. е. усилена) частоклолом упорядоченно расположенных молекул ПАВ и этим объясняется ее способность образовывать пузыри.

Необходимо уметь правильно составлять мыльный раствор для выдувания пузырей. Годится раствор обычного хозяйственного мыла в дождевой, снеговой или, в худшем случае, кипяченой воде. Чтобы пузыри держались долго, нужно прибавить к мыльному раствору до трети его объема глицерин. В качестве трубочки для выдувания пузырей подойдет и обычная бумажная трубочка.

Выдувать пузыри лучше всего так. Окунув трубочку в раствор, держат ее отвесно, чтобы на конце образовалась толстая пленка жидкости и осторожно дуют в трубочку. При этом пузырек наполняется теплым воздухом наших легких, который легче окружающего воздуха, и выдутый пузырь поднимется вверх. Если сразу же удастся выдуть пузырь диаметром в 10 см, то мыльный раствор хороший. В противном случае необходимо добавить в раствор еще мыла до тех пор, пока пузыри не будут достигать такого размера. Но это еще не все. Выдув пузырь, надо обмакнуть палец в мыльный раствор и постараться пузырь проткнуть. Если он не лопнет, то раствор готов, если же лопнет, надо прибавить еще мыла.

Пленка мыльного пузыря все время натянута и давит на заключенный в ней воздух. Направив трубочку с пузырем к пламени свечи, вы можете убедиться, что давление воздуха внутри пузыря не так уж и малое — пламя заметно уклоняется в сторону.

Следует отметить, что обычные представления о недолговечности мыльных пузырей не вполне обоснованы — при надлежащем обращении удастся сохранить мыльный пузырь в продолжение недель. Английский физик **Д. Дьюар** (1842–1923) (создатель термоса — **сосуда Дьюара**) хранил мыльные пузыри в бутылках, хорошо защищающих от пыли. В таких условиях ему удавалось сохранять некоторые пузыри месяц и более. Известны случаи, когда мыльные пузыри годами сохранялись под стеклянным колпаком. Такая прочность и сила натяжения пузырей вызвана тем, что поверхностный разреженный слой там находится и сверху, и снизу, то есть поверхностное натяжение как бы удвоенное [2, 34, 43, 92, 94, 119, 147].

4.39. ПРЕВРАЩЕНИЯ МЫЛЬНОГО ПУЗЫРЯ

С хорошо приготовленным мыльным раствором (см. предыдущую статью), кроме тривиального выдувания пузырей, можно проделывать и более удивительные вещи.

Сделайте из проволоки куб со сторонами примерно в 7 см. Прикрепите к нему П-образную проволоку с ручкой, чтобы можно было переносить куб без касания к нему руками. Для

опыта лучше всего взять ржавую проволоку, чтобы она не была слишком скользкой.

Погрузите куб целиком в мыльный раствор. Если теперь осторожно его вытащить, то в центре большого куба окажется тонкая квадратная пленка, соединенная другими пленками с ребрами куба.

Погрузите куб снова в раствор только одной нижней его плоскостью, и вы увидите новое превращение: в середине куба появится маленький кубик из мыльной пленки, а вокруг него — шесть правильных пирамид, отливающих всеми цветами радуги. Дотроньтесь до одной из плоскостей большого куба клочком мягкой бумаги — кубик внутри него мгновенно превратится снова в квадрат.

Кстати, если вы проделываете эти опыты зимой, рекомендуем вам выйти из дома на мороз и выдуть мыльный пузырь — тотчас же в тонкой пленке воды появятся ледяные иголочки; они будут прямо на глазах собираться в чудесные снежинки.

Как известно (см. ст. 4.28 на с. 417), добавочное лапласово давление внутри искривленной поверхности жидкости обратно пропорционально радиусу искривления. Этот факт можно легко продемонстрировать с помощью мыльных пузырей. Для этого надо соорудить трубку для выдувания пузырей в виде буквы «Т». Обмакните такую трубку в мыльном растворе и выдуйте два пузыря разных размеров, а затем отверстие, через которое вы вдвухали воздух, закройте пальцем. Вы увидите, что большой пузырь будет еще больше увеличиваться, а маленький — уменьшаться, демонстрируя, что в маленьком пузыре давление воздуха выше, чем в большом.

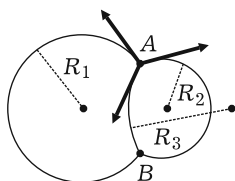


Рис. 4.26

Мыльные пузыри могут соединяться друг с другом, образуя пену, — это вы можете наблюдать каждый раз при мытье рук и стирке вещей. Несмотря на кажущуюся хаотичность в расположении мыльных пленок в пене, всегда выполняется один закон: пленки пересекают друг друга лишь под равными углами. Действительно, рассмотрим два пузыря, находящихся в контакте друг с другом и имеющих общую перегородку

(рис. 4.26). Избыточные (по сравнению с атмосферным) давления внутри пузырей различны из-за различия их радиусов (см. формулу (4.7) на с. 419) и определяются формулами

$$\Delta p_1 = \frac{2\sigma}{R_1}, \quad \Delta p_2 = \frac{2\sigma}{R_2}.$$

Поэтому перегородка между пузырями должна быть искривлена так, чтобы скомпенсировать различия в давлениях внутри пузырей. Радиус R_3 кривизны перегородки определяется из соотношения

$$\frac{2\sigma}{R_3} = \frac{2\sigma}{R_2} - \frac{2\sigma}{R_1},$$

откуда

$$R_3 = \frac{R_1 R_2}{R_1 - R_2}.$$

На рис. 4.26 изображен разрез пузырей в плоскости, проходящей через их центры. Точки A и B представляют собой точки пересечения с плоскостью чертежа окружности, по которой соприкасаются два пузыря. В любой точке этой окружности встречаются три пленки. Так как их поверхностное натяжение одинаково, то силы их поверхностного натяжения могут уравновесить друг друга лишь в том случае, когда углы, под которыми они пересекаются, равны между собой, и следовательно, каждый равен 120° [2, 34, 51, 77, 126, 132, 147].

4.40. ЕЩЕ О МЫЛЬНОЙ ПЛЕНКЕ

Мыльная пленка — одна из самых тонких вещей, доступных человеческому глазу. Она в 5 000 раз тоньше волоса. При увеличении в 200 раз человеческий волос кажется толщиной с палец, но при таком же увеличении толщина мыльной пленки еще не доступна зрению. Если увеличить еще в 200 раз, то стенка мыльного пузыря предстанет в виде тонкой линии. Волос же при таком увеличении (в 40 000 раз) имел бы толщину свыше 2 м! И эта тончайшая пленочка выдерживает давление, способное отклонить пламя свечи. Для сравнения: если это давление составляет одну тысячную атмосферы (или 100 Па) при толщине пленки в 10^{-5} мм, то это равносильно тому, что

пузырь с толщиной стенки в 1 мм выдерживал бы 100 атмосфер (или 10 МПа)! Такое может обеспечить только прочнейшая сталь, значит, мыльная пленка прочнее стали! [43]

4.41. КАПИЛЛЯРНЫЕ ЯВЛЕНИЯ МЕЖДУ ПЛАСТИНКАМИ

Когда говорят о капиллярных явлениях, то в первую очередь подразумевают явление поднятия смачивающей жидкости в капиллярной трубке, забывая при этом, что капилляром может являться любая система, характерные размеры которой сравнимы с радиусом мениска налитой в нее жидкости. Так, например, капилляром вполне можно стать система из двух стеклянных пластинок. Опустите пластинки в сосуд с жидкостью и постепенно сближайте их параллельно друг другу — при некотором расстоянии между ними жидкость начнет подниматься.

Если жидкость является смачивающей (т.е. когда можно считать, что краевой угол $\theta = 0$), то легко рассчитать коэффициент поверхностного натяжения σ по высоте подъема жидкости h и зазору между пластинками d . Действительно, сила поверхностного натяжения, которая удерживает слой жидкости между пластинами, равна $F_{\text{нат}} = 2\sigma l$, где l — длина пластинки (двойка появилась из-за того, что вода соприкасается с двумя пластинками). Эта сила удерживает слой жидкости массой $m = \rho V = \rho l h d$, где ρ — плотность жидкости. Таким образом, $2\sigma l = \rho l h d g$, откуда

$$\sigma = \frac{1}{2} \rho g h d. \quad (4.13)$$

С помощью пластинок можно даже визуализировать зависимость высоты уровня жидкости h от расстояния между пла-

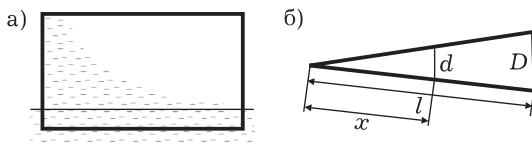


Рис. 4.27

стинами d . Для этого надо с одного конца сжать пластинки вместе, а с другого — оставить небольшой зазор. Жидкость в зависимости от расстояния d в данном месте между пластинами поднимется на разную высоту h и образует удивительно правильную поверхность (конечно, если стекло чистое и сухое) — гиперболу (рис. 4.27, *а*, вид сбоку). В самом деле, из подобия треугольников (рис. 4.27, *б*, вид сверху) получаем, что расстояние между пластинами $d = Dx/l$, где D — зазор на конце, l — длина пластинки, x — расстояние от места соприкосновения пластинок до места, где определяется зазор между ними и высота уровня жидкости. Подставляя это значение в (4.13), найдем $\sigma = \frac{1}{2}\rho ghDx/l$, откуда

$$h = \frac{2\sigma l}{\rho g D} \cdot \frac{1}{x}.$$

Это действительно уравнение гиперболы [88].

4.42. САМОДЕЛЬНОЕ ПЕРО

Известно ли вам, что сосновые иглы всегда растут попарно (по две штуки с одного побега)? Такое расположение хвоинок — характерная особенность повсеместно распространенной в России обыкновенной сосны. Хвоинки остаются соединенными попарно не только при жизни, но и после отмирания. Самое интересное, что обе иглы всегда одинаковой длины и по каждой из них идет продольный желобок, так что, если наложить их друг на друга, между ними вдоль всей длины образуется капиллярный канал, а острия игл будут соприкасаться. Все это позволяет сконструировать замечательное перо для письма и рисования (так называемое «**перо Робинзона**»).

Оторвите от ветки сосны такие две иглы и свяжите их ниткой ближе к их концу. Воткните полученное перо в трубочку из бузины или в старый стержень от шариковой ручки, чтобы перо выступало остриями наружу не больше, чем на 1 см. Перо готово.

Окуните теперь ваше перо в чернила и подержите его там некоторое время. Чернила поднимутся по каналчику между иглами, и перо будет иметь достаточный запас чернил, чтобы

написать, не макая в чернила ручку, от 20 до 30 строчек. Этим тонким и гибким пером можно писать и жирно, и тонко, любым шрифтом [54, 77].

4.43. ПЛАСТИНКА НА ДНЕ СОСУДА С ЖИДКОСТЬЮ

Имеются два стеклянных сосуда: в один налита вода, в другой — ртуть. Ко дну сосуда с водой вплотную приложена деревянная пластинка, а ко дну сосуда с ртутью — стеклянная пластинка. Известно, что плавучесть стекла в ртути (т. е. разность значений плотности ртути и стекла) гораздо больше, чем плавучесть дерева в воде. Однако в данном случае деревянная пластинка в воде всплывет, а стеклянная в ртути — нет. Почему?

Тут надо иметь в виду, что, как бы плотно ни прилегли пластинки ко дну, между ними и дном неизбежно будет оставаться тонкий воздушный промежуток, который можно рассматривать как капилляр. Поэтому жидкости у краев этих тесно сближенных поверхностей образуют мениски (см. ст. 4.36 на с. 431).

Вогнутость мениска воды между деревянной пластиной и стеклом обращена внутрь прослойки и поэтому туда втягивается вода. Возникшая архимедова сила поднимает деревянную пластинку на поверхность воды. Иное дело в случае ртути и стеклянной пластинки. Стекло не смачивается ртутью, поэтому между стеклянной пластинкой и стеклянным же дном ртуть образует выпуклость, обращенную к свободной прослойке. Эта выпуклость давит наружу и не допускает ртути под пластинку. Архимедова сила в этом случае направлена вниз (давление под пластинкой ниже, чем сверху) и не дает всплыть стеклянной пластинке, хотя плавучесть стекла в ртути больше, чем плавучесть дерева в воде.

Кстати, последняя ситуация объясняет, почему так опасно подводной лодке ложиться на глинистый грунт морского дна: может оказаться, что между ее днищем и дном вообще не будет воды и, соответственно, исчезает выталкивающая сила, помогающая лодке всплыть. Эта ситуация для подводной

лодки многократно усугубляется тем, что вместо архимедовой выталкивающей силы $F_A = \rho g V$, обусловленной перепадом давлений на нижнюю и верхнюю поверхности лодки ($p_{\text{выт}} = \rho g \Delta h$, где Δh — толщина лодки), теперь действует несравненно более мощная сила вниз, обусловленная давлением толщии воды плюс атмосферное давление ($p_{\text{вниз}} = \rho g H + p_{\text{атм}}$, где H — глубина погружения лодки). Это действительно может оказаться катастрофой для лодки. Последний шанс для нее — включить электродвигатели и попробовать «поелозить» по дну: вдруг лодка наскочит на камень или твердый грунт и под лодку попадет вода [79, 95, 128].

4.44. МЕРЦАНИЕ СВЕЧИ

Романтические встречи, как правило, принято обставлять при горящих свечах. Это действительно завораживающее зрелище. Если вы были участником такого мероприятия (это можно проверить и самостоятельно), то могли заметить, что маленькие свечи перед тем, как погаснуть, начинают мерцать и потрескивать. Чем это вызвано?

Горение вещества свечи (современные свечи, как правило, парафиновые) происходит на верхнем конце фитиля. При этом нижележащий парафин растапливается и доставляется в зону горения посредством фитиля за счет работы капиллярных сил. Если пламя свечи слишком велико, поступающего по фитилю жидкого парафина может оказаться недостаточно для его поддержания, и пламя уменьшается. Но на интенсивность капиллярных сил это практически не влияет, поэтому через некоторое время в зоне горения может образоваться избыток парафина, и пламя снова ярко вспыхивает. И так далее. Чем короче становится фитиль, тем выше частота мерцаний, пока свеча не потухнет совсем [140].

4.45. «БЕЗДОННЫЙ» БОКАЛ

Попробуйте сделать следующий опыт. Налейте воды в бокал до краев и аккуратно начните бросать в бокал английские булавки и считать их. Бросать надо осмотрительно:

сначала в воду осторожно погрузите острое, затем осторожно, без толчка или давления, выпускайте булавку из руки.

При особом старании вы можете набросать в бокал до сотни булавок, а вода из бокала все еще не будет выливаться. И только тогда, когда количество брошенных булавок перевалит за сотню, можно будет заметить, что поверхность воды вздулась, возвышаясь немного над краями бокала. В этом вздутии вся разгадка этого явления.

Если стекло хотя бы немного загрязнено жиром, то вода плохо смачивает стекло. Края же бокала — как и вся употребляемая нами посуда — неизбежно покрывается следами жира от прикосновения пальцев. Не смачивая краев, вода, вытесняемая булавками из бокала, образует выпуклость. Вздутие незначительно на глаз, но если дадите себе труд вычислить объем одной булавки и сравните его с объемом той выпуклости, которая слегка вздулась над краями бокала, вы убедитесь, что первый объем в сотни раз меньше второго, и оттого в «полном» бокале может найтись место еще для нескольких сотен булавок. Чем шире посуда, тем больше булавок она способна вместить, потому что тем больше объем вздутия.

Сделаем для ясности примерный подсчет. Примем длину булавки равной около 25 мм, а ее толщину — 0,5 мм. Объем такого цилиндра нетрудно вычислить:

$$V_0 = \frac{\pi d^2}{4} h = \frac{3,14 \cdot 0,5^2}{4} \cdot 25 \approx 5 \text{ мм}^3.$$

Вместе с головкой объем булавки не будет превышать 5,5 мм³. Теперь подсчитаем объем водяного слоя, возвышающегося над краями бокала. Пусть диаметр бокала 90 мм. Площадь такого круга равна около 6 400 мм². Считая, что толщина поднявшегося слоя только 1 мм, имеем для его объема 6400 мм³. Это больше объема булавки в 1 200 раз — другими словами, «полный» бокал воды может принять еще свыше тысячи булавок! И действительно, осторожно опуская булавки, можно погрузить их целую тысячу, так что для глаз они словно займут весь сосуд и будут даже выступать над его краями, а вода все-таки еще не будет выливаться [92, 131].

4.46. ВОДА В РЕШЕТЕ

Есть русская поговорка «Носить воду в решете», означающая бессмысленность какого-либо занятия или дела. Хотите носить воду в решете, чтобы опровергнуть народную мудрость? Пожалуйста. Для этого возьмите проволочное решето с не слишком мелкими ячейками, окуните его сетку в расплавленный парафин и затем выньте решето из парафина. Сетка окажется покрытой тонким слоем парафина, едва заметным для глаз. Решето осталось решетом — в нем есть сквозные отверстия, через которые свободно проходят не только воздух, но и иголка. Однако теперь вы можете в буквальном смысле слова носить воду в решете. В таком парафинированном решете удерживается довольно высокий уровень воды, не проливающейся сквозь ячейки; надо только осторожно наливать воду и оберегать решето от толчков.

Почему же вода не проливается? Потому что вода не смачивает парафин (краевой угол $\theta = 180^\circ$) и образует в ячейках решета тонкие пленки, обращенные выпуклостью вниз, которые и удерживают воду поверхностным натяжением. Парафинированное решето можно положить на воду, и оно будет держаться на ней. Значит, возможно не только носить воду в решете, в нем также могут плавать не слишком тяжелые предметы (чего народная мудрость еще не подметила).

Этот удивительный опыт объясняет ряд обыкновенных явлений, к которым мы настолько привыкли, что не задумываемся об их причине. Например, смоление бочек и лодок, окрашивание масляной краской поверхностей, прорезинивание тканей — все это не что иное, как изготовление несмачиваемых водой поверхностей [38, 43, 94, 98, 147].

4.47. ДОЗАТОР ВОДЫ

Описанное в предыдущей статье парафинированное решето может стать основой для конструирования простого **дозатора воды** (или другой жидкости). Связано это с тем, что в таком решете после заливки ее водой всегда будет задерживаться одинаковый по высоте столб воды. Поэтому можно

изготовить решето с заранее рассчитанной площадью для получения дозатора определенного объема.

Кстати, в качестве сетки для решета можно взять предварительно отперфорированную фторопластовую (тефлоновую) пленку, которая сейчас свободно продается. Тефлон был открыт абсолютно случайно доктором **Р. Планкеттом** в 1938 г. Этот материал практически не смачивается большинством жидкостей, кроме того обладает необычайно скользкой поверхностью, поразительно стоек к воздействию химикатов и растворителей, включая сильно разъедающие кислоты.

Другое применение нашего дозатора — это его использование в качестве **измерителя коэффициента поверхностного натяжения** жидкостей. Действительно, в решете для разных жидкостей в силу различия коэффициентов поверхностного натяжения будут задерживаться разные их количества. Поэтому достаточно отградуировать дозатор с помощью двух жидкостей с известными значениями коэффициентов поверхностного натяжения, чтобы использовать его в качестве измерителя для любой другой несмачивающей жидкости [49, 148].

4.48. ЗАМЕЧАТЕЛЬНЫЙ КЕРОСИН

Керосин так хорошо смачивает все предметы, что просачивается через малейшие отверстия и щели. Никакими резьбовыми пробками невозможно наглухо закрыть емкость с керосином — все равно «выползет» наружу и растечется по всей поверхности емкости. Известный английский писатель Джером К. Джером в своем произведении «Трое в лодке, не считая собаки» так описывает это свойство керосина: «Однажды мы захватили в дорогу керосинку, но это было в первый и последний раз. Целую неделю мы провели словно в керосиновой лавке. Керосин просачивался. Я не знаю, что еще обладает такой способностью просачиваться, как керосин. Мы держали его на носу лодки, и оттуда он просочился до самого руля, пропитав по пути всю лодку и ее содержимое, и расплылся по реке, и вьелся в пейзаж, и отравил воздух».

Эту способность керосина используют, когда хотят вывинтить «прихвativшийся» ржавый болт или гайку. Для этого

необходимо смочить видимые края резьбы керосином (например, кисточкой) и оставить так на несколько часов. После этого можно легко отвинтить любую прижавевшую гайку или болт — керосин проникнет в любые щели и смажет резьбу.

Керосином также можно проверять качество сварки или пайки. Если при смазывании керосином одной поверхности запаянного или заваренного листа на противоположной поверхности появляется пятнышко керосина, значит в пайке или сварке имеется микроскопическая трещина [43].

4.49. ПЕСОК КАК ЖИДКОСТЬ

Как вы думаете, применим ли закон Архимеда к сыпучим телам? И может ли человек утонуть в песке?

Оказывается, непосредственно применять закон Архимеда к сыпучим телам нельзя, так как частицы таких тел подвержены трению, которое в жидкостях ничтожно мало (см. ст. 4.15 на с.394). Однако если сыпучее тело поставить в условия, при которых свобода перемещения частиц не стесняется их трением друг о друга, то закон Архимеда оказывается вполне применимым.

В таком состоянии находится, например, сухой песок, подвергаемый частым сотрясениям, которые помогают песчинкам перемещаться, подчиняясь действию тяжести. Об опытах подобного рода писал еще английский естествоиспытатель **Р. Гук** (1635–1703), знаменитый современник и соотечественник **И. Ньютона** (1643–1727): «Нельзя закопать в песок, подверженный частым сотрясениям, легкое тело, например кусок пробки, — он тотчас же «всплывет» на поверхность песка; наоборот, тяжелое тело немедленно закапывается в нем и падает на дно сосуда».

Итак, к сыпучим телам закон Архимеда применим лишь тогда, когда сыпучее тело подвергается сотрясениям — сотрясаемое сыпучее тело уподобляется в рассматриваемом отношении жидкостям. Отсюда следует, между прочим, что так как средняя плотность человеческого тела ($\approx 1,1 \text{ г/см}^3$) меньше плотности сухого песка ($\approx 1,7 \text{ г/см}^3$), то человек не может быть с головой засосан песком.

Приложимость закона Архимеда к подвижному песку находит применение в промышленности для очищения каменного угля от посторонних примесей. Сырой уголь, подлежащий очистке, бросают на песок, плотность которого подобрана так, что она больше плотности каменного угля, но меньше плотности той породы, которая к углю примешана. Чтобы сделать песчинки подвижными, сквозь песок непрерывно продувается снизу вверх воздух, проникающий через сито под песком. От давления продуваемого воздуха, т. е. от скорости воздушного потока, зависит и плотность песка. Очутившись на песке, зерна угля и куски породы разделяются: уголь остается на поверхности (не тонет), а ненужная порода утопает в песке, проваливается сквозь сито и собирается в приемник [95].

4.50. СМАЧИВАНИЕ И ЗЫБУЧИЕ ПЕСКИ

Другим примером поведения обычного песка как жидкости (см. предыдущую статью) является так называемый **зыбучий песок**. Известно немало случаев, когда люди становились жертвой зыбучих песков. В способности обычного неподвижного на вид песка внезапно проглатывать находящиеся на его поверхности предметы легко увидеть что-то мистическое, однако это явление имеет довольно простое физическое объяснение.

Дело в том, что свойства влажного песка очень существенно зависят от количества воды в нем. Слегка увлажненные песчинки легко слипаются, демонстрируя резкий рост сил сцепления, которые в сухом песке определяются только неровностями поверхности, а потому невелики. Слипаться песчинки заставляют силы поверхностного натяжения пленок воды, окружающих каждую песчинку. Чтобы песчинки хорошо слипались, вода должна только лишь покрывать частицы и их группы тонкой пленкой, большая же часть пространства между ними должна оставаться заполненной воздухом.

Если же количество воды в песке увеличивать, то, как только все пространство между песчинками заполнится водой, силы поверхностного натяжения пропадут и получится смесь песка и воды, обладающая совершенно другими свойствами,

похожими на свойства тиксотропных (неньютоновских) жидкостей (см. ст. 4.6 на с. 380).

Зыбучий песок — это самый обычный песок, под толщей которого на глубине нескольких метров имеется достаточно сильный источник воды. Чаще всего зыбучие пески встречаются в холмистой местности. Спускаясь с гор, потоки воды движутся по каналам внутри доломитовых и известняковых скал. Где-то ниже по течению вода может пробить камень и устремиться вверх мощным потоком. Если на поверхности находятся песчаные отложения, то поток воды, идущий снизу, превратит их в зыбучие пески. Часто солнце подсушивает верхний слой песка, образуя тонкую твердую корочку, на которой может даже расти трава. Внешне такое «песчаное болото» выглядит вполне надежно и не вызывает никаких подозрений, однако стоит на него ступить, как почва в буквальном смысле поплывет из-под ног.

Хотя плотность зыбучего песка примерно в 1,6 раза больше плотности воды, плавать в зыбучем песке гораздо сложнее. Он очень вязок, поэтому любая попытка двигаться в нем встречает сильное противодействие. Возникающая вслед за движением песчаная полость не успевает быстро заполниться, поэтому в ней возникает разрежение. Сила атмосферного давления стремится вернуть предмет на прежнее место — создается впечатление, что песок «засасывает» свою жертву. Кроме того, перемещаться в зыбучем песке можно только очень медленно и плавно, так как смесь воды и твердых частиц песка инерционна по отношению к быстрым перемещениям: в ответ на резкое движение она как бы затвердевает [62, 82].

4.51. СМАЧИВАНИЕ ДЛЯ ОБОГАЩЕНИЯ РУД

Очень важное для техники применение смачиваемых поверхностей — это так называемая **флотация**. Сама технология была открыта совершенно случайно. В конце XIX в. американская учительница Карри Эверсон, стирая грязные замасленные мешки из-под руды, заметила, что крупинки медной руды всплывают с мыльной пеной, а частички пустой породы — нет.

Это наблюдение было положено в основу промышленного процесса обогащения размолотой руды. Руда загружается в емкость с водой и маслянистыми веществами. Маслянистые вещества способны обволакивать частицы полезного минерала тончайшими пленками, но не смачивают пустую (ненужную) руду. Емкость энергично продувается воздухом, который образует множество мельчайших пузырьков — пену. При этом частицы полезного минерала, покрытые тонкой маслянистой пленкой, приходят в соприкосновение с оболочкой воздушного пузырька и пристаю к ней. Пузырьки, поднимаясь вверх, выносят полезный минерал на поверхность жидкости. В итоге частицы полезного минерала почти все оказываются в пене, покрывающей жидкость. Пену снимают и получают так называемый «концентрат», который в десятки раз богаче полезным минералом, нежели первоначальная руда. Частицы же пустой породы, не покрытые маслянистым веществом, не пристаю к воздушным пузырькам и остаются в жидкости.

Техника флотации разработана так тщательно, что надлежащим подбором примешиваемых жидкостей можно отделить каждый полезный минерал от пустой породы любого состава. Флотация — наиболее действенный метод обогащения руды; он успешно применяется даже в тех случаях, когда все остальные технологии не достигают цели.

Остается неизвестным только, обогатилась ли сама Карри Эверсон, сделавшая столь важное и полезное открытие [11, 43, 107, 175].

4.52. УДИВИТЕЛЬНЫЙ ОСМОС

Осмсом (от греч. *οσμος* — толчок, давление) называют диффузию какого-либо вещества через полупроницаемую перегородку (мембрану). Основное требование к мембране — обеспечение **невозможности диффузии в противоположном направлении для молекул других веществ**.

Так, если два раствора разной концентрации разделить перегородкой, задерживающей молекулы растворенного вещества, но пропускающей молекулы растворителя, то

растворитель будет переходить в более концентрированный раствор (там концентрации растворителя меньше), разбавляя его и создавая тем самым избыток давления $\rho g \Delta h$, называемого **осмотическим давлением** (рис. 4.28). В некотором смысле компоненты раствора ведут себя как компоненты смеси газов, стремящиеся занять весь предоставленный им объем (в данном случае объем раствора). Молекулы растворителя будут переходить через мембрану до тех пор, пока образовавшееся гидростатическое давление не воспрепятствует их дальнейшему проникновению.

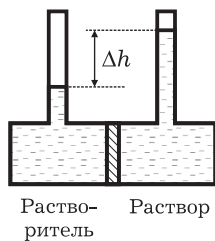


Рис. 4.28

Примером полупроницаемой перегородки является мембрана, прилегающая к яичной скорлупе с внутренней стороны. Она пропускает молекулы воды и задерживает молекулы сахара. Если такой мембраной разделить растворы сахара с разными концентрациями, то через нее в обоих направлениях будут проходить только молекулы воды. В результате через некоторое время в более разбавленном растворе концентрация сахара повышается из-за утечки воды через мембрану, а в более концентрированном, наоборот, понижается из-за притока новых порций воды. Когда концентрация сахара в обоих растворах станет одинаковой, наступает равновесие, но давления в растворах будут разные — их разность и будет осмотическим давлением.

Физическая природа осмоса была объяснена в 1887 г. голландским химиком **Я. Х. Вант-Гоффом** (1852–1911). Он уподобил молекулы растворенного вещества, движущиеся в растворителе, молекулам идеального газа, движущимся в вакууме. Ударяясь о перегородку, молекулы растворенного вещества тем самым и создают давление на нее. Вант-Гофф показал, что при относительно небольших концентрациях раствора осмотическое давление π описывается точно такой же формулой, что и давление идеального газа:

$$\pi = \frac{nRT}{V},$$

где n — число молей растворенного вещества; V — объем растворителя; T — температура; R — универсальная газовая постоянная.

Для измерения осмотического давления можно воспользоваться все той же простой конструкцией, изображенной на рис. 4.28, и называемой **осмометром**. Сосуд разделяется на две части полупроницаемой мембраной и в них до одинаковой высоты наливаются раствор и чистый растворитель. Через некоторое время из-за осмоса возникнет разность высот Δh уровней жидкостей, которая и служит мерой осмотического давления:

$$\pi = \rho g \Delta h,$$

где ρ — плотность раствора. Практически все осмометры для измерений используют этот принцип.

В природе осмос играет исключительно большую роль, например, для питания растений водой — только за счет него (наряду с капиллярностью) у деревьев может быть осуществлена подача воды на большие высоты. Незаменима роль осмоса в процессах взаимодействия клеток с окружающей средой, а также во внутриклеточных процессах. С ним связано, в частности, не только наполнение клеток водой, но и выведение воды и солей из организма, а также задержание и перераспределение их внутри организма. Величина осмотического давления клеток многих растений составляет порядка 5–10 атм, а осмотическое давление крови человека доходит почти до 8 атм. Мембрана, окружающая нормальную клетку крови, проницаема лишь для молекул воды, кислорода, некоторых из растворенных в крови питательных веществ и продуктов клеточной жизнедеятельности; для больших белковых молекул, находящихся в растворенном состоянии внутри клетки, она непроницаема.

Именно осмос виноват в том, что нельзя пить морскую воду (или другую сильно соленую жидкость) для утоления жажды. Если вам удастся пересилить себя и проглотить хоть чуть-чуть морской воды, то вся содержащаяся в клетках вашего организма вода, следуя закону осмоса, устремится к этой высококонцентрированной соленой жидкости, чтобы ее разба-

вить. В результате ваши клетки лишаются воды, а в особо тяжелых случаях это может даже привести к спазмам, нарушению мозговой деятельности, а также печеночной и почечной недостаточности.

Уже есть несколько проектов использования осмотического давления в промышленных целях. Один из них представляет собой открытую сверху трубу из прочного металла, погруженную в замкнутую полость, куда налита вода. В трубе высверливается множество мелких отверстий, закрытых полупроницаемой оболочкой (например, из ацетатцеллюлозы) и она заполняется концентрированным раствором. Из-за осмоса в нее начинает просачиваться вода и создается повышенное давление. Это давление поднимает поршень и сжимает воздух в верхней части трубы. Таким образом можно создать давление до 3 000 атм. Сжатый воздух можно использовать для вращения воздушной турбины. Изобретатели утверждают, что их «осмотический двигатель», состоящий из нескольких таких труб, будет генерировать мощность, достаточную для движения автомобиля.

В другом проекте явление осмоса применено для получения питьевой воды из сильно загрязненной или соленой — так называемая **гиперфльтрация**. Для этого используется синтетическое волокно (типа целлофана): внутрь волокна проходит только вода, оставляя снаружи соли и грязь. Сама установка состоит из многих миллионов волокон, собранных в жгут и помещенных в стальной цилиндр, в который подается грязная вода под давлением.

А вот реальный проект, уже претворенный в жизнь, — 24 ноября 2009 г. в Норвегии заработала первая осмотическая электростанция (правда, пока экспериментальная). Принцип действия электростанции достаточно прост. Соленая морская и пресная вода на электростанции разделены мембраной. Так как концентрация солей в морской воде выше, между соленой и пресной водой развивается явление осмоса, в результате чего давление соленой воды многократно возрастает. Под действием этого давления мощный поток воды приводит в действие гидротурбину, вырабатывающую

электроэнергию. Мощность электростанции пока невелика — всего 5 кВт [24, 49, 126, 130, 148, 161, 191].

4.53. ФОКУС С ОСМОСОМ

Осмотическими свойствами обладает **пленка целлофана**: она пропускает молекулы воды, но не пропускает молекулы сахара. Осмотическое давление в случае 4%-го раствора сахара при комнатной температуре равно 3 атм. Если же взять 50%-й раствор сахара, то осмотическое давление оказывается равным почти 100 атм!

С помощью целлофановой пленки можно продемонстрировать эффектный опыт. Целлофановый пакет с раствором сахара опускают в сосуд с водой и буквально на глазах пакет начинает раздуваться — это внутрь него переходит вода из аквариума. Если концентрация сахара в пакете достаточно большая, то пакет из-за осмотического давления может даже лопнуть [130].

4.54. ГАЗ В ЖИДКОСТИ

Известно, что всякий газ, приведенный в соприкосновение с жидкостью, будет в ней растворяться. Степень того, насколько данный газ может раствориться в данной жидкости, определяется **коэффициентом растворимости** — это объем газа, измеренный при 0 °С и 760 мм рт. ст. (т. е. при нормальных условиях), который может раствориться в единице объема жидкости при данных температуре и давлении. Так, например, в 1 см³ воды при давлении в 98 кПа и температуре 40 °С растворяется такое количество кислорода, которое при нормальных условиях занимает объем 0,0231 см³.

Основные физико-химические закономерности растворимости газов в жидкостях впервые были изучены русским врачом-физиологом **И. М. Сеченовым** (1829–1905).

Как происходит растворение газа в жидкости? Пусть над жидкостью находится газ. С одной стороны, граница «жидкость-газ» представляет собой барьер, ограничивающий две фазы разных веществ. С другой стороны, тепловое дви-

жение всегда характеризуется некоторым распределением молекул по скоростям (например, в идеальном газе — это распределение Максвелла). Поэтому в любой молекулярной системе имеется некоторая доля молекул, имеющих достаточно большие скорости. Это приводит к тому, что сквозь границу «жидкость-газ» могут «просочиться» как молекулы жидкости, так и молекулы газа. Переход молекул жидкости в газ есть не что иное, как **испарение**. Проникновение же молекул газа в жидкость и дальнейшая их **диффузия** по объему жидкости — это и есть собственно растворение газа в жидкости. Конечно, часть молекул газа, уже проникших в жидкость, выходит из нее в силу того же теплового движения. Но пока число молекул газа в жидкости незначительно, за единицу времени выходит из жидкости меньше молекул газа, чем входит в нее из газа. Таким образом, число молекул газа в жидкости продолжает увеличиваться до тех пор, пока между вылетающими из жидкости и влетающими в жидкость молекулами газа не установится **динамическое равновесие**.

После наступления динамического равновесия количество молекул газа в жидкости можно увеличить лишь увеличением их количества над жидкостью, т.е. повышением давления газа. Отсюда так называемый **закон Генри** (в честь английского химика **У. Генри** (1774–1836), открывшего этот закон в 1802 г.): растворимость газов в жидкостях при данной температуре прямо пропорциональна давлению (при отсутствии химического взаимодействия). Если в жидкости растворяется одновременно несколько газов, то растворение каждого из них происходит независимо друг от друга пропорционально величине его парциального давления в данной газовой смеси.

С увеличением температуры растворимость газов уменьшается. Эту закономерность часто используют для удаления растворенных газов из воды кипячением.

Справедливость закона Генри мы наблюдаем практически каждый день, когда наливаем в стакан воду из водопровода. Почти сразу же можно заметить, что из воды выделяется множество мельчайших пузырьков, которые поднимаются вверх или удерживаются около стенок стакана. Это — газы, которые при повышенном давлении, всегда существующем в

водопроводных трубах, были растворены в воде в значительном количестве. При вытекании воды из крана давление в ней резко уменьшается. Кроме того, вода из водопровода в комнате обычно начинает нагреваться, т.к. воздух в комнате теплее. Эти изменения ведут к тому, что равновесие между газами, растворенными в воде, и газами вне ее нарушается и они начинают выделяться из воды в виде пузырьков (из полного стакана водопроводной воды может выделиться почти $0,5 \text{ см}^3$ воздуха). При дальнейшем нагревании воды и особенно при ее кипячении растворенные в ней газы удаляются практически полностью. Присутствие газов в сырой воде и отсутствие их в кипяченой воде являются причиной того, что кипяченая и сырая вода отличаются по вкусу.

Наблюдать растворение воздуха в воде более наглядно можно при помощи простого опыта. Для этого необходимо воду в колбе прокипятить в течение некоторого времени и дать ей остыть. Потом осторожно, не встряхивая колбы, нужно присоединить к ней жидкостной манометр. Если теперь хорошенько встряхнуть колбу, чтобы у воды образовалась большая поверхность контакта с воздухом в колбе, то можно заметить, что манометр покажет заметное уменьшение давления воздуха в колбе. Следовательно, часть воздуха поглотилась водой.

Явление растворения газов в жидкостях имеет большое значение в водолазном деле (см. ст. 1.34 на с. 71). Водолазов, пробывших длительное время на большой глубине, нельзя быстро поднимать на поверхность воды, т.к. кровь водолаза, дышащего воздухом под большим давлением, насыщена азотом (хотя растворимость кислорода почти в два раза больше, чем у азота, его не следует принимать во внимание, так как он быстро связывается с кровью химически). При быстром подъеме азот может выделиться из крови внутрь кровеносных сосудов в виде пузырьков и закупорить их, что крайне опасно (это так называемая **кессонная болезнь**).

Напоследок отметим, что газы могут растворяться также и в твердых телах (см. по этому поводу ст.ст. 5.9, 5.10 на с. 478, 481). Например, некоторые металлы способны растворять определенное количество газов (в особенности водорода), причем скорость диффузии, а следовательно, и растворе-

ния увеличивается при повышении температуры. Вследствие этого такие металлы нельзя считать непроницаемыми для газов. Так, например, сильно нагретый палладий довольно легко пропускает сквозь себя водород [12, 34, 136, 213].

4.55. ЧТО МОЖЕТ ЛИМОНАД?

Явление растворения газов в жидкостях, описанное в предыдущей статье, широко используется в пищевой промышленности, например, при газировании минеральных вод, лимонадов и т. д. В качестве газа, как правило, используется углекислый газ. При газировании вода приводится в длительное соприкосновение с углекислым газом, имеющим большое давление, поэтому он растворяется в воде в большом количестве. Когда емкость (бутылку) с газировкой открывают и наливают в стакан, то вследствие уменьшения давления газ выделяется обильными пузырьками.

На этом явлении основан эффектный и зрелищный опыт, который вы легко можете продемонстрировать за праздничным столом. Налейте в бокал шипящего лимонада (или шампанского) и бросьте в него одну виноградину. Так как вес виноградины больше, чем выталкивающая архимедова сила, то она тотчас же опустится на дно бокала. На дне на виноградине немедленно начнут оседать маленькие пузырьки газа, выделяющиеся из лимонада. Вскоре их станет так много, что виноградина начнет шевелиться, а затем — всплывет наверх (**флотация**, см. ст. 4.51). На поверхности жидкости пузырьки газа лопаются и улетучиваются в воздух. Но без пузырьков газа вес виноградины опять становится больше, чем действующая на нее выталкивающая сила, и она снова погружается на дно бокала. Тогда все повторяется сначала, и виноградина опускается и поднимается в бокале много раз [86, 119, 138].

4.56. ПОЛУЧЕНИЕ УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА

Получение углекислого газа в домашних условиях не представляет трудностей. Для этого вам надо иметь немного пищевой соды и уксуса.

Установка состоит из бутылки с пробкой и трубочек от кока-колы. В пробке надо проделать сквозное отверстие с таким диаметром, чтобы трубочка плотно насаживалась в нее. Если трубочка коротковата, к ней можно присоединить другую, сделав в конце трубочки продольный надрез (чтобы получилось плотное соединение).

В бутылку насыпьте половину столовой ложки пищевой соды и на четверть бутылки уксуса. Затем быстро воткните пробку в бутылку — генератор углекислого газа готов. Для того, чтобы видеть, что через трубку действительно выделяется газ, конец трубки можно опустить в подкрашенную жидкость.

Кстати, если вы конец трубки подведете сверху к горящей свече, то свеча через некоторое время потухнет. Связано это с тем, что углекислый газ тяжелее воздуха, поэтому, обволакивая пламя, он перекрывает доступ кислорода для горения. На этом основана работа углекислотных огнетушителей.

Для получения газированной воды в домашних условиях эта методика вряд ли годится (для растворения газа в жидкости нужно высокое давление). Тем не менее, вы можете сделать газированный лимонад, если в качестве химических реагентов возьмете пищевую соду и лимонный сок (в нем есть лимонная кислота, реагирующая с содой). В сок просто добавьте щепотку соды и, после того как произойдет реакция (с бурным выделением пузырьков), пейте приятный прохладительный напиток.

И вообще, в домашних условиях есть много веществ, которые можно смешивать для получения углекислого газа:

1) вещества, содержащие кислоты: уксус, лимонный сок, сок грейпфрута, кока-кола, кислое молоко;

2) вещества, содержащие карбонаты: пищевая сода, мел, толченая яичная скорлупа, кальцинированная сода для стирки.

Можно взять любое вещество из первого списка и смешать с любым веществом из второго — в результате всегда выделяется углекислый газ [119].

4.57. НЕ ЩЕЛКАЙТЕ СУСТАВАМИ!

В наш нервный век довольно широко распространена привычка в минуты волнения «щелкать костяшками» пальцев.

Очень долго не было известно, отчего возникает хрустящий звук при растягивании суставов. Многие считали, что это щелкают кости. Однако после подробного исследования оказалось, что причиной возникновения этих хрустящих звуков является образование газовых пузырьков в жидкости межсуставного пространства (суставной сумки) при резком понижении внешнего давления.

При растяжении сустава увеличивается объем суставной сумки, давление в ней соответственно падает и в жидкой смазке выделяется большое количество пузырьков газа. Образующиеся пузырьки сливаются с более крупными и при дальнейшем понижении давления с треском лопаются. Когда кости возвращаются в нормальное положение и давление жидкости восстанавливается, газ постепенно поглощается жидкостью. Это происходит примерно в течение пятнадцати минут. Спустя этот интервал суставом опять можно «хрустнуть» [12, 77].

4.58. ГДЕ БОЛЬШЕ КИСЛОРОДА?

Какой воздух богаче кислородом: тот, которым мы дышим, или тот, который растворен в воде и которым дышат рыбы?

Известно, что в атмосферном воздухе, которым мы дышим, кислород составляет по объему 21%. Установлено, что в литре воды растворяется кислорода вдвое больше, чем азота. Это приводит к обогащению растворенного в воде воздуха кислородом: воздух, растворенный в воде, содержит уже 34% кислорода.

Заметим, что углекислый газ обладает еще большей растворимостью: его содержание в атмосфере 0,04%, а в растворенном воздухе — 2% [95, 115].

ТВЕРДЫЕ ТЕЛА

5.1. СТРОЕНИЕ ТВЕРДЫХ ТЕЛ

Достаточно значительное уменьшение кинетической энергии молекул по сравнению с их потенциальной энергией взаимодействия (вследствие понижения температуры) приводит к образованию твердого состояния вещества. В твердом теле молекулы уже не могут перемещаться по объему вещества (как в газах и жидкостях), а могут только колебаться. Из-за того, что молекулы лишены возможности перемещаться по объему тела, наиболее характерной особенностью твердых тел является сохранение ими формы и объема.

Основными видами твердого состояния вещества в природе являются **кристаллическое** и **аморфное**.

Твердые тела в кристаллическом состоянии называются **кристаллами**. В кристаллах в результате сильного взаимодействия молекулы располагаются друг относительно друга в некоторых фиксированных с большой точностью точках. Расположение этих точек определяется **равенством нулю** действующих на молекулы сил, т. е. в точке равновесия суммарная величина всех действующих на молекулу сил равна нулю (это аналогично положению маятника в состоянии равновесия). Вследствие этого молекулы осуществляют лишь небольшие тепловые колебания около точек равновесия. Ясно, что если условия равновесия выполняются для одних молекул в одной области, они должны выполняться и для соседних молекул в примыкающих областях. Это ведет к одинаковому расположению молекул по всему объему кристалла, что, в

свою очередь, означает, что структура кристаллических тел **периодическая**. Такая периодическая структура называется **кристаллической решеткой**, а точки равновесия молекул — **узлами кристаллической решетки**. Формально кристаллическую решетку можно получить многократным повторением в трех различных направлениях **элементарной кристаллической ячейки** — конфигурации из минимального набора молекул, способных без промежутка заполнить весь кристалл. На возможности выделения в кристаллах элементарной кристаллической ячейки определенного типа основана их классификация.

Строгая периодичность в расположении молекул в кристаллах подтверждается непосредственными наблюдениями структуры вещества в электронные микроскопы и рентгенографическими исследованиями. Следствием существования у кристаллов периодической структуры является наличие у них **анизотропии** — зависимости их физических свойств (механических, оптических, электрических, тепловых и др.) от направления в них. Причиной анизотропии является различная упорядоченность молекул по различным направлениям кристалла. Другим следствием упорядоченности расположения молекул в кристаллах является правильная их внешняя огранка, которая для данного кристалла всегда постоянна.

Однако обычно мы не наблюдаем анизотропии и правильной внешней огранки кристаллических тел из-за того, что в естественных условиях посторонние факторы мешают образованию больших кристаллических решеток. Поэтому наблюдаемые в жизни твердые тела — это **поликристаллы**, представляющие из себя большую совокупность беспорядочно расположенных маленьких **монокристаллов**. В лабораторных условиях искусственным путем с помощью специальных условий можно вырастить монокристаллы значительной величины (см., например, ст. 5.22 на с. 498). У некоторых химических соединений монокристаллы образуются и в природных условиях, например, кристаллы кварца SiO_2 , алмаза C , рубина Al_2O_3 , поваренной соли NaCl и т. д.

В **аморфных твердых телах** отсутствует периодическая структура. Из-за этого их можно представить как сильно

охлажденные жидкости, имеющие очень большую вязкость. Типичными представителями аморфных тел являются стекло, пластик, воск и т. д. Так как аморфные тела не имеют периодической структуры, то большая часть молекул в них колеблется не около положений равновесия, т. е. их положения определяются не условиями равновесия (**не равенством нулю действующих сил**). Поэтому из-за постоянно действующих на молекулы сил в течение достаточно долгого времени молекулы могут переместиться в положение равновесия и образовать кристаллическую решетку. Например, стекло в течение примерно 300 лет полностью кристаллизуется.

Те вещества, которые в обычных условиях встречаются нам в поликристаллическом состоянии (например, металлы), тоже можно превратить в аморфные. Для этого их надо расплавить, а потом очень быстро охладить (со скоростью порядка миллиона градусов в секунду). В этом случае молекулы вещества не успевают образовать кристаллическую структуру и сохраняют взаимное расположение, характерное для жидкостей, даже при комнатных температурах. Такие аморфные твердые металлы называются **металлическими стеклами** (см. ст. 5.32 на с. 517).

Из-за того, что аморфные тела представляются как сильно охлажденные жидкости, создание их теории так же трудно, как и создание теории жидкостей. И наоборот, высокая степень упорядоченности молекул в кристаллах позволило относительно легко создать их математическую модель [47, 53, 126, 167, 168].

5.2. МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КРИСТАЛЛОВ

Фиксированность атомов в узлах кристаллической решетки обуславливает особые прочностные характеристики кристаллов.

Всякое изменение формы или размеров твердого тела под действием внешней силы называется **деформацией** тела. При деформации молекулы, образующие кристаллическую решетку, смещаются от состояния равновесия. Такое смещение мо-

лекул вызывает появление сил, стремящихся возратить молекулы в прежнее положение равновесия, что на макроуровне проявляется как появление **упругих сил**. Межмолекулярные силы в твердом теле весьма значительны и для получения деформации иногда нужно приложить значительную внешнюю силу.

Если внешние силы, вызывающие деформацию, таковы, что после прекращения действия этих сил тело полностью восстанавливает свою форму и размеры, то такая деформация называется **упругой**. На молекулярном уровне в этом случае происходит лишь незначительное смещение молекул от положений равновесия, так что после прекращения внешней силы молекулы возвращаются на свои места.

При дальнейшем увеличении внешней силы наступает такой момент, когда после прекращения действия внешних сил в теле остается остаточная деформация (т. е. тело полностью не восстанавливает первоначальные форму и размеры); в этом случае говорят, что перейден **предел упругости** данного материала. Такая деформация называется **пластической**. На молекулярном уровне это означает, что в этом случае некоторые молекулы отрываются от своих состояний равновесия и перескакивают в новые; после прекращения же действия внешней силы эти молекулы остаются в новых положениях равновесия.

При дальнейшем увеличении внешней силы наступает **состояние текучести**, при котором деформация развивается даже при уменьшении внешней силы; после состояния текучести наступает разрушение материала. На молекулярном уровне это означает, что под действием внешней силы молекулы отдаляются друг от друга настолько далеко, что перестают взаимодействовать между собой. Как правило, процесс разрушения начинается в одной точке и распространяется вдоль некоторой (в общем случае не плоской) поверхности (см. ст. 5.6 на с. 473).

Все разнообразие возможных деформаций твердого тела — растяжение (сжатие), срез, смятие, кручение, изгиб, сдвиг и т. д. — можно свести к комбинации двух элементарных деформаций: растяжения (сжатия) и сдвига.

Деформация растяжения (сжатия) характеризуется тем, что при приложении к телу одноосной растягивающей (сжимающей) внешней силы его линейные размеры увеличиваются (уменьшаются). Как показывают опыт и теоретические выкладки, **при упругой деформации** растяжения (сжатия) выполняется **закон Гука**: относительное удлинение $\varepsilon = \Delta l/l_0$ тела прямо пропорционально внешней силе F и обратно пропорционально поперечному сечению тела S :

$$\frac{\Delta l}{l_0} = \frac{1}{E} \cdot \frac{F}{S} \quad \text{или} \quad \sigma = E\varepsilon. \quad (5.1)$$

Здесь E — так называемый **модуль Юнга** (табличная величина), характеризующий упругие свойства данного тела при растяжении. Величина $\sigma = F/S$ называется **механическим напряжением** и имеет размерность давления (показывает величину деформирующей силы, приходящейся на единицу площади, к которой перпендикулярно приложена эта сила).

Деформация сдвига характеризуется тем, что при приложении к телу касательной силы сторона, к которой приложена эта сила, сдвигается относительно другой стороны тела на некоторую величину Δx . Опять же, как показывают опыт и теория, при упругой деформации сдвига величина смещения Δx , отнесенная к расстоянию между сторонами d , прямо пропорциональна внешней касательной силе F_τ и обратно пропорциональна площади приложения касательной силы S :

$$\frac{\Delta x}{d} = \frac{1}{G} \cdot \frac{F_\tau}{S}.$$

Здесь $1/G$ — коэффициент пропорциональности, в котором G — так называемый **модуль сдвига** (табличная величина), характеризующий упругие свойства тела при сдвиге. Величина $F_\tau/S = \tau$ называется **касательным напряжением** и тоже имеет размерность давления (показывает величину внешней силы, приходящейся на единицу площади, к которой касательно приложена эта сила). Как правило, между модулем сдвига и модулем Юнга имеется приближенное равенство $G \approx 0,3E$ [47, 53, 126].

5.3. ПРОСТЕЙШАЯ ТЕОРИЯ КРИСТАЛЛОВ

Как указывалось в ст. 5.1, высокая степень упорядоченности молекул в кристаллах позволяет относительно легко создавать их математическую модель. В настоящей статье с помощью простейшей физической модели объясняются некоторые наблюдаемые (и измеряемые) свойства кристаллов.

Известно, что взаимодействие между молекулами имеет несимметричный характер: на больших расстояниях между ними преобладают силы притяжения, а на малых — силы отталкивания (см. рис. 4.17 на с. 413). Силы эти — электромагнитной природы, хотя молекулы в целом электрически нейтральны, поэтому они не подчиняются закону Кулона; объяснить их можно только в рамках квантовой механики. Так как между силой взаимодействия f и потенциальной энергией u этого взаимодействия имеется известная из механики связь $f = -du/dr$, то потенциальная энергия взаимодействия двух молекул в зависимости от расстояния между ними имеет вид, показанный на рис. 5.1, где u^* — глубина потенциальной ямы; r^* — расстояние, на котором энергия взаимодействия становится равной нулю. Параметры u^* и r^* являются характеристиками молекул соответствующего вещества; например, для железа можно принять $u^* = 6,68 \cdot 10^{-20}$ Дж, $r^* = 2,06 \cdot 10^{-10}$ м. Нулевой силе взаимодействия между молекулами соответствует минимум их потенциальной энергии, т. е. «дно» потенциальной ямы.

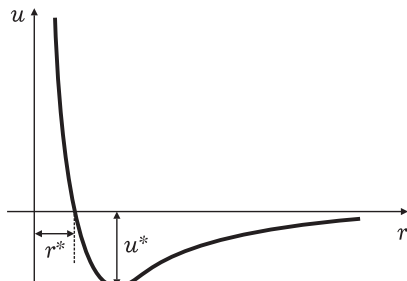


Рис. 5.1

Показанную на рис. 5.1 зависимость $u(r)$ для многих веществ можно описать с помощью так называемого **потенциала Леннард-Джонса** (или, по-другому, **потенциала 6–12**), предложенного в 1924 г. английским физиком и химиком **Д. Э. Леннард-Джонсом** (1894–1954):

$$u(r) = 4u^* \left[\left(\frac{r^*}{r} \right)^{12} - \left(\frac{r^*}{r} \right)^6 \right].$$

При больших значениях r ($r > r^*$) слагаемое $(r^*/r)^{12}$ по сравнению с $(r^*/r)^6$ становится несущественным, поэтому слагаемое $-(r^*/r)^6$ описывает притяжение молекул. И, наоборот, при малых значениях r ($r < r^*$) уменьшается вклад слагаемого $(r^*/r)^6$, поэтому $(r^*/r)^{12}$ — потенциал отталкивания на малых расстояниях. Потенциал отталкивания $(r^*/r)^{12}$, в отличие от потенциала притяжения $-(r^*/r)^6$, не имеет под собой никакого теоретического обоснования, однако он удобен в вычислениях (т.к. $r^{12} = (r^6)^2$), что и оправдывает его применение.

Для наших целей мы представим потенциал Леннард-Джонса в упрощенном виде:

$$u(r) = \frac{a}{r^{12}} - \frac{b}{r^6},$$

где $a = 4u^*(r^*)^{12}$, $b = 4u^*(r^*)^6$ — некоторые положительные константы; для железа они равны $a = 1,56 \cdot 10^{-135}$ Дж·м¹², $b = 2 \cdot 10^{-77}$ Дж·м⁶. Выражение для силы взаимодействия между двумя молекулами будет иметь вид

$$f = -\frac{du}{dr} = \frac{12a}{r^{13}} - \frac{6b}{r^7}. \quad (5.2)$$

Итак, рассмотрим идеальный кристалл с кубической решеткой, образованной одинаковыми молекулами массой m_0 . Для простоты будем учитывать взаимодействие молекулы только с его ближайшими соседями. Такая модель достаточно реалистично передает свойства взаимодействия молекул некоторых веществ и поэтому широко используется в расчетах и при компьютерном моделировании.

Найдем сначала расстояние r_0 между узлами кристаллической решетки из (5.2) при условии $f = 0$:

$$\frac{12a}{r_0^{13}} - \frac{6b}{r_0^7} = 0 \quad \Rightarrow \quad r_0 = \left(\frac{2a}{b}\right)^{\frac{1}{6}}. \quad (5.3)$$

Подставив данные для железа, получим $r_0 = 2,3 \cdot 10^{-10} \text{ м} = 2,3 \text{ \AA}$.

Зная r_0 , можно определить плотность кристалла ρ . Действительно, на одну молекулу в кубической кристаллической решетке приходится объем $V = r_0^3$, следовательно, плотность кристалла равна

$$\rho = \frac{m_0}{V_0} = \frac{m_0}{r_0^3} = m_0 \sqrt{\frac{b}{2a}}.$$

Подставив данные для железа, получим $\rho \approx 7504 \text{ кг/м}^3$, что достаточно близко к экспериментальному значению $\rho_{\text{э}} = 7900 \text{ кг/м}^3$.

Для простоты мы приняли, что взаимодействие молекул происходит только с ближайшими соседями. У молекул в кубической решетке таких соседей $n = 6$. Тогда энергия связи u_0 , приходящаяся на одну молекулу, определяется как суммарная потенциальная энергия взаимодействия данной молекулы с $n = 6$ ближайшими соседями, находящимися от данной молекулы на расстоянии r_0 :

$$u_0 = \frac{1}{2} n u(r_0) = \frac{1}{2} n \left(\frac{a}{r_0^{12}} - \frac{b}{r_0^6} \right) = -\frac{3b^2}{4a},$$

где множитель $1/2$ учитывает тот факт, что $u(r)$ описывает взаимодействие двух молекул, а нам нужна энергия только одной из них. Для перехода из кристаллического в газообразное состояние (т.е. для сублимации) кристаллу нужно сообщить энергию, необходимую для разрыва всех связей. Таким образом, удельная теплота сублимации λ равна

$$\lambda = -\frac{u_0}{m_0} = \frac{3b^2}{4am_0}.$$

Опять же, подставив данные для железа, получим $\lambda = 2,16 \cdot 10^6$ Дж/кг (экспериментальное значение $\lambda_s = 7,05 \cdot 10^6$ Дж/кг).

При отклонении молекул от положения равновесия возникает сила, стремящаяся вернуть молекулы в исходное положение (т. е. на расстояние r_0 друг от друга). При малых деформациях эта сила пропорциональна деформации (закон Гука; см. формулу (5.1) из ст. 5.2). Для ее вычисления преобразуем выражение (5.2) для силы f , подставив в него $r = r_0 + \Delta x$, где Δx — малое отклонение от положения равновесия:

$$\begin{aligned} f &= \frac{12a}{(r_0 + \Delta x)^{13}} - \frac{6b}{(r_0 + \Delta x)^7} = \\ &= \frac{12a}{r_0^{13} \left(1 + \frac{\Delta x}{r_0}\right)^{13}} - \frac{6b}{r_0^7 \left(1 + \frac{\Delta x}{r_0}\right)^7}. \end{aligned}$$

При малых Δx справедливо соотношение

$$\left(1 + \frac{\Delta x}{r_0}\right)^\alpha \approx 1 + \alpha \frac{\Delta x}{r_0},$$

поэтому

$$\begin{aligned} f &\approx \frac{12a}{r_0^{13}} \left(1 - 13 \frac{\Delta x}{r_0}\right) - \frac{6b}{r_0^7} \left(1 - 7 \frac{\Delta x}{r_0}\right) = \\ &= \left(\frac{12a}{r_0^{13}} - \frac{6b}{r_0^7}\right) - \left(13 \frac{12a}{r_0^{13}} - 7 \frac{6b}{r_0^7}\right) \frac{\Delta x}{r_0}. \end{aligned}$$

Выражение в первой скобке равно нулю, а $12a/r_0^{13} = 6b/r_0^7$ (см. формулу (5.3)). Тогда

$$f = -\frac{36b}{r_0^7} \cdot \frac{\Delta x}{r_0} = -\frac{36b}{r_0^7} \varepsilon,$$

где $\varepsilon = \Delta x/r_0$ — относительное удлинение. В поперечном сечении кристалла на одну молекулу приходится площадь $S_0 = r_0^2$, следовательно, механическое напряжение σ в кристалле определяется формулой

$$\sigma = \frac{f}{r_0^2} = \frac{36b}{r_0^9} \varepsilon = \frac{18}{\sqrt{2}} b \left(\frac{b}{a} \right)^{\frac{3}{2}} \varepsilon.$$

Сравнивая с законом Гука $\sigma = E\varepsilon$, получим выражение для модуля Юнга:

$$E = \frac{18}{\sqrt{2}} b \left(\frac{b}{a} \right)^{\frac{3}{2}}.$$

Подставляя значения для железа, получим $E = 3,89 \cdot 10^{11}$ Па (экспериментальное значение $E_3 = 2,11 \cdot 10^{11}$ Па).

Как видно из полученных данных для железа, предложенная простейшая модель дает не очень точные значения для наблюдаемых физических свойств. Связано это с тем, что применение потенциала Леннард-Джонса справедливо только для ограниченного круга веществ (в основном — в газообразном и жидком состояниях). Тем не менее, эта модель вполне годится для качественного объяснения физических явлений во многих кристаллах [117, 126].

5.4. УПРУГОЕ СТОЛКНОВЕНИЕ ТВЕРДЫХ ТЕЛ

Многие задачи механики, где рассматриваются столкновения тел, решаются в предположении об абсолютно упругом характере этих соударений. При этом предполагается, что время такого удара равно нулю. В большинстве случаев это дает правильное решение задач механики. Тем не менее, надо понимать, что это всего лишь приближение (идеализация) — на самом деле любое реальное соударение твердых тел конечно во времени. В самом деле, если бы изменение импульсов тел при столкновении происходило мгновенно, то из второго закона Ньютона $F = \Delta p / \Delta t$ следует, что сила взаимодействия тел при ударе была бы бесконечно большой, чего, естественно, не может быть.

Оценим время упругого соударения твердых тел, рассматривая столкновение стержня в форме параллелепипеда длины L с неподвижной недеформируемой стенкой (рис. 5.2).

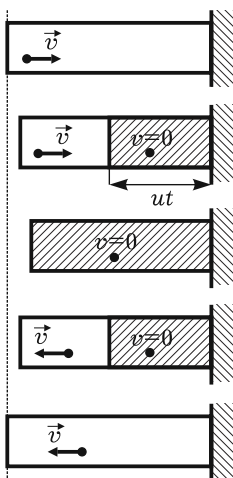


Рис. 5.2

Столкновение вызовет деформацию стержня и молекулы, образующие кристаллическую решетку стержня, начнут смещаться от точки равновесия. Такое смещение вызовет появление сил, стремящихся возратить молекулы в прежнее положение равновесия. Это означает, что в течение первой половины времени столкновения кинетическая энергия стержня как целого будет переходить в потенциальную энергию упругой деформации тела. В течение второй половины происходит обратное превращение энергии деформации в кинетическую энергию отскакивающего стержня. Будем предполагать при этом, что никакая часть

энергии не переходит в тепло (это опять же идеализация).

Пусть до столкновения стержень имеет скорость v . При соприкосновении торцевого сечения стержня с недеформируемой стенкой скорости упорядоченного движения лежащих в этом сечении молекул обращаются в нуль. В следующий момент времени останавливаются молекулы, расположенные в соседнем сечении, при этом они будут по инерции смещены относительно положения равновесия, т.е. это сечение будет находиться в деформированном состоянии. Далее останавливается следующее сечение и т.д. — по стержню будет распространяться **волна упругой деформации**. В любой момент времени деформированной оказывается та часть стержня, до которой дошла волна деформации, распространяющаяся по стержню от места контакта со стенкой.

Нетрудно понять, что волна деформации распространяется по стержню со скоростью звука u в ней (аналогично распространению звука в воздухе).

Если считать, что стержень пришел в соприкосновение со стенкой в момент времени $t = 0$, то в произвольный момент времени t длина сжатой части стержня равна $l = ut$ (на рис. 5.2 эта часть стержня заштрихована), причем в этой

части молекулы покоятся, а в несжатой части по-прежнему движутся со скоростью v .

Первый этап столкновения стержня со стенкой закончится в тот момент, когда весь стержень окажется деформированным, а скорости упорядоченного движения всех его молекул обратятся в нуль. В этот момент кинетическая энергия налетающего стержня целиком превращается в потенциальную энергию упругой деформации. Сразу после этого начинается второй этап столкновения, при котором стержень возвращается в недеформированное состояние. Этот процесс начинается у свободного конца стержня и, распространяясь по стержню по-прежнему со скоростью звука u , постепенно приближается к стенке.

Конец второго этапа столкновения наступит в тот момент, когда весь стержень окажется недеформированным, а все молекулы стержня приобретут скорость v упорядоченного движения, направленную противоположно скорости стержня до удара. В этот момент правый конец стержня отделяется от стенки. Ясно, что при отсутствии рассеяния энергии, энергия упругой деформации стержня при этом целиком переходит обратно в его кинетическую энергию.

Из вышеизложенного ясно, что длительность столкновения $\Delta\tau$ равна времени прохождения фронта волны упругой деформации по стержню туда и обратно:

$$\Delta\tau = \frac{2L}{u}. \quad (5.4)$$

Скорость звука u в стержне можно оценить следующим образом. В тот момент, когда стержень окажется полностью деформированным (т. е. закончится первый этап столкновения), длина стержня окажется равной $L_1 = u\Delta t_{\text{сж}}$, где $\Delta t_{\text{сж}}$ — время сжатия стержня (равное половине времени столкновения). Эта длина меньше недеформированной длины стержня L на величину $\Delta L = v\Delta t_{\text{сж}}$, равную расстоянию, пройденному к этому моменту левым концом стержня со скоростью v . Тогда относительное сжатие стержня равно

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} = \frac{v\Delta t_{\text{сж}}}{L_1 + \Delta L} = \frac{v\Delta t_{\text{сж}}}{u\Delta t_{\text{сж}} + v\Delta t_{\text{сж}}} = \frac{v}{u + v}.$$

В реальной жизни в случае упругих соударений мы имеем дело со скоростями v твердых тел, намного меньшими, чем скорости звука u в них. Если бы это было не так, то вместо упругой деформации твердого тела при соударении мы бы наблюдали неупругую, при которой часть механической энергии обязательно перешла бы в тепловую (это мы исключили в самом начале). Исходя из этого, можно считать, что $v \ll u$ и, соответственно,

$$\varepsilon \approx \frac{v}{u}.$$

Это относительное сжатие согласно закону Гука (см. формулу (5.1) в ст. 5.2) равно

$$\frac{v}{u} = \frac{1}{E} \cdot \frac{F}{S}, \quad (5.5)$$

где S — площадь поперечного сечения стержня; F — сила, действующая на стержень со стороны стенки; E — модуль Юнга материала стержня.

Относительная деформация ε одинакова во все моменты времени, пока стержень находится в контакте с преградой (это можно доказать, взяв любую точку на стержне и определив расстояние, которое она пройдет к моменту, когда до нее дойдет волна деформации). Тогда из (5.5) вытекает, что сила F во время соударения тоже постоянна. Для нахождения этой силы воспользуемся вторым законом Ньютона:

$$F = \frac{\Delta p}{\Delta t} = \frac{p - p_1}{\Delta t_{\text{сж}}} = \frac{p - 0}{\Delta t_{\text{сж}}} = \frac{p}{\Delta t_{\text{сж}}},$$

где p и p_1 — импульсы стержня в моменты начала столкновения и окончания этапа сжатия соответственно. Импульс стержня до столкновения равен

$$p = mv = \rho V v = \rho S L v \approx \rho S L_1 v = \rho S u \Delta t_{\text{сж}} v.$$

Тогда $F = \rho S u v$. Подставляя найденное значение силы в (5.5), для скорости распространения звука (волны упругой деформации) получим

$$u = \sqrt{\frac{E}{\rho}}.$$

У стали, к примеру, $E = 2,11 \cdot 10^{11}$ Па, $\rho = 7900$ кг/м³, поэтому скорость звука в ней равна $u \approx 5000$ м/с. Это значение, как и предполагалось ранее, намного превышает значения скоростей, с которыми мы обычно имеем дело на практике.

С учетом выражения для u формула (5.4) для времени столкновения стержня со стенкой принимает вид

$$\Delta\tau = 2L\sqrt{\frac{\rho}{E}}. \quad (5.6)$$

Для практических случаев время упругого столкновения обычно очень мало. Например, для стального стержня длиной 28 см вычисление по формуле (5.6) дает всего-то $\Delta\tau \approx 10^{-4}$ с. Это и позволяет нам во многих случаях при решении механических задач считать соударения мгновенными.

Из (5.6) следует, что время столкновения стержня с неподвижной преградой не зависит от скорости стержня. Этот результат, однако, не является универсальным, а связан со специфической формой рассматриваемого тела — в виде параллелепипеда. Например, для упругого шара время столкновения со стенкой зависит от его скорости. Связано это с тем, что и площадь соприкосновения деформированного шара со стенкой, и действующая на шар сила в процессе столкновения не остаются постоянными.

Кроме того, надо понимать, что формула (5.6) справедлива только при относительно малых скоростях стержня. При больших скоростях сила в момент соударения может превзойти предел упругости материала стержня, что приведет к его неупругой деформации. Например, для стали максимальной скоростью, при которой еще справедливо выражение (5.6), является значение порядка всего-то 10 м/с (это соответствует свободному падению стального стержня с высоты около 5 м).

В конце заметим, что время столкновения $\Delta\tau$ можно было найти и иначе, воспользовавшись законом сохранения энергии [20].

5.5. КАК ИЗМЕРЯЮТ ТВЕРДОСТЬ ТЕЛ

Для данного твердого тела **твердость** как его характеристика не является физической постоянной (как, например, модуль Юнга или модуль сдвига), а представляет собой сложное свойство, зависящее как от прочности и пластичности материала, так и от метода измерения. Проявляется твердость материала в его сопротивлении **вдавливанию** или **царапанию**.

Для измерения **твердости металлов** чаще всего пользуются **методом вдавливания**. При этом величина твердости равна нагрузке, отнесенной к поверхности отпечатка, или обратно пропорциональна глубине отпечатка при некоторой фиксированной нагрузке. Отпечаток обычно производят шариком из закаленной стали (методы Бринелля, Роквелла), алмазным конусом (метод Роквелла) или алмазной пирамидой (метод Виккерса). Реже пользуются **динамическими методами измерения**, в которых мерой твердости является или высота отскакивания стального шарика от поверхности изучаемого металла (метод Шора), или время затухания колебания маятника, опорой которого является исследуемый металл (метод Кузнецова—Герберта—Ребиндера). Получил распространение также **метод измерения твердости с помощью ультразвуковых колебаний**, в основе которого лежит измерение реакции колебательной системы (изменения ее собственной частоты) на твердость испытываемого металла. Выбор метода определения твердости зависит от исследуемого материала, размеров и формы образца или изделия и других факторов.

В минералогии твердость оценивают по **шкале Мооса**, при этом используют 10 эталонов твердости: тальк — 1, гипс — 2, кальцит — 3, флюорит — 4, апатит — 5, ортоклаз — 6, кварц — 7, топаз — 8, корунд — 9, алмаз — 10. Относительная твердость определяется путем царапания поверхности испытываемого объекта эталоном шкалы. Например, если эталон с твердостью 5 царапает исследуемый образец, а последний оставляет след на поверхности эталона с твердостью 4, то твердость минерала приблизительно равна 4,5.

Алмаз — одно из самых твердых веществ, встречающихся в природе (десять баллов по шкале твердости Мооса). Он

является одной из кристаллических модификаций (фазой) чистого углерода (см. ст. 5.39 на с. 531). Другая модификация углерода — графит (из которого делают грифели для карандашей). Графит, в отличие от алмаза, является одним из наиболее мягких веществ с твердостью всего 1,5 по шкале Мооса, т. е. чуть тверже, чем самое мягкое вещество по той же шкале — тальк.

Из искусственных материалов самым твердым является синтезированный немецкими учеными в 2005 г. нанотехнологический материал под именем ACNR. Он настолько твердый, что без труда царапает даже алмаз [62, 148, 149].

5.6. СТЕКЛО И НОЖНИЦЫ

Все знают, что стекло является достаточно хрупким материалом и потому его разрезание требует большого мастерства. Как правило, для резания пользуются стеклорезом. Поэтому вы, вероятно, удивитесь, узнав, что стекло можно разрезать обыкновенными ножницами, если погрузить его в воду, но это действительно так (проверка этого утверждения без защитных очков и перчаток опасна!). Что же происходит со стеклом в воде?

Начать надо с того, что разрезание стекла фактически означает его разрушение, причем — **хрупкое разрушение** (в отличие от **упруговязкого**). Первая теория разрушения твердых тел была создана в 1915 г. немецким физиком **М. Борном** (1882–1970) в рамках общей теории кристаллов. Эта теория хорошо объясняла большое количество оптических, электрических и других свойств кристаллических тел, но объяснение механических свойств находилось в резком противоречии с опытом. В частности, в экспериментах усилия для разрушения кристаллов были во много сотен раз меньше того значения, которое предсказывалось теорией Борна.

Решение проблемы было найдено в 1924 г. выдающимся русским физиком **А. Ф. Иоффе** (1880–1960). Если исходным положением теории Борна для объяснения разрушения кристаллов являлась одновременность разрушения связей между молекулами на линии разрыва, то А. Ф. Иоффе предположил,

что в действительности связи разрушаются не одновременно, а последовательно, одна за другой: сначала возникают трещины на поверхности кристалла, затем они постепенно растут и распространяются внутрь. Чтобы подтвердить свое предположение, А. Ф. Иоффе предложил простой опыт. Кристалл поваренной соли подвергали растяжению и измеряли механическое напряжение, при котором происходило его разрушение. Затем кристалл соли погружали в теплую воду. Вода постепенно растворяла соль, поверхность его становилась гладкой, трещины исчезали. После этого кристалл вытаскивали из воды и опять измеряли напряжение, при котором происходило его разрушение. Оказалось, что во втором случае величина напряжения для разрушения кристалла увеличивалась почти в 350 раз. Такое явление повышения прочности кристаллов при сглаживании их поверхности с тех пор называется **эффектом Иоффе**.

Таким образом, при хрупком разрушении очень важным оказывается вопрос о том, как ведут себя трещины, поскольку именно их распространение и приводит к разрушению образца. Основоположником теории распространения трещин при хрупком разрушении был американский инженер **А. А. Гриффитс** (1893–1963), начавший свои исследования в 20-х годах XX в. практически параллельно с А. Ф. Иоффе (но независимо от него).

В основе созданной Гриффитсом теории лежат две фундаментальные идеи. Первая — это догадка Гриффитса о том, что разрушение тела есть следствие поглощения этим телом энергии. Действительно, к чему приводит распространение трещин? К возникновению новых границ, т. е. возрастанию площади поверхности тела. Это означает, что у тела увеличивается поверхностная энергия, т. к. увеличивается доля молекул, обладающих дополнительной потенциальной энергией (см. ст. 4.27 на с. 413). Откуда же берется эта энергия в том месте, где образуется трещина? Ответ может быть только один: на развитие трещины тратится энергия упругой деформации, создаваемой внешней силой, т. е. энергия, выделяющаяся при разрыве упругих связей между молекулами. Вторая идея Гриффитса состояла в предположении о том, что в ре-

альном твердом теле на его поверхности и по всему объему всегда имеются микроскопические трещины — своеобразные зародыши будущих больших трещин. Пока твердое тело находится в ненапряженном состоянии, эти трещинки никак себя не проявляют. Если же к телу приложена внешняя сила, то при определенных ее значениях могут возникнуть благоприятные условия для роста трещин.

Действительно, пусть в твердом теле возникла трещина размером порядка Δl . Тогда количество высвобождающейся энергии упругой деформации пропорционально Δl^3 , а площадь вновь образовавшейся поверхности пропорциональна Δl^2 . Если величина энергии упругой деформации в единице объема тела равна ε , то из области объемом Δl^3 выделится энергия $\varepsilon \Delta l^3$. С другой стороны, если для образования единицы площади поверхности тела нужна энергия σ (это есть коэффициент поверхностного натяжения; см. ст. 4.27 на с. 413), то на образование трещины потребуется дополнительная энергия $\sigma \Delta l^2$. Спрашивается, когда условия для развития трещины будут благоприятными? Очевидно, тогда, когда с ростом трещины выделяется упругой энергии больше, чем нужно затратить на увеличение площади поверхности:

$$\varepsilon \Delta l^3 > \sigma \Delta l^2 \quad \text{или} \quad \Delta l > \frac{\sigma}{\varepsilon}. \quad (5.7)$$

Итак, если трещина достаточно велика (больше σ/ε), расти дальше ей энергетически выгодно, а если трещина мала (меньше σ/ε), то развиваться она не будет. Также понятно, что прочность материала определяется размерами самых крупных имеющихся в нем микротрещин. Если же по каким-то причинам в твердом теле трещины отсутствуют, то прочность материала находится в хорошем согласии с теорией Борна и с опытами Иоффе.

Возвращаясь к опыту по разрезанию стекла под водой, отметим, что в выражении (5.7) величина ε определяется деформирующей внешней силой. Если мы не можем резать стекло в воздухе с помощью ножниц, то это означает, что коэффициент поверхностного натяжения σ на границе с воздухом у стекла настолько большой, что даже при значительных

внешних усилиях отношение σ/ε не снижается до значений размеров имеющихся в стекле микротрещин. Однако на границе с водой коэффициент поверхностного натяжения стекла резко уменьшается (см. ст. 4.27 на с.413; если говорить упрощенно, то молекулы воды внедряются между молекулами стекла и значительно ослабляют силу взаимодействия между ними).

Таким образом, в воздухе трещине образовываться энергетически не выгодно, а в воде — выгодно. Именно это в описанном опыте и наблюдается [13, 133, 149, 151, 159, 192].

5.7. САМЫЕ ЛЕГКИЕ МЕТАЛЛЫ

Когда заходит речь о легком металле, называют обычно алюминий, плотность которого $2,7 \text{ г/см}^3$, т.е. всего лишь в 2,7 раза тяжелее воды. Однако он занимает далеко не первое место в ряду легких металлов: существуют несколько металлов, которые значительно легче его: бериллий — $1,9 \text{ г/см}^3$, магний — $1,7 \text{ г/см}^3$, натрий — $0,97 \text{ г/см}^3$, калий — $0,86 \text{ г/см}^3$, литий — $0,53 \text{ г/см}^3$. Как видно, последние три металла (натрий, калий, литий) даже легче воды.

Рекорд легкости за литием (плотность $0,53 \text{ г/см}^3$) — металлом, который легче многих пород дерева и плавает даже в керосине (плотность керосина $0,8 \text{ г/см}^3$), погружаясь лишь до половины. Он в сорок раз легче самого тяжелого металла — осмия. Химически литий очень активен, вступает во взаимодействие и с водой, и с воздухом. Если кусочек лития оставить в стеклянном сосуде с плотной притертой пробкой, то металл поглотит весь имеющийся там воздух и в сосуде возникнет разрежение, так что атмосферное давление так крепко «припечатает» пробку, что вряд ли удастся ее вытащить. Поэтому хранить литий очень не просто. Если натрий, например, можно легко упрятать в керосин или бензин, то для лития такой способ неприемлем — он тут же всплывает и загорается. Для хранения лития обычно его вдавливают в ванну с вазелином или парафином, которые обволакивают металл и не позволяют ему проявлять свои реакционные наклонности.

Из вышесказанного видно, что в чистом виде применять литий в качестве конструкционного материала невозможно. А вот в сплавах, например, с алюминием, он неактивен.

Из сплавов, применяемых в современной промышленности, выделяются своей легкостью следующие:

- дюралюминий и кольчугалюминий — сплавы алюминия с небольшим количеством меди и магния. При плотности $2,6 \text{ г/см}^3$ они вдвое легче железа, будучи прочнее его в полтора раза;

- дюрбериллий — сплав бериллия с медью и никелем; он легче дюралюминия на 25% и прочнее его на 40%;

- электрон (не путать с элементарной частицей!) — сплав магния, алюминия и др. металлов; почти не уступая в прочности дюралюминию, электрон легче его на 30% (его плотность $1,84 \text{ г/см}^3$);

- локеллой — сплав из 62% бериллия и 38% алюминия;

- АБМ — это тройные сплавы алюминия, бериллия и магния, в которых, как и в локеллое, бериллий преобладает, а содержание магния по отношению к алюминию колеблется в пределах 6–9%;

- АМЛ — тройные сплавы алюминия, магния и лития, нашедшие применение в авиастроении [25, 95].

5.8. САМЫЕ ТЯЖЕЛЫЕ ВЕЩЕСТВА

В обиходе свинец считается самым тяжелым металлом. Он тяжелее цинка, олова, железа, меди, но все же его нельзя назвать самым тяжелым металлом. Ртуть (жидкий металл) тяжелее свинца: если бросить в ртуть кусок свинца, он не тонет в ней, а будет держаться на поверхности. Литровую бутылку ртути вы с трудом поднимете одной рукой: она будет весить без малого 14 кг. Однако и ртуть не самый тяжелый металл: золото и платина тяжелее ртути раза в полтора. Рекорд же тяжеловесности побивают редкие металлы иридий и осмий: они почти вдвое тяжелее железа. Эти очень редкие и очень твердые металлы были открыты в 1803 г. английским химиком **С. Теннантом** (1761–1815). В настоящее время в мире ежегодно производится менее 100 кг осмия, а иридия — еще

меньше. Кстати, ангидрид осмия (четыреокись осмия) активно используется при снятии отпечатков пальцев, поскольку его пары вступают в реакцию даже с мельчайшими следами жира, оставляемыми пальцами, и образуют черные отложения.

Итак, можно следующим образом ранжировать металлы по степени их тяжести (т. е. по их плотности): цинк — 7,1 г/см³, олово — 7,3, железо — 7,8, медь — 8,9, свинец — 11,3, ртуть — 13,6, золото — 19,3, платина — 21,5, иридий — 22,4, осмий — 22,6 г/см³.

Однако и эти металлы оказываются ничтожно плотными по сравнению с веществом нейтронных звезд (см. ст. 3.1 на с. 269): в 1 см³ нейтронной звезды заключается около 10¹⁵ г массы (сравните 22,6 для осмия и 1 000 000 000 000 000 для нейтронной звезды!). Мельчайшая дробинка из такого вещества (например, охотничья дробь № 12 диаметром 1,25 мм) имела бы массу свыше 1 000 000 000 кг, т. е. больше миллиона тонн [95, 97, 148, 168].

5.9. ДИФФУЗИЯ В ТВЕРДЫХ ТЕЛАХ

В 1896 г. английский металлург **В. Робертс-Аустен** (1843–1902) проделал такой опыт. Он крепко прижал тонкий золотой диск к отшлифованному торцу цилиндра из чистого свинца, убедился, что контакт достаточно плотный, и поместил металлы на 10 дней в печь при температуре 200 °С. Когда отжиг кончился, оказалось, что металлы разъединить уже невозможно. Тогда экспериментатор разрезал составной цилиндр вдоль оси и, посмотрев его под микроскопом, убедился, что золото и свинец проникли друг в друга — произошло взаимное перемешивание атомов обоих металлов, т. е. диффузия.

Опыт, проведенный В. Робертс-Аустеном, был первым опытом по диффузии в твердых телах. С тех пор диффузия твердых тел широко используется в промышленности. Именно за счет диффузии происходит науглероживание (цементирование) поверхностей стальных деталей, обладающих большой износостойкостью. Диффузия также обеспечивает соединение металлов при сварке, пайке, хромировании, никелировании, при спекании порошков и многих других процессах.

Вообще говоря, диффузия твердых тел, — штука удивительная и таинственная. Как уже указывалось в ст. 5.1 (на с. 458), кристалл — это повторяющаяся совокупность элементарных ячеек, образующая кристаллическую решетку. Основной вид тепловых движений, которые совершают атомы в твердых телах, это колебания около положения равновесия — узла решетки, причем амплитуда этих колебаний много меньше расстояний между узлами. Тогда непонятно, каким образом происходит диффузия атомов. Ведь если атомы только колеблются, то у них нет никаких шансов попасть в соседний узел. Это примерно также, как у человека, постоянно едущего из Москвы в Петербург и обратно, нет шансов попасть во Владивосток.

Объяснение диффузии твердых тел было дано в 1926 г. русским физиком-теоретиком **Я. И. Френкелем** (1894–1952) в статье «О тепловом движении в твердых и жидких телах» (см. также ст. 4.3 на с. 374). Суть его заключается в следующем.

Как известно из опыта, твердые тела имеют способность испаряться, не переходя в жидкое состояние — это так называемое **явление сублимации** (см. п. 5.27 на с. 509). Механизм сублимации заключается в том, что в какой-то момент молекула на поверхности твердого тела может приобрести значительную энергию, достаточную, чтобы оторваться от притяжения других молекул и вырваться за пределы твердого тела. Между тем, никаких принципиальных отличий в характере тепловых движений молекул на поверхности твердого тела и внутри него не существует. Это означает, что если возможен отрыв молекул от поверхности твердого тела, то также возможен их отрыв из положения равновесия внутри тела. Предположим, что какая-нибудь молекула, случайно набравшая избыточную энергию, вырывается из «клетки», образованной ее соседями, и вылетает из исходного положения равновесия в межузловое пространство кристаллической решетки. Переходя из одного межузлового пространства в соседнее, вырвавшаяся молекула может странствовать по всему внутреннему пространству кристалла. На месте же вырванной молекулы остается пустое место — **вакансия** (или **дырка**). В вакансию может перепрыгнуть соседняя молекула, что аналогично перепрыгиванию

вакансии в противоположном направлении. Череда таких перепрыгиваний обуславливает движение вакансии по объему твердого тела. Таким образом, в результате теплового движения некоторые узлы становятся вакантными, а межузловое пространство заполняется сорвавшимися молекулами. Так как явление вырывания молекул из узлов обусловлено тепловой энергией, то количество вырванных молекул и вакансий тем больше, чем выше температура, достигая максимума около температуры плавления.

Не обязательно, чтобы число свободных вакансий в точности равнялось числу вырванных молекул. Может оказаться так, что у поверхности кристалла дополнительной энергии молекулы недостаточно для полного ее отрыва от кристалла. Тогда возможно «неполное» испарение, при котором молекула, вырвавшись из своего окружения, может перейти в «более поверхностное» положение (вероятность такого перехода больше, чем полного отрыва) (рис. 5.3). При этом на исходном месте образуется вакансия, а глубже лежащий атом может занять ее место. Другими словами, вакансия может «опуститься» глубже и продолжить свое странствование по всему объему тела. Таким образом, вакансия может возникнуть и проникнуть внутрь кристалла без одновременного внедрения одного из атомов в межузловое пространство. Такой механизм можно рассматривать как растворение в кристалле окружающей пустоты.

Наличие в кристалле вакансий обеспечивает его молекулам подвижность — возможность перемещаться по всему его объему. Так как повышение температуры способствует внедрению в кристалл (через его поверхность) новых вакансий, то

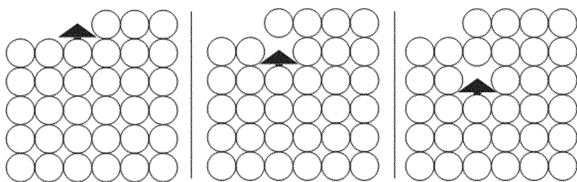


Рис. 5.3

при низких температурах эта подвижность мала, а при высоких — становится значительной. Известно, что около температуры плавления у некоторых кристаллов число вакансий может достигать до 0,01% по отношению к числу молекул.

Таким образом, диффузия в твердых телах возможна из-за подвижности молекул, обеспечиваемой вакансиями. Этот же механизм приводит к растворению газов в твердых телах (см. ст. 4.54 на с. 452, а также следующую статью) [13, 14].

5.10. ГАЗЫ В МЕТАЛЛАХ

В ст. 4.54 (с. 452), а также в предыдущей статье было сказано, что газы могут растворяться и в твердых телах.

Растворимость газообразных веществ в металлах и металлических сплавах зависит от природы газов, природы и состояния металлов и сплавов, а при прочих равных условиях — от температуры и парциального давления газа. Например, известно, что инертные газы растворяются в металлах в неизмеримо малых количествах, а двухатомные газы (водород, кислород, азот и т. д.) — в заметных количествах.

В металлах в отличие от жидкостей растворимость газов, как правило, увеличивается с повышением температуры, но в некоторых случаях — наоборот, уменьшается (например, растворимость водорода в титане, цирконии, ванадии и др. при повышении температуры уменьшается). Установлено, что растворимость газов в металлах не подчиняется закону Генри (см. ст. 4.54 на с. 452) и при данной температуре пропорциональна квадратному корню из парциального давления газа над металлом. Эта зависимость получила название **закона Сиверта**.

Среди газов наибольшей растворимостью в металлах обладает водород в силу своей физической (и химической) уникальности. Водород — самое простое вещество во Вселенной, и в периодической таблице Менделеева он стоит под номером 1. Это означает, что атом водорода состоит из одного протона и одного вращающегося вокруг него электрона. Если водород ионизировать, т. е. оторвать от него электрон, остается только ядро атома — протон, по сути, одна единственная элементарная частица. Размеры атомов металлов очень велики

по сравнению с протоном — примерно в 100 000 раз! Их размеры соотносятся как маковое зернышко с тридцатиэтажным небоскребом. При растворении водорода в металле водородный атом лишается электрона и остается один голый протон, который в силу своей малости легко просеивается через кристаллическую решетку. Из-за этого скорость диффузии водорода в металле имеет огромные значения: водород проходит по слитку металла за секунды такое расстояние, для преодоления которого другим химическим элементам потребуются годы.

Например, в металлургии при производстве стали ее продувают водородом, чтобы лишить вредных примесей — кислорода. Продувку можно произвести двумя способами: или через жидкую сталь во время ее варки, или через раскаленные твердые слитки. В последнем случае водород свободно сквозит через металл.

Представьте себе кубик металла. Как вы думаете, сколько таких же объемов водорода можно растворить в этом кубике? Оказывается, сотни, а при некоторых условиях тысячи объемов водорода можно растворить в одном объеме металла! Это — лабораторно установленный факт, который даже планируется использовать в технике — для производства топливных баков водородных автомобилей.

Водород может не только физически растворяться в металле, но и вступать с ним в химическую реакцию с образованием так называемых гидридов. Например, в 1 кг самого легкого металла лития (см. ст. 5.7 на с. 476) может раствориться и содержаться в виде гидрида лития 2800 л водорода! В годы Второй мировой войны таблетки гидрида лития служили американским летчикам портативными источниками водорода, которыми они пользовались при авариях над морем: под действием воды таблетки моментально разлагались, наполняя водородом спасательные средства — надувные лодки, жилеты, сигнальные шары-антенны. А чрезвычайно высокая способность соединений лития поглощать влагу обусловила их широкое применение для очистки воздуха на подводных лодках, в авиационных респираторах, в системах кондиционирования воздуха [25, 87, 198].

5.11. ГАЗОГИДРАТЫ

Газовые гидраты — это кристаллические соединения, образующиеся при определенных условиях из воды и газа. С практической точки зрения наиболее перспективными для человека являются гидраты природных газов, образующие большие месторождения в земной коре и которые в будущем могут стать важными источниками углеводородного сырья. По некоторым расчетам, запасы углеводородов в газогидратном состоянии в 200 раз больше, чем суммарные запасы каменного угля, нефти и обычного газа на нашей планете.

Внешне газовые гидраты похожи на непрозрачный лед. Они образуются в земной коре, точнее, в ее верхнем слое, из соединений метана, этана, пропана и других газов с водой при высоких давлениях (до 250 атм) и небольших положительных температурах (до 20 °C).

На микроуровне молекулы воды при этом образуют ажурную объемную конструкцию с пустотами, куда внедряются молекулы газа. Самое поразительное, что в одном объеме гидрата может содержаться до 200 объемов газа, хотя при обычных условиях в одном объеме воды возможно растворить не более четырех объемов природного газа. Другое примечательное свойство газогидратов — это **эффект самоконсервации** при отрицательных температурах. Он заключается в том, что если монолитный газогидрат, полученный при высоких давлениях и положительных температурах, охладить до температуры ниже 0 °C и сбросить давление над ним до нормального атмосферного, то после первичного поверхностного разложения газогидрат самоизолируется от окружающей среды тонкой пленкой льда, препятствующей дальнейшему разложению. После этого гидрат может храниться длительное время при атмосферном давлении (зависит от температуры, влажности и других параметров внешней среды).

Проведенные расчеты показали, что благоприятные условия для образования в земной коре твердого газа существуют на 27% суши, в основном в областях распространения вечной мерзлоты и ледников, а также на 9/10 площади дна Мирового океана.

Наиболее экономически выгодным способом добычи газогидратов является непосредственный перевод газа из твердого состояния в свободное в самом месторождении. Такой перевод можно осуществить снижением пластового давления, повышением температуры или вводом в пласт антигидратных жидкостей — растворов солей, спиртов. Но пока разработка месторождений сопряжена со значительными техническими трудностями и дополнительными материальными затратами, ибо контролировать и влиять на давление и температуру пласта весьма сложно.

В 1969 г. первым в мире начали разрабатывать Мессояхское гидратное месторождение на севере Красноярского края (правда, это произошло по чистой случайности). В последние годы в России и мире исследованиями свойств гидратов и разведкой их месторождений занимается большое количество научных организаций.

В 2012 г. Япония начала экспериментальную разработку гидратного месторождения под океанским дном недалеко от полуострова Ацуми. Полномасштабное освоение месторождения планируется начать в 2018 г. после разработки пригодной для промышленного использования технологии добычи [101, 162, 191].

5.12. ОТЖИГ И НАКЛЁП

Металлические заготовки и изделия тонкого сечения часто изготавливают путем штамповки, прокатки или волочения в холодном состоянии.

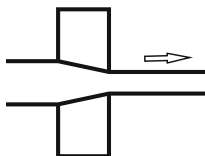


Рис. 5.4

Например, тонкую проволоку получают из толстого металлического прутка путем волочения, многократно пропуская через специальные конические отверстия-глазки (рис. 5.4). После каждого прохождения через волочильный глазок сечение заготовки уменьшается.

Однако тут возникает вопрос: почему несмотря на то, что сила для вытягивания заготовки приложена к тонкой части проволоки, она не рвется, тогда как толстая часть в глаз-

ке деформируется? Ведь, как известно, «где тонко, там и рвется».

Ответить на поставленный вопрос поможет несложный опыт. Возьмите железную или медную проволоку диаметром 1–2 мм и сильно нагрейте ее в печи. После такого отжига проволока станет очень податливой — ее легко деформировать. Однако если перегибать проволоку из стороны в сторону несколько раз, то с каждым разом проволока будет становиться все более неподатливой. Это явление упрочнения материалов под действием нагрузки называется **наклёпом**. Металлы при наклёпе становятся прочными и твердыми, но в то же время — очень хрупкими (поэтому после нескольких перегибаний проволока просто ломается).

Причиной наклёпа при деформации является увеличение количества микроскопических нарушений (**дефектов**, в том числе вакансий) правильной кристаллической решетки, что вызывает появление остаточных внутренних напряжений в металле. Другими словами, это равносильно тому, что металл находится в сжатом упругом (как пружина) состоянии. Поэтому приложенная к металлу внешняя деформирующая сила или ничего не может изменить, или (при достаточной величине) разрушает его.

В зависимости от ситуации наклёп может быть как полезным, так и вредным явлением. Например, в технике наклёп используется для поверхностного упрочнения деталей; для этого производят накатку поверхности деталей роликами или бомбардируют металлической дробью с помощью дробеструйного устройства. Это приводит к повышению усталостной прочности и износостойкости деталей.

Чтобы устранить состояние наклёпа производится отжиг при температуре ниже точки плавления. При высокой температуре увеличивается подвижность молекул и их способность к диффузии (см. ст. 5.9), что способствует снятию внутренних напряжений.

После непродолжительной выдержки изделия при такой температуре (для прогрева по всему сечению) производится медленное охлаждение его на воздухе. В результате такой

термической обработки уменьшаются твердость и прочность металла, но зато повышаются его вязкость и пластичность.

Таким образом, возвращаясь к нашему вопросу, в процессе волочения происходит наклёп, в результате которого проволока, прошедшая волочильный глазок, упрочняется. Если волочение производится многократно, проволоку перед каждым последующим волочением отжигают, чтобы облегчить процесс [70, 205].

5.13. НАКЛЁП С ПОМОЩЬЮ КИПЕНИЯ

В предыдущей статье было сказано, что для упрочнения поверхности металлических деталей их подвергают искусственному наклёпу при помощи накатки поверхности роликами или бомбардировки металлической дробью. Оказывается, однако, что для этих целей годится и обычное кипячение.

Суть процесса такова. Как показали исследования последних лет, когда над какой-то точкой поверхности детали при кипении возникает паровой пузырек, металл в данной области мгновенно отдает тепло пару и охлаждается на несколько градусов. Такие непрерывные перепады температуры, длящиеся сотые или тысячные доли секунды, вызывают термические напряжения в материале, приводящие к сдвигам на атомно-молекулярном уровне, т. е., фактически, вызывающие наклёп поверхности.

В результате на 30–40% возрастает твердость наружного слоя металла, повышается устойчивость к износу деталей машин и механизмов. Эту технологию называли **микротермоциклированием**.

Если же деталь кипятить в особых химических растворах, то можно еще добиться и образования покрытия, способного предохранять металл, например, от образования трещин. Также микротермоциклирование позволяет менять теплопроводность и электрические свойства металлической поверхности [58].

5.14. ТЕПЛОВОЕ РАСШИРЕНИЕ ТВЕРДЫХ ТЕЛ

Повышение температуры у твердых тел означает увеличение энергии колебаний молекул в узлах кристаллической решетки, что ведет к увеличению линейных размеров и объема твердых тел. Объясняется это следующим образом.

Взаимодействие между молекулами имеет несимметричный характер: силы притяжения проявляются на больших расстояниях и слабо зависят от этого расстояния, а силы отталкивания, наоборот, заметны лишь на малых расстояниях и сильно зависят от нее. Такой характер взаимодействия молекул более наглядно можно показать с помощью зависимости $u = u(r)$ их потенциальной энергии от расстояния между ними (рис. 5.5). При некоторой фиксированной температуре и, соответственно, постоянной средней кинетической энергии отрезок AB на графике $u = u(r)$ определяет область колебаний частицы. Хотя положению равновесия соответствует минимум потенциальной энергии взаимодействия молекул, но среднее во времени положение молекулы оказывается смещенной от положения равновесия на некоторое расстояние. При повышении температуры и, соответственно, средней кинетической энергии молекул область колебаний частицы возрастает несимметричным образом и среднее положение молекулы оказывается еще дальше от положения другой молекулы, хотя минимум потенциальной энергии не меняет своего положения. Таким образом, при повышении температуры среднее

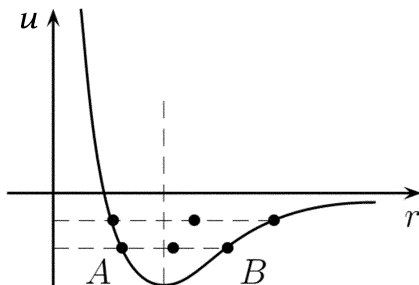


Рис. 5.5

расстояние между двумя соседними молекулами увеличивается и, соответственно, увеличиваются линейные размеры и объем всего кристалла.

Экспериментально обнаружено, что при достаточно высоких температурах ($\gtrsim 0^\circ\text{C}$) относительное изменение линейного размера кристалла прямо пропорционально его температуре:

$$\frac{\Delta l}{l_0} = \alpha t, \quad \text{или} \quad l = l_0(1 + \alpha t),$$

где l_0 — линейный размер кристалла при температуре 0°C ; l — то же самое при температуре t ; α — **температурный коэффициент линейного расширения**, характерный для каждого вещества. Соответственно для объема можно записать

$$\frac{\Delta V}{V_0} = \beta t, \quad \text{или} \quad V = V_0(1 + \beta t),$$

где β — **температурный коэффициент объемного расширения**, тоже характерный для каждого вещества*.

Из твердых тел сильнее всех расширяется аморфный **воск**, превышая в этом отношении многие жидкости. Коэффициент теплового расширения воска в зависимости от сорта лежит в пределах от 0,0003 до 0,0015 K^{-1} , т. е. в 25–120 раз больше, чем у железа (0,000012 K^{-1}). Так как коэффициент расширения ртути 0,00018 K^{-1} , то воск расширяется сильнее ртути (являющаяся в обычных условиях жидкостью).

Наименьшим коэффициентом теплового расширения обладает **кварцевое стекло** — всего лишь 0,0000003 K^{-1} , т. е. в 40 раз меньше, чем у железа. Кварцевую колбу, накалившую до 1000°C (кварцевое стекло плавится при 1625°C), можно смело опускать в ледяную воду, не опасаясь за целостность сосуда: колба не лопается. Малым коэффициентом расширения — хотя и большим, чем у кварцевого стекла, — отличается также алмаз: 0,0000008 K^{-1} .

Из металлов наименьшим коэффициентом теплового расширения обладает сорт стали, носящий название **инвар** (от латинского слова, означающего «неизменный»). Это — сталь,

*Формула для объемного расширения справедлива также и для жидкостей.

содержащая 36% никеля, 0,4% углерода и столько же марганца. Коэффициент расширения инвара $0,0000009 \text{ K}^{-1}$, а некоторых сортов $0,00000015 \text{ K}^{-1}$, т.е. в 80 раз меньше, чем у обыкновенной стали. Есть даже такие сорта инвара, которые в определенном температурном промежутке вовсе не расширяются. Благодаря ничтожному расширению инвар с успехом применяется при изготовлении частей точных механизмов (например, часовых маятников), а также мер длины. Кстати сказать, именно с помощью проволоки из инвара были измерены температурные колебания высоты Эйфелевой башни в Париже (величина этих колебаний доходит до 12 см).

Кстати, вследствие анизотропии кристаллы при нагревании расширяются по различным направлениям неодинаково. Поэтому, например, шар, выточенный из какого-либо монокристалла, при нагревании может изменить не только свой объем, но и форму [92, 95, 98, 118, 126, 138].

5.15. АНОМАЛИИ ТЕПЛООВОГО РАСШИРЕНИЯ

На вопрос, какое твердое тело от охлаждения расширяется, многие, не подумав, отвечают — лед, забывая, что аномальным расширением вода отличается только в жидком состоянии при температуре ниже 4°C (см. ст.3.43, а также рис.3.11 и табл.3.7 на с.343). Лед же при охлаждении не расширяется, а как и большинство тел природы — сжимается.

Существуют, однако, другие твердые тела, которые при охлаждении ниже определенной температуры расширяются. Это, прежде всего, **алмаз**, **закись меди** и **изумруд**. Алмаз начинает расширяться при довольно значительном холоде -42°C , закись же меди и изумруд обнаруживают ту же особенность при умеренном морозе -4°C . Значит, при -42 и -4°C названные тела обладают наибольшей плотностью (как вода при 4°C).

Кристаллическое йодистое серебро (минерал **йодирит**) расширяется от охлаждения даже при обычных температурах. Однако самым интересным твердым телом в этом отношении является обыкновенная **резина**: при обычных температурах

резиновый стержень, растянутый грузом, при нагревании укорачивается [95].

5.16. БЕТОН И ТЕПЛОВОЙ ДОМКРАТ

Ни одна стройка сейчас не может обходиться без **бетона** — искусственного материала, получающегося в результате затвердевания уплотненной смеси вяжущего вещества с водой и заполнителей. В качестве вяжущего вещества можно использовать цемент, силикаты, гипс, асфальт, полимеры (синтетические смолы) и др.; в качестве заполнителей, образующих жесткий скелет бетона, — песок, гравий, щебень. Наиболее распространен цементный бетон, прочность которого увеличивают с помощью стальной арматуры (стержней, спиралей) — в результате получают **железобетон**. При этом сам бетон хорошо сопротивляется сжатию, а стальная арматура внутри него — растягивающим нагрузкам, предохраняя бетон от появления трещин. Коэффициент теплового расширения бетона равен $\alpha = 0,000012 \text{ K}^{-1}$ и совпадает с коэффициентом расширения железа, поэтому при изменениях температуры они расширяются согласованно и не отделяются друг от друга.

Впервые патент на использование железобетона был выдан в 1854 г. английскому штукатуру **В. Уилкинсону**, который стал широко применять железобетон при строительстве перекрытий. До этого бетон использовали только для строительства стен, а несущие конструкции делали из железа. Однако железо на открытом воздухе быстро ржавело, а при пожарах теряло свою прочность уже при температурах выше 500°C , что вело к разрушению перекрытий. Тем не менее открытие Уилкинсона в то время осталось незамеченным. Параллельно с Уилкинсоном опыты с железобетоном проводил во Франции строитель **Куанье**, который построил из него несколько зданий. Однако и его работы остались без внимания.

Больше всех повезло французскому садовнику **Ж. Монье**. Сооружая садовые кадки из цемента и песка, он в 1861 г. совершенно случайно обнаружил, что кадки, обтянутые прово-

локой, а затем опять обмазанные цементным раствором, становятся очень крепкими и долговечными. Будучи человеком решительным и настойчивым, Монье начал экспериментировать с железобетоном и в период с 1861 по 1880 годы получил патенты на использование бетона в самых различных областях строительного дела, в том числе — и в мостостроении.

В 1880 г. немецкий инженер **Вайс** выкупил все патенты Монье, а также провел фундаментальные исследования свойств железобетона. Именно благодаря Вайсу новый материал стал широко известен. С этого времени все несущие конструкции начали делать из железобетона.

Кстати, в Заполярье в качестве строительного материала иногда используют **ледобетон**: так называют лед с включенной в него галькой. Ледобетон настолько прочен, что при работе с ним нередко ломаются даже стальные зубья экскаваторов.

При строительстве объектов, предъявляющих особые требования к прочности, используется **напряженный железобетон**, обладающий повышенными прочностными характеристиками. Для этого арматура до заливки ее бетоном должна быть растянута. Это можно сделать, воспользовавшись зависимостью линейных размеров твердых тел от температуры. При тепловом расширении или сжатии в них развиваются огромные силы — это позволяет использовать их в качестве **тепловых домкратов**.

Принцип действия домкрата очень прост: к растягиваемой арматуре прикладывают стержень из металла с подходящим коэффициентом теплового расширения и нагревают его током от сварочного трансформатора, после чего стержень жестко закрепляют к арматуре. В результате охлаждения и сокращения линейных размеров стержня развивается огромное тянущее усилие, которое растягивает холодную арматуру до необходимой величины.

Чтобы иметь представление об усилиях, возникающих при тепловом сокращении стержня, приведем следующий расчет. Пусть стержень теплового домкрата является железным, имеет поперечное сечение в 2 см^2 и нагревается до 1000°C .

Значит, при нагревании стержень удлиняется на

$$\frac{\Delta l}{l_0} = \alpha t = 0,000012 \cdot 1000 = 0,012$$

своей длины. С другой стороны, согласно закону Гука относительное изменение длины стержня при приложении растягивающей силы равно

$$\frac{\Delta l}{l_0} = \frac{1}{E} \cdot \frac{F}{S},$$

где $E = 210$ ГПа — модуль Юнга для железа. Отсюда следует, что для противодействия тепловому сокращению стержня при его остывании необходимо приложить силу

$$F = \frac{\Delta l}{l_0} ES = 0,012 \cdot 210 \cdot 10^9 \cdot 2 \cdot 10^{-4} \approx 500\,000 \text{ Н},$$

что равносильно действию груза массой свыше 50 т. Значит, такое же усилие развивается при тепловом сокращении стержня.

Так как в тепловом домкрате работают молекулярные силы, он практически не может сломаться [49, 95, 110, 114, 166].

5.17. КРАН И ГОРЯЧАЯ ВОДА

Когда не очень сильно приоткрывают кран с горячей водой, то через некоторое время поток воды постепенно уменьшается и может даже совсем прекратиться. С холодной водой подобных неприятностей не случается. Почему же так плохо ведет себя горячая вода?

В этом виновато тепловое расширение. По мере того как горячая вода нагревает кран, его металлические детали расширяются и перекрывают поток воды. Причем происходит это, когда кран открывают в первый раз, а потом между водой и краном устанавливается тепловое равновесие и в дальнейшем вода уже течет нормально [140].

5.18. ОТВЕРСТИЕ В МЕТАЛЛЕ

Имеется железная пластина при 20°C , имеющая в середине отверстие диаметром 1 мм. Как вы думаете, как сильно

надо нагреть пластину, чтобы отверстие закрылось вследствие теплового расширения?

Отвечая на этот вопрос, некоторые сразу начинают искать значение коэффициента теплового расширения железа и производить вычисления по формуле $l = l_0(1 + \alpha t)$, не подозревая подвоха. Однако не торопитесь! Подумав немного, вы быстро сообразите, что отверстие при нагревании должно увеличиваться в диаметре. Ведь при нагревании однородного тела все его линейные размеры увеличиваются в одном и том же отношении (т. е. получается тело, геометрически подобное первоначальному). Действительно, если вместо реального отверстия вы нарисовали бы на пластине карандашом окружность, то ее диаметр при нагревании увеличивался бы. Поэтому отверстия и полости при нагревании предметов расширяются в той же мере, что и материал, их окружающий. Именно из-за этого, между прочим, вместимость полых сосудов при нагревании увеличивается.

На этом свойстве основана работа **теплового диода** — устройства типа «вилка-розетка», передающего тепло только в одном направлении (рис. 5.6). Действительно, если $T_1 > T_2$, то вследствие теплового расширения левый металлический тепло-резервуар приходит в физический контакт с правым, и тепло начинает распространяться по диоду слева направо. Повышение температуры правого теплорезервуара вроде бы должно привести к увеличению диаметра «розетки» и, таким образом, прерыванию контакта, однако если перепад $T_1 > T_2$ сохраняется, то изменение линейных размеров резервуаров будет происходить в одинаковой мере и физический контакт сохранится. Но как только соотношение температур изменится на противоположное ($T_2 > T_1$), то сразу же нарушится контакт, делая невозможным, таким образом, передачу тепла в обратном направлении.

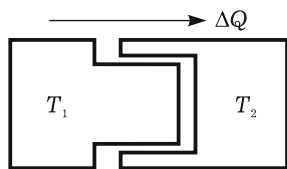


Рис. 5.6

Итак, возвращаясь к нашему вопросу, добиться закрытия отверстия нагреванием невозможно — оно сделается еще

больше. Однако вопрос можно поставить в противоположном направлении: нельзя ли закрыть отверстие путем охлаждения пластины?

Так как коэффициент расширения железа $0,000012 \text{ K}^{-1}$, а наибольшее охлаждение теоретически равно $-273,15^\circ\text{C}$ (т. е. 0 K), то ясно, что относительное изменение диаметра отверстия не может превышать $\Delta l/l_0 = 0,000012 \cdot (-273,15) \approx -0,003$. Другими словами, уменьшение диаметра отверстия в случае нашей задачи по абсолютной величине составит всего $0,003 \text{ мм}$. Значит, никаким изменением температуры нельзя достичь того, чтобы отверстие в твердом теле, даже самое маленькое, закрылось.

Необходимо, однако, иметь в виду, что для получения нашей последней оценки мы применили формулу линейного расширения твердых тел, которая перестает быть справедливой при таких низких температурах. Тем не менее для грубой оценки эта формула вполне годится — это можно понять, если проанализировать рис. 5.5 на с. 487 [49, 77, 95, 96, 147].

5.19. ДЛИНА ЖЕЛЕЗНОЙ ДОРОГИ

На вопрос «Когда железная дорога длиннее — летом или зимой?» обычно отвечают, что летом, т.к. вследствие теплового расширения стальные рельсы действительно должны удлиняться. Однако этот ответ не вполне корректный: он был бы правильным, если только железная дорога представляла один сплошной рельсовый путь.

Сделаем небольшой расчет. Для примера возьмем железную дорогу между Москвой и Петербургом, длина которой равна в среднем 640 км . Коэффициент теплового расширения стали равен $0,000012 \text{ K}^{-1}$. В знойные летние дни температура рельса может достигать до 30°C и выше, в зимние же морозы рельсы охлаждаются до -25°C и ниже. Если остановиться на разнице в 55 градусов между летней и зимней температурой, то удлинение рельсов должно составлять

$$\Delta l = l_0 \alpha \Delta t = 640 \cdot 0,000012 \cdot 55 \approx 0,42 \text{ км} = 420 \text{ м}.$$

Однако на такое значение изменяется не сама длина дороги. В действительности любая железная дорога состоит из отдельных рельсов, которые не примыкают друг к другу вплотную — между их стыками оставляются небольшие промежутки. Эти промежутки и составляют запас для свободного удлинения рельсов при нагревании. По железнодорожным нормативам зазор этот должен иметь размер 6 мм при 0 °С. При длине рельсов 8 м для полного закрытия такого зазора нужно повышение температуры рельса до 65 °С. Если бы между рельсами не было зазора, они в жаркую погоду деформировались бы, что могло бы повлечь железнодорожную аварию.

Ответ же на приведенный в начале статьи вопрос должен звучать так: «Летом рельсы железной дороги за счет теплового расширения удлиняются, но общая длина дороги за счет зазоров между рельсами остается неизменной». Вы также можете при этом блеснуть эрудицией, отметив, что суммарная величина рельсовых зазоров между Москвой и Петербургом никак не меньше 420 м (см. выше).

Здесь, однако, необходимо заметить, что в последние годы получают распространение бесстыковые железнодорожные пути, в которых рельсы представляют собой одно целое. Если вы ездили на поезде в Москву, то могли заметить, что ближе к столице вагонные колеса перестают стучать — это произошел переход на бесстыковый рельсовый путь. Почему же рельсы не деформируются в этом случае?

Все дело в том, что рельсы в таких путях жестко (вернее даже сказать, «намертво») соединены со шпалами. Эти соединения мешают рельсам сжиматься и растягиваться по длине как единому целому. Ясно, что при низких и высоких температурах эти рельсы находятся под сильным механическим напряжением (см. ст. 5.16 на с. 490) [92, 147, 125].

5.20. «САМОБЕГЛЫЙ ШАРИК» И «САМОКАЧАЛКА»

На тепловом расширении основано проведение ряда занимательных опытов.

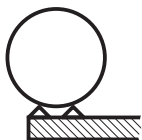


Рис. 5.7

Один из опытов называется «Самобеглый шарик». Устройство экспериментальной установки достаточно просто. На свинцовые кольцевые концентрические «рельсы» треугольного сечения кладется медный или бронзовый шар, диаметр которого в 2–3 раза больше размера колеи (рис. 5.7). Как толь-

ко экспериментатор отпускает шар, поставленный на рельсы, он начинает без всякой видимой причины катиться по рельсам, описывая безостановочно один круг за другим. Если шар остановить, а затем отпустить, то он покатится снова. Этот опыт производит большое впечатление, так как, на первый взгляд, причина движения шарика совершенно непонятна. Однако объяснение здесь очень несложное.

Шарик предварительно нагревают. Теплопроводность свинца сравнительно невелика, поэтому шарик, соприкасаясь с со свинцовыми рельсами, моментально нагревает только небольшой объем свинца в месте контакта. Свинец, расширяясь, образует небольшие бугорки на рельсах, с которых шарик скатывается. Дальше такие бугорки образуются непрерывно вслед за движением шарика и постоянно толкают его дальше. К тому моменту, когда он вернется к исходному месту, рельсы успевают остыть, и образование бугорков на них продолжается. Так шарик будет кататься довольно долго, пока его температура и температура свинцовых колец-рельсов практически выравниваются.

Этот опыт очень наглядно иллюстрирует принцип Карно (см. ст. 2.13 на с. 119): есть разность температур — есть движение; нет разности температур — нет движения (а внутренней тепловой энергии и в шарике, и в рельсах — хоть отбавляй).

На подобном же принципе основан другой опыт, который можно назвать «Самокачалка». Описание опыта было впервые опубликовано в журнале Русского физико-химического общества выдающимся русским ученым, изобретателем радио **А. С. Поповым** (1859–1905). Для опыта берется пластинка металла с хорошей теплопроводностью (алюминий, латунь или цинк). На эту пластинку надо положить тонкий листок

слюды. Из латунной пластинки необходимо изготовить полоску размером примерно 25×100 мм и изогнуть ее дугой. Для проведения опыта латунную дугу надо нагреть и положить на листок слюды. При этом латунная дуга начинает колебаться.

Причина колебаний в том, что от нагретой латунной дуги в точке контакта слюда расширяется и увеличивается в толщине. Это вызывает отклонение латунной дуги в одну из сторон, вследствие чего в соприкосновение с ним приходят новые точки на поверхности слюды, а прежде нагретые участки начинают остывать (остыванию способствует нижняя металлическая пластинка с хорошей теплопроводностью). Дуга наклоняется в одну сторону до тех пор, пока тяжесть не преодолевает образующуюся движущую силу. После этого отклонение латунной дуги продолжится в обратную сторону.

Таким образом, опять наблюдается переход внутренней энергии нагретой дуги в механическую — получается своеобразный тепловой двигатель, работа которого продолжится до тех пор, пока существует перепад температур [8, 19, 38].

5.21. ИСКУССТВО ИЗГОТОВЛЕНИЯ СТЕКЛЯННОЙ ПОСУДЫ

Родиной стекла считается богатый кварцевым песком Египет, где в течение многих столетий изготавливали стеклянные бусы. Греки заимствовали это ремесло у египтян, усовершенствовали его и стали делать стеклянные вазы. Техника выдувания стекла с помощью специальных труб и форм появилась в Сирии в I в. до н.э. и быстро распространилась по всей Римской империи. С тех пор стеклянные изделия — кубки, бокалы — стали намного дешевле и превратились в предметы массового спроса.

Если вы наблюдательный человек, то могли заметить, что стеклянные стаканы и фужеры для холодных напитков часто изготавливают с очень толстым дном. И наоборот, стаканы для горячего чая имеют тонкие стенки и дно. Ради чего делается такое различие?

Стеклянная посуда для холодных напитков (например, кружка для лимонада) делается с толстым дном лишь ради

бóльшей устойчивости или в эстетических целях. Если же налить в них горячий чай, то из-за образующегося градиента температуры возникает неравномерное расширение стекла, что ведет к возникновению больших механических напряжений, и стекло трескается (см. ст. 3.38 на с. 336). Тонкая же стенка прогревается быстрее и в ней быстрее устанавливается равномерная температура и одинаковое расширение. Чем стеклянный сосуд тоньше, тем увереннее можно подвергать его нагреванию. Химики пользуются очень тонкими сосудами и кипятят в них воду прямо на горелке, не тревожась за целостность сосуда.

Кстати сказать, чтобы предохранить толстостенные стаканы от растрескивания при налипании горячего чая опытные хозяйки кладут в них прежде всего чайные ложки. В силу бóльшей теплопроводности металлов тепло от чая в первую очередь передается ложке, и температура чая немного понижается, сглаживая температурный градиент в стекле [92, 96, 114, 147].

5.22. ВЫРАЩИВАНИЕ КРИСТАЛЛОВ

Существуют различные способы выращивания искусственных кристаллов. Часто этот процесс требует высоких температур и давлений (например, при получении искусственных алмазов), но некоторые кристаллы можно выращивать даже в домашних условиях.

В основе большинства способов выращивания кристаллов лежит **использование растворов**. Если в жидкости при постоянной температуре растворять какое-нибудь вещество, то через некоторое время растворение прекращается. Такой раствор называется **насыщенным**, а максимальное количество вещества, которое можно растворить при данной температуре в единице массы жидкости, называется **растворимостью** вещества. Обычно с повышением температуры растворимость увеличивается, поэтому раствор, насыщенный при одной температуре, становится недосыщенным при более высокой температуре. Если же насыщенный раствор охладить, избыток вещества выпадает в осадок. Следовательно, один способ вы-

раствора кристаллов заключается в том, что надо дать насыщенному раствору охладиться. Можно выращивать кристаллы и выпариванием. Ведь если насыщенный раствор испаряется, объем его уменьшается, а количество растворенного вещества остается прежним. Иначе говоря, опять создается избыток вещества, который выпадает в осадок.

Как происходит выделение избытка вещества? Пусть при температуре $t_{\text{нас}}$ имеется насыщенный раствор. Нагреем его до температуры t_1 , большей, чем $t_{\text{нас}}$, при этом раствор станет недосыщенным. Сосуд с получившимся недосыщенным раствором накроем стеклом и дадим раствору спокойно охладиться до температуры t_0 , более низкой, чем температура насыщения $t_{\text{нас}}$. При этом, однако, осадок может и не выпасть, и мы получим **пересыщенный раствор**. Дело в том, что для образования кристаллов необходимо, чтобы в растворе были **центры кристаллизации** — микроскопические кристаллики того же вещества или просто пылинки. Для этого обычно достаточно качнуть сосуд с пересыщенным раствором или снять прикрывающее его стекло, как начнется мгновенная кристаллизация, при этом, как правило, образуется множество мелких кристалликов. Для того, чтобы вырастить крупный кристалл, необходимо ограничить число «затравок». Лучше всего в раствор внести искусственную «затравку», роль которой может исполнять один из естественных или полученных ранее кристалликов.

Для выращивания кристалла прежде всего нужно приготовить чистую посуду. Чтобы уничтожить нежелательные зародыши на стенках, посуду (например, стеклянную банку) необходимо пропарить изнутри (например, держа его над носиком кипящего чайника). Затем необходимо приготовить насыщенный раствор при температуре $t_{\text{нас}}$, эта температура должна быть выше комнатной t_0 . После этого надо нагреть раствор еще немного (до температуры t_1), чтобы раствор стал недосыщенным, накрыть банку стеклом и поставить охладиться. Когда температура раствора приблизится к $t_{\text{нас}}$, можно опустить в банку приготовленную ранее «затравку». Поскольку раствор еще недосыщен, «затравочный» кристаллик начнет растворяться. Но как только раствор охладится до $t_{\text{нас}}$,

растворение кристаллика прекратится, а вскоре начнется его рост. Это будет продолжаться до того момента, пока температура раствора не сравняется с комнатной t_0 . Однако и после этого выращивание кристалла можно продолжить — путем выпаривания. Для этого необходимо приподнять прикрывающее стекло так, чтобы вода испарялась, но пылинки в раствор не попадали. Таким образом рост кристалла можно продолжить еще несколько дней. В эти дни надо стараться банку с раствором не трогать и не передвигать.

Кристаллы получают разными по форме в зависимости от того, бросается «затравка» на дно сосуда или подвешивается на нитке. С помощью нитки можно, например, вырастить «бусы» из кристалликов. Для этого надо «затравить» нитку, т. е. провести ею несколько раз по кристаллу, а затем опустить нитку в раствор.

Самый доступный в домашних условиях опыт — это выращивание кристаллов поваренной соли описанным выше способом, при этом в качестве «затравки» можно использовать естественный кристаллик соли, подвешенный на нитке [88, 176].

5.23. КАК РАСТУТ КРИСТАЛЛЫ

Следствием существования у кристаллов периодической структуры является правильная их внешняя форма (огранка), которая для данного кристалла всегда постоянна. Например, кристаллы поваренной соли всегда имеют форму куба. Почему?

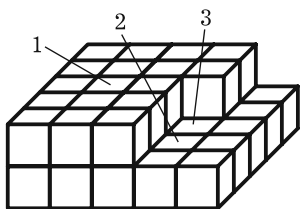


Рис. 5.8

Рассмотрим процесс образования кристаллов в пересыщенном растворе как укладку **элементарных кристаллических ячеек** (см. ст. 5.1 на с. 458) по аналогии с ростом какого-нибудь сооружения из кирпичей. Пусть для простоты кристалл имеет кубическую структуру

(рис. 5.8). Если рассматривать каждый кирпич как элемен-

тарную ячейку кристалла, то возникает вопрос: куда лучше положить следующий кирпич?

Кирпич, положенный в позицию 1, испытывает притяжение только со стороны нижних. Если же его положить в позицию 2, то он будет притягиваться с двух сторон, а если в позицию 3 — с трех сторон. Поэтому молекулам «удобнее устроиться» в позиции 3, чем в 2 и, тем более, в позиции 1. Если же они разместятся в позициях 1 и 2, то из-за тепловых колебаний они с большой вероятностью оторвутся от кристалла обратно в раствор. Поэтому сначала достраивается ряд, потом — вся плоскость, и только потом начинается укладка новой плоскости. Таким образом, кристалл растет слоями: пока один слой не достроен, следующий строиться не начинает.

Процесс роста кристаллов вышеуказанным способом приводит к тому, что для данного вещества углы между гранями кристалла всегда будут одними и теми же, повторяющимися углы элементарной кристаллической ячейки. Это — основной закон кристаллографии: как бы ни был искажен во время роста кристалл, его двугранные углы всегда сохраняют постоянные значения для данного вида кристалла.

Все вышесказанное можно перевести на язык энергии. При рассмотрении жидкостей уже указывалось, что молекулы в поверхностном слое вещества находятся в особых условиях — они обладают дополнительной потенциальной энергией, обусловленной тем, что равнодействующая всех сил, действующих на эти молекулы со стороны других молекул, не равна нулю и направлена в глубь вещества (см. ст. 4.27 на с. 413). Согласно **принципу минимума потенциальной энергии** любая физическая система стремится принять такое состояние, в котором ее потенциальная энергия минимальна. Это приводит к тому, что жидкость стремится сократить свою поверхность — ведь чем меньше поверхность, тем меньше приповерхностных молекул, обладающих дополнительной потенциальной энергией. Стремление жидкостей к сокращению своей поверхности проявляется в возникновении сил поверхностного натяжения, касательных к поверхности.

Аналогична ситуация и в кристаллах. Наименьшее увеличение площади поверхности кристалла и, соответственно,

наименьшее увеличение поверхностной потенциальной энергии получается при размещении элементарной кристаллической ячейки в позицию 3, наибольшее — при размещении в позицию 1. Если каким-либо образом находящийся в растворе кристалл частично разрушить, то он через некоторое время «залечит свои раны» и снова примет свойственную данному веществу форму.

Отметим также, что поверхностное натяжение у кристаллов может также служить мерой их прочности. Например, у NaCl оно равно всего-то 0,15 Н/м, у алмаза же — 11,4 Н/м [9, 156].

5.24. ИСКУССТВО ВЫРАЩИВАНИЯ КРИСТАЛЛОВ

Если вы прочитали предыдущие две статьи и попробовали вырастить кристалл поваренной соли, то можете усложнить свои опыты и вырастить более «драгоценный» кристалл, чем соль, причем разноцветный. Для этого вам понадобятся соответствующие химические реактивы: белые алюмокалиевые квасцы $\text{KAl}(\text{SO}_4)_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ и фиолетовые хромокалиевые квасцы $\text{KCr}(\text{SO}_4)_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$. Оба реактива не являются токсичными и их можно купить в магазинах химических реактивов (например, через Интернет). Кроме того, алюмокалиевые квасцы продаются в аптеках, т.к. обладают ранозаживляющим, противовоспалительным, вяжущим, прижигающим и кровоостанавливающим эффектами. (Хромокалиевые квасцы раньше также продавались в магазинах фотореактивов.)

По методике из ст. 5.22 необходимо приготовить пересыщенные растворы квасцов по отдельности. При этом необходимо иметь в виду, что раствор хромокалиевых квасцов нельзя перегревать — нагревайте воду до температуры не более 45–50°C.

В хромокалиевый раствор, пока он еще не остыл, поместите затравку, лучше всего крупинку того же вещества, подвешенную на ниточке; на ней начнет расти кристаллик хромокалиевых квасцов в виде восьмигранника (октаэдра). Когда он вырастет в несколько миллиметров величиной, выньте

его аккуратно из раствора пинцетом и перенесите в бесцветный раствор алюмокалиевых квасцов. Если вы не запачкали кристаллик, то он как будто и не заметит перемены места жительства — будет продолжать расти, как в своем собственном растворе. В результате фиолетовый многогранник оденется прозрачным слоем. Его можно поместить еще раз в хромокалиевый раствор, а потом опять в алюмокалиевый, и так далее — получится многослойный полосатый кристалл.

Возможность такого выращивания обусловлена тем, что структуры молекул алюмокалиевых и хромокалиевых квасцов очень похожи, что ведет и к практически полной одинаковости геометрических форм и углов между гранями у этих кристаллов. Благодаря такому сходству кристалл хромокалиевых квасцов, попадая в раствор алюмокалиевых квасцов (или наоборот), продолжает расти, как в своем собственном растворе, т. е. молекулы собираются в такую же кристаллическую решетку, только на те места, на которые раньше садились атомы алюминия, теперь садятся атомы хрома. Такое явление в физике обозначается термином **эпитаксия**, обозначающий ориентированное нарастание кристаллов одного вещества на кристаллах другого вещества со сходной структурой.

Явление эпитаксии широко используется для борьбы с градом. Грозовые тучи — это скопления переохлажденных водяных паров или капелек воды (см. ст. 3.11 на с. 294). Вода может долго сохраняться в переохлажденном состоянии и кристаллизация не начнется, пока ее не вызовет какая-нибудь внешняя причина. При грозе такой причиной служит молния: электрический разряд, проскакивающий сквозь переохлажденную среду, возбуждает в ней бурную кристаллизацию. Однако если забросить в облако кристаллики сухого льда (см. ст. 5.27 на с. 509), то они «замораживают» водяной пар (температура сухого льда -78°C), так что вокруг каждой пылинки сухого льда начинает расти кристаллик льда, образуя вместо града снег. Как правило, сухой лед забрасывается в грозовое облако выстрелами из специальных пушек или распыляется с самолетов. Еще лучше кристаллизует тучи не сухой лед, а йодистое серебро или более дешевый йодистый свинец [156, 176, 184].

5.25. ТАКОЙ РАЗНЫЙ ЛЕД

В природе лед — самый распространенный минерал. Чаще он образует агрегатные скопления мелких кристалликов и структуры, возникающие сублимационным путем (т.е. непосредственно из парообразного состояния): снежинки, изморозь, иней и узоры на поверхности. Встречаются и крупные монокристаллы, но гораздо реже. Кристаллическая структура льда похожа на структуру алмаза: каждая молекула H_2O окружена четырьмя ближайшими к ней молекулами, находящимися на одинаковых расстояниях и размещенных в вершинах правильного тетраэдра. Это самый прекрасный из всех минералов — никакие алмазы не могут сравниться с его блеском и красотой.

На нашей Земле наибольшее распространение имеет **обычный лед** (или **лед I**). Есть определенная классификация такого льда на основе его распределения на Земле:

1) **атмосферный лед** — ледяные частицы, взвешенные в атмосфере или выпадающие на земную поверхность (снег и град). Сюда же можно отнести ледяной налет (иней), образующийся на почве и наземных объектах из водяного пара атмосферы при охлаждении земной поверхности до отрицательных температур (более низких, чем температура воздуха);

2) **водный лед**, образующийся на поверхности воды и в ее объеме на различной глубине в холодное время года;

3) **подземный лед**, находящийся в верхних слоях земной коры. Подземные льды чаще всего встречаются в областях распространения многолетней мерзлоты. Причинами образования подземного льда являются: промерзание рыхлых отложений почвы; кристаллизация воды и водяных паров в трещинах, порах и пустотах; перекрытие осадочными породами льда, изначально сформировавшимся на земной поверхности;

4) **ледниковый лед** — монолитный ледяной массив на земной поверхности, образующийся в основном из скоплений снега в результате их уплотнения и структурного преобразования. В природе могут образовываться огромные массивы такого льда — это **ледники** (или **глейзеры**). Под действием давления и земного тяготения ледники могут медленно течь

по наклонной поверхности Земли, при этом лед может растягиваться и ломаться. Течению ледника способствует образование талой воды в ее нижней части (из-за высокого давления и более высокой температуры Земли). Длина большинства ледников не превышает 2 км, но некоторые из них гораздо длиннее. Например, ледник Ватнайекудль в Исландии достигает 100 км в длину.

Можно также классифицировать лед и по внешнему виду, встречающемуся в природе:

1) **игольчатый лед**, образующийся при спокойной воде на поверхности реки. Имеет вид призматических кристаллов с осями, расположенными в горизонтальном направлении, что придает льду слоистое строение;

2) **серо-белый лед** — молодой лед толщиной 15–30 см на поверхности реки. Обычно при сжатиях, происходящих вследствие течения воды, серо-белый лед образует нагромождения, называемые **торосами**;

3) **серый лед** — молодой лед толщиной 10–15 см на поверхности реки. При сжатиях серый лед наслаивается друг на друга;

4) **поверхностный лед** — кристаллический лед, возникающий на поверхности пресных водоемов;

5) **сало** — первичные ледяные образования на водной поверхности при ее замерзании. Состоят из иглообразных и пластинчатых кристаллов в виде пятен или тонкого сплошного слоя серого цвета;

6) **забереги** — полосы льда, окаймляющие берега водоемов, при не замерзшей остальной части водного пространства;

7) **ледяные сталактиты**, называемые в просторечии сосульками. Повсеместно растут на поверхности Земли при перепадах температур около 0°C вследствие медленного замерзания (кристаллизации) стекающей и капающей воды. Встречаются также в ледяных пещерах;

8) **ледяные антолиты**, образующие нитевидные структуры в виде прожилок в пористых грунтах и на их поверхности;

9) **морской лед** — любая форма льда, образовавшаяся в море в результате замерзания морской воды. Характерные свойства — соленость и пористость, которые определяют его

плотность (от 0,85 до 0,93–0,94 г/см³). Из-за малой плотности морские льдины возвышаются над поверхностью воды на 1/7–1/10 своей толщины. Морской лед начинает таять при температуре выше –2,3 °С; он более эластичен и труднее поддается раздроблению на части, чем пресноводный;

10) **паковый лед** — морской лед толщиной не менее 3 м, просуществовавший более 2 годовых циклов нарастания и таяния. В виде обширных ледяных полей наблюдается преимущественно в Арктическом бассейне. Более правильное название — многолетний лед.

Лед широко используется в пищевой промышленности и быту:

1) **пищевой лед** — льдинки в форме кубиков или цилиндров. Производится специальными льдогенераторами или образуется в бытовых холодильниках из воды. Применяется как охлаждающий инградиент для напитков, коктейлей, соков, а также для охлаждения продуктов;

2) **колотый лед** — имеет форму колотых кусков неправильной формы и предназначен для охлаждения продуктов и напитков;

3) **лед Фрапе** (или «Краш айс») — это строганный или мелкодробленный лед. Используется для приготовления коктейлей с фруктами, круассанов, игристых коктейлей «Фрапе», «Мохиито» и других напитков, которые нужно пить через соломинку;

4) **цветной лед**, получающийся при замораживании подслащенных фруктово-ягодных соков. Такие кусочки льда, помимо цвета, имеют приятный фруктовый вкус. Применяется для дизайна, оформления, украшения, охлаждения как напитков, так и продуктов питания. Также используется для декорирования ледовых скульптур (в этом случае для окрашивания льда используются пищевые или синтетические красители);

5) **гранулированный лед** — это крупные градинки диаметром около 1 см. Гранулированный лед имеет идеальную температуру –0,5 °С, не смерзается, легко хранится, легко смешивается с продукцией и плотно обволакивает ее, не имеет острых краев и, соответственно, не портит продукцию. Используется в ресторанах для подачи икры, шампанского или

вина, организации салат-бара или шведского стола, а также для выкладки свежей рыбы в магазинах;

б) чешуйчатый лед — сухой переохлажденный лед с толщиной чешуек 1–2 мм и температурой от -6 до -12°C . Производится в специальных льдогенераторах. Позволяет давать быстрый и интенсивный морозильный эффект за счет низкой температуры льда. Обладает тенденцией к слипанию чешуек при долговременном хранении.

В первой половине XX века американский физик **П. У. Бриджмен** (1882–1961) провел эксперименты, в которых подверг лед давлению до нескольких тысяч атмосфер. В результате он получил еще пять разновидностей льда, обладавших значительно большими, чем у обычного льда, плотностью и температурой таяния. Они могут существовать только при очень высоких давлениях. Обычный лед (**лед I**) сохраняется до давления 208 МПа и под этим давлением он тает при -22°C (см. ст. 3.33 на с. 328). Если давление выше 208 МПа, возникает плотный **лед III**. Он тяжелее воды и тонет в ней. При более низкой температуре и большем давлении — до 300 МПа — образуется еще более плотный **лед II**. Давление сверх 500 МПа превращает лед в **лед V**. Этот лед можно нагреть до 0°C и он не растает, хотя и находится под огромным давлением. При давлении 2 ГПа возникает **лед VI**. Это буквально горячий лед — не плавясь, он выдерживает температуру 80°C . **Лед VII**, полученный при давлении 3 ГПа, пожалуй, можно назвать раскаленным льдом. Это самый плотный и тугоплавкий лед — он выдерживает температуру 190°C . Насчет **льда IV** пока известно только то, что он очень неустойчив и быстро переходит в лед V.

Кроме того, оказалось, что в вакууме при ничтожных давлениях и при температурах ниже -170°C в результате конденсации водяного пара на твердой поверхности может образоваться **стеклянный лед**. Свое название он получил из-за того, что структура его не кристаллическая, а аморфная (как у стекла). За счет более плотной беспорядочной упаковки молекул плотность стеклянного льда $2,3\text{ г/см}^3$. Ученые уверены, что стеклянный лед должен возникать в космических условиях и играть большую роль в физике планет и комет.

Оказывается, что только обычный широко распространенный лед I легче воды — его плотность 917 кг/м^3 . Остальные пять видов льда плотнее воды: лед II — на 22%, лед III — на 3%, лед IV — на 12%, лед V — на 8%, лед VI — на 12%. Значит, из семи известных видов льда только один может плавать на воде, все прочие в ней тонут.

Кстати, чтобы обычный лед I начинал тонуть в воде, необходимо воду нагреть до 150°C . При обычных условиях, конечно же, такой нагрев невозможен — вода превратится в пар еще при 100°C . Однако под повышенным давлением это вполне возможно. Вода при температуре 150°C как раз имеет плотность 917 кг/м^3 , так что лед в ней может находиться в состоянии безразличного равновесия, не опускаясь на дно и не всплывая. При дальнейшем повышении температуры плотность воды еще более уменьшится и лед начнет тонуть [62, 95, 101, 163, 178, 188].

5.26. СУШКА БЕЛЬЯ ЗИМОЙ

Вывешенное на мороз влажное белье через несколько минут замерзает и становится жестким как лист картона или фанеры. Однако через двое-трое суток оно уже совершенно свободно от льда — мягкое, эластичное и практически сухое. Как же такое может быть?

Все дело в том, что лед перешел из твердого состояния непосредственно в пар, минуя плавление. Такое «сухое» испарение называется **сублимацией**, или **возгонкой** (см. ст. 5.9 на с. 478). При любой температуре над поверхностью твердого тела имеются его пары, но, как правило, их концентрация намного меньше, чем в случае паров над жидкостями. Поэтому сублимация льда возможна практически при любой отрицательной температуре, но при одном существенном условии: влажность воздуха должна быть достаточно низкой. На молекулярном уровне это означает нарушение динамического равновесия между льдом и водяным паром, т.е. количество вылетающих из льда молекул воды должно превышать количество залетающих. В противном случае будет происходить обратный процесс — нарост льда на белье.

Сублимация является фазовым переходом I рода, поэтому происходит с поглощением теплоты, причем для некоторых веществ теплота сублимации весьма велика. Этим обусловлено применение сублимации для защиты боеголовок межконтинентальных ракет и возвращаемых на Землю космических аппаратов от аэродинамического нагрева в плотных слоях атмосферы. В этих целях подвергающиеся нагреву поверхности агрегатов покрывают специальными сублимирующими пластинами [62].

5.27. СУХОЙ ЛЕД

Сухим льдом называют замерзший углекислый газ CO_2 . Если жидкую углекислоту, заключенную в баллоне под большим давлением (~ 70 атм), выпускать в воздух, то она испаряется так интенсивно, что ее остаток замерзает, образуя рыхлую снегообразную массу. Спрессованная в плотную массу, она превращается в сплошное тело — это и есть сухой лед. Плотность его более чем в 3 раза превышает плотность обычного льда и составляет 1560 кг/м^3 .

Замечательная особенность сухого льда в том, что при нагревании в обычных условиях он не тает в жидкость, а сразу превращается в газ, минуя жидкое состояние (такое явление называется **сублимацией** или **сухой возгонкой**; см. предыдущую статью). Это представляет большое удобство при использовании сухого льда для охлаждения продуктов: тая, он не смачивает и даже не увлажняет продуктов. Собственно говоря, отсюда и пошло название — «сухой лед».

Другое преимущество сухого льда перед обыкновенным состоит в том, что он холодит гораздо сильнее обыкновенного — раз в пятнадцать. Его удельная теплота сублимации 590 кДж/кг , а удельная теплота плавления обыкновенного льда — всего лишь 330 кДж/кг . Испарение сухого льда, к тому же, крайне медленное. Вагон с фруктами, охлаждаемый сухим льдом, может находиться в дороге по десять дней без смены запаса твердой углекислоты.

Холодящее действие сухого льда, помимо его низкой температуры (-78°C), обусловлено еще и тем, что образующийся

при его сублимации газ также довольно холоден (0°C); обволакивая сухой лед, этот газовый покров замедляет таяние. Для продуктов углекислый газ совершенно безвреден.

Сухой лед продается в некоторых магазинах, однако его достаточно просто можно получить и в домашних условиях. Для этого вам необходимо приобрести бытовой углекислотный огнетушитель типа ОУ. Такой огнетушитель представляет собой баллон, наполненный сжиженной двуокисью углерода CO_2 , находящейся в нем под высоким давлением. Так как при работе огнетушителя температура на его выходе может достигать -72°C , то необходимо принять меры безопасности: одеть войлочные рукавицы (или плотные перчатки) и защитные очки, избегать попадания струи на открытые участки кожи. Для получения сухого льда снимите пломбу с огнетушителя и выньте предохранительную чеку, а на расширительный раструб огнетушителя наденьте плотный мешок (на худой конец можно использовать обыкновенную рукавицу). Аккуратно нажмите на рычаг и выпустите из огнетушителя необходимое количество двуокиси углерода. Снимите мешок с раструба и высыпьте содержимое — сухой лед готов! [77, 95, 206]

5.28. «ПЕНИЕ» СУХОГО ЛЬДА

Если у вас имеется сухой лед (см. предыдущую статью), то можете друзьям продемонстрировать следующий занимательный опыт. А именно, прижмите чайную ложку к кусочку сухого льда, и вы услышите громкий завывающий звук. Звук длится недолго и быстро затухает. Чтобы его возобновить, надо отнять ложку ото льда, дать ей немного нагреться и опять коснуться льда. Высоту звука и его громкость в известных пределах можно менять — для этого нужно прижимать ложку ко льду то сильнее, то слабее. А если вместо ложки использовать металлический предмет в форме пластины (например, металлическую крышку от сахарницы), то можно услышать и красивый мелодичный звон.

Это явление объясняется тем, что тепло от металла быстро превращает участок льда, к которому прикоснулась ложка, в газ. Обильно выделяясь, углекислый газ с силой выталкива-

ется из-под ложки, при этом ложка колеблется подобно мембране телефона и мы слышим звук [77].

5.29. ЧТО ПРЕДСТАВЛЯЕТ СОБОЙ БРОНЗА?

С 3 тысячелетия до н. э. люди начали широко применять в своей хозяйственной деятельности металлы. Первым металлом, получившим широкое распространение, была медь, и это не случайно. Медь в природе встречается в самородном виде, она хорошо поддается холодной обработке, относительно легко плавится в огне и, в то же время, обладает достаточной твердостью, чтобы можно было пользоваться изделиями из нее. Тем не менее, медь — мягкий металл, сильно уступающий в твердости камню. В конце 3 тыс. до н. э. древние мастера начали использовать сплавы, первым из которых стала **бронза**.

Бронза — обобщенное название сплавов меди с разными химическими элементами, главным образом — металлами: оловом, алюминием, бериллием, свинцом, кадмием, хромом и др. Соответственно, бронза бывает оловянной, алюминиевой, бериллиевой и т. д. Есть еще виды сплавов меди с двумя металлами, которые не называют бронзой: это сплавы меди с цинком (латунь) и никелем (мельхиор, нейзильбер, константан, копель и другие медно-никелевые сплавы).

Древнейшей из бронз является оловянная (именно она подразумевается в термине «бронзовый век»). Первые изделия из этой бронзы получены восстановительной плавкой смеси медной и оловянной руд с древесным углем. Значительно позднее бронзу стали изготавливать добавкой в медь олова и других металлов.

Бронзу применяли в древности для производства оружия и орудий труда (наконечников стрел, кинжалов, топоров), украшений, монет и зеркал. В Средние века большое количество бронзы шло на отливку колоколов. До середины XIX в. бронзу использовали для отливки орудийных стволов.

В XIX в. началось применение бронзы в машиностроении (втулки подшипников, золотники паровых машин, шестерни,

арматура). Особенно ценными для машиностроения оказались **антифрикционные свойства** бронзы и ее **стойкость против коррозии**.

В XX в. начали изготавливать заменители оловянной бронзы, не содержащие дефицитного олова и часто превосходящие ее по многим свойствам. Наибольшее распространение получила алюминиевая бронза с добавками железа, марганца и никеля. Некоторые из безоловянных бронз (бериллиевая, кремне-никелевая и др.) способны сильно упрочняться при закалке с последующим искусственным старением. Например, сплав меди с 2% бериллия после термической обработки приобретает бóльшую прочность, чем многие стали, и очень высокий предел текучести [62, 110].

5.30. ТАЙНА БУЛАТА

Во время похода в Индию в битве на реке Гидаспу (326 г. до н. э.) воинами Александра Македонского был взят в плен индийский царь Пор, раненный в правое незащищенное панцирем плечо. Сам же панцирь, на который градом сыпались стрелы и дротики, к изумлению македонцев не имел ни царапины, ни вмятины. Поразились греческие воины и индусским мечам, которыми можно было рубить камни. Их можно было согнуть в кольцо — они не ломались и восстанавливали свою первоначальную форму. Тончайшая материя, падая на лезвие булатной сабли, рассекалась пополам. Так европейцы впервые встретились с необыкновенным по твердости индийским железом. Впоследствии оно стало широко известно странам Ближнего Востока и Европы под названием **«булат»** (от персид. *пулад* — сталь). Благодаря особой технологии изготовления булат отличается своеобразной внутренней структурой, которая проявляется в виде легко узнаваемого «узора» на его поверхности.

Как получали такую сталь? Древние мастера скрывали секрет изготовления металла, передавая его своим сыновьям лишь на смертном одре. На протяжении веков «индийский секрет» пытались разгадать многие выдающиеся умы Западной Европы, но тщетно!

Это удалось сделать в 1839 г. замечательному русскому металлургу **П. П. Аносову** (1796–1851) после многолетних опытов на Златоустовском железоделательном заводе. Златоустовские клинки прославились на весь мир. Аносовский булат был таким, что даже специалисты не могли отличить его от восточного!

И все-таки булату снова не повезло: в конце XIX в. его тайна вторично была утеряна, несмотря на сохранившиеся рецепты в архивах П. П. Аносова. Чем это объясняется? Видимо, тем, что металлургия тогда только начала превращаться из ремесла в науку, поэтому не было возможности составления строго научного рецепта.

В третий раз за разгадку тайны булата взялись опять же на Златоустовском металлургическом заводе после Великой Отечественной войны (1941–1945). При центральной лаборатории завода была организована исследовательская группа из молодых инженеров под руководством талантливого металлурга **И. Н. Голикова** (1909–1999). Группа рассуждала так. Железо, сталь и чугун — это все то же железо, но с различным содержанием в нем углерода: в собственно железе (другие названия: сварное железо, кричное железо) его не более 0,04%, в стали — до 1,7%, в чугуне — более 1,7%. Несмотря на то, что количество углерода варьируется в таких незначительных пределах, по своим свойствам железо, сталь и чугун резко отличаются друг от друга.

Железо представляет собой мягкий металл, хорошо поддающийся ковке, но малопригодный для использования. Сталь, напротив, очень твердый материал, но приобретающий новое свойство — способность к закалке. Для этого изготовленный инструмент нагревается докрасна, а затем охлаждается в воде. После этого он становится очень твердым и приобретает замечательные режущие качества. Чугун — твердый и хрупкий металл, совершенно не поддающийся ковке. Количество углерода заметно влияет и на другие свойства металла; в частности, чем больше его в железе, тем легче оно плавится. Чистое железо — достаточно тугоплавкий металл (температура плавления 1539°C), а чугун плавится при гораздо более низких температурах.

Анализируя имеющиеся исторические сведения о древней металлургии, исследователи пришли к выводу, что в своих достаточно низкотемпературных плавильных печах индусы могли получать только хрупкий чугун. Однако исторически достоверный факт, что древние люди во множестве находили еще метеоритное («небесное») железо, которое очень мягкое. Это натолкнуло исследователей на мысль расплавить чугун и добавлять к нему стружку самого обычного малоуглеродистого железа при постоянном перемешивании расплава. Оказалось, что если температурный режим поддерживать так, чтобы чугун находился в расплавленном состоянии, а кусочки железа не плавились, то происходит насыщение углеродом кусочков железа и обезуглероживание чугуна. После остужения получившийся неоднородный слиток проковывается при определенных условиях и... готов булат с характерным, только ему свойственным узором!

Так в третий раз — и теперь уже навсегда! — была разгадана древняя тайна.

В конце необходимо отметить, что очень часто булат путают с **дамаском** (дамасской сталью), т.к. эта сталь тоже отличается определенным узором на своей поверхности и обладает высокой упругостью и твердостью. Однако у них совершенно разные технологии изготовления: если булат получается плавлением с последующей ковкой остуженного расплава при определенных условиях, то дамаск — многократной перековкой пакета из чередований слоев железа с высоким и низким содержанием углерода. Первые при закалке приобретают большую твердость стали, а вторые, напротив, не закаливаются вообще. При этом мягкие железные слои служат амортизирующей подложкой и не дают изготовленным таким образом деталям быть слишком хрупкими, а высокоуглеродистые слои стали придают нужную твердость и остроту [45, 110, 160, 191].

5.31. ПЛАВЛЕНИЕ И КРИСТАЛЛИЗАЦИЯ

Плавление — это фазовый переход I рода вещества из кристаллического (твердого) состояния в жидкое. Как и все фазовые переходы I рода плавление происходит с поглощением теп-

лоты и описывается **уравнением Клапейрона—Клаузиуса**

$$\frac{dT}{dp} = \frac{T_{\text{пл}}(V_{\text{ж}} - V_{\text{тв}})}{\Delta Q_{\text{пл}}}, \quad (5.8)$$

где $\Delta Q_{\text{пл}}$ — теплота, необходимая для фазового перехода (плавления); $T_{\text{пл}}$ — температура плавления; $(V_{\text{ж}} - V_{\text{тв}})$ — изменение объема вещества при плавлении. Таким образом, главными характеристиками плавления чистых веществ являются **температура плавления $T_{\text{пл}}$** и **теплота плавления $\Delta Q_{\text{пл}}$** . Теплоту плавления $\Delta Q_{\text{пл}}$ относят к единице массы вещества, в результате чего каждое вещество может характеризоваться уникальной величиной — **удельной теплотой плавления $\lambda = \Delta Q_{\text{пл}}/m$** . Среди широко распространенных кристаллических тел большой удельной теплотой плавления (при нормальном атмосферном давлении) обладают алюминий (390 кДж/кг), вода (лед) (340 кДж/кг), железо (270 кДж/кг), медь (210 кДж/кг), парафин (150 кДж/кг), а наименьшей — свинец (25 кДж/кг).

Наличие определенной температуры плавления $T_{\text{пл}}$ — важный признак правильного кристаллического строения твердых тел. По этому признаку их легко отличить от аморфных твердых тел, которые не имеют фиксированной $T_{\text{пл}}$ — аморфные твердые тела переходят в жидкое состояние постепенно, размягчаясь при повышении температуры. Самую высокую температуру плавления (при нормальном атмосферном давлении) среди чистых металлов имеет вольфрам (3410 °С), самую низкую — ртуть (–38,9 °С). Как правило, для веществ с высокой $T_{\text{пл}}$ характерны более высокие значения λ .

Примеси, присутствующие в кристаллических веществах, снижают их $T_{\text{пл}}$. Этим пользуются на практике для получения сплавов с низкой температурой плавления. Кроме того, плавление сплавов и твердых растворов происходит, как правило, в некотором интервале температур; исключение составляют **эвтектики** с постоянной $T_{\text{пл}}$ (см. ст. 3.57 на с. 368).

Обратный плавлению процесс — **кристаллизация**, которая осуществляется с выделением теплоты. Причем эти противоположные процессы «зеркальны» в прямом смысле, так

как температура кристаллизации для данного вещества равна его температуре плавления, а удельная теплота кристаллизации — удельной теплоте плавления. Однако имеются и некоторые различия. Если для плавления твердого тела никаких дополнительных условий не нужно, лишь бы температура достигла нужного значения, то для кристаллизации жидкости обязательно наличие в ней **центров кристаллизации** (см. ст. 5.22 на с. 498). Ими могут служить любые нерастворившиеся в жидкости частицы. По этой причине, например, нагреть кристалл до $T > T_{\text{пл}}$ в обычных условиях не удастся, так как с начала плавления вплоть до его завершения температура вещества остается постоянной и равной $T_{\text{пл}}$. При кристаллизации же сравнительно легко достигается значительное переохлаждение чистой жидкости относительно $T_{\text{пл}}$ (см. следующую статью).

Температура плавления $T_{\text{пл}}$ зависит от внешнего давления. Характер этой зависимости определяется направлением объемных изменений ($V_{\text{ж}} - V_{\text{тв}}$) при плавлении (см. формулу (5.8)). В большинстве случаев плавление вещества сопровождается увеличением их объема (обычно на несколько процентов). Если это имеет место, то возрастание давления приводит к повышению $T_{\text{пл}}$. Однако у некоторых веществ (воды, ряда металлов и металловидов; см. ст. 3.33 на с. 328) при плавлении происходит уменьшение объема, поэтому температура плавления этих веществ при увеличении давления снижается.

На молекулярном уровне плавление осуществляется следующим образом. При подведении теплоты к кристаллическому телу сначала увеличивается энергия (амплитуда) колебаний его молекул в узлах кристаллической решетки, что означает повышение температуры тела (температура пропорциональна энергии молекул!). При этом попутно увеличивается расстояние между молекулами (см. ст. 5.14 и рис. 5.5 на с. 487). Сочетание этих двух факторов способствует (облегчает) вырыванию молекул в межузловое пространство решетки, что ведет к нарушению ее периодичности — образованию **дефектов** и **вакансий** (см. ст. 5.9 на с. 478). При достижении $T_{\text{пл}}$ в кристалле создается критическая концентрация вакансий и дефектов и начинается плавление — кристаллическая решетка

распадается на легкоподвижные субмикроскопические области. Во время плавления температура фиксируется на уровне $T_{пл}$, так как подводимая теплота идет уже не на нагрев тела (т.е. не на увеличение амплитуды колебаний молекул), а на разрыв межмолекулярных связей и сообщение молекулам расплава дополнительной потенциальной энергии. Это легко понять из рис. 5.5 (на с. 487): при расстояниях, больших равновесного расстояния между молекулами, потенциальная энергия взаимодействия увеличивается, а кинетическая — остается неизменной (так как температура кристалла и его расплава одинакова).

Процесс плавления играет важную роль в природе (плавление снега и льда на поверхности Земли, плавление минералов в ее недрах и т.д.) и в технике (производство металлов и сплавов, литье и др.) [126, 183].

5.32. СТЕКЛОВАНИЕ

При осторожном охлаждении ниже температуры кристаллизации очищенная жидкость может оказаться в переохлажденном состоянии (см. предыдущую статью). При достижении определенной температуры может произойти **стеклование** жидкости: скачком меняются некоторые ее физические характеристики и жидкость переходит в состояние, которое называется **стеклом**.

Стеклообразное состояние, хотя и является твердым по внешним признакам, существенно отличается от кристаллического. Во-первых, в стеклообразном состоянии атомы не обладают дальним порядком, т.е. стекло — это аморфное состояние. Структуру стекла можно коротко охарактеризовать как замороженный слепок той структуры, которой обладала жидкость в начале процесса стеклования. Во-вторых, в стеклообразном состоянии молекулы не находятся в равновесии: на них все время действуют силы, стремящиеся перевести их в кристаллическое состояние. Переход из стеклообразного состояния в кристаллическое хотя и возможен, но связан с большими временами ожидания, а во многих случаях является практически не наблюдаемым.

Стеклование является **динамическим переходом**. Это означает, что температура стеклования зависит от темпа охлаждения: чем больше скорость уменьшения температуры, тем выше температура стеклования. Структура и свойства получающегося при переходе стекла также зависят от темпа охлаждения.

Для стеклования необходимо избежать образования кристаллической фазы при охлаждении. Соответственно, возможность получения стеклообразного состояния вещества определяется тем, насколько легко происходит его кристаллизация. По этому признаку вещества можно условно разделить на три группы:

1) органические полимерные жидкости. Кристаллизация таких жидкостей затруднена из-за малой подвижности ее длинных полимерных молекул, находящихся в сложном переплетенном состоянии. Даже при очень медленном охлаждении такой жидкости она не кристаллизуясь доходит до температур, при которых происходит ее стеклование;

2) вещества, которые хорошо поддаются как кристаллизации (при медленном темпе охлаждения), так и стеклованию (при быстром темпе); например, глицерин;

3) вещества, которые легко кристаллизуются и для которых существование стеклообразного состояния долгое время считалось невозможным. Классическим примером таких веществ можно считать чистые металлы и различные сплавы. Однако в последнее время появились методы получения сверхбыстрого охлаждения, при которых температура падает на 10^8 К в каждую секунду. При столь быстром охлаждении удалось получить аморфное состояние многих металлов и сплавов.

Если с обычными стеклами и полимерами (пластмассами) мы знакомы давно, то **металлические стекла** являются новым словом в науке и технике. Они обладают рядом примечательных и перспективных свойств.

Металлические стекла очень прочны и пластичны даже при комнатной температуре. Однако, несмотря на столь хорошие механические свойства, металлические стекла пока не используются в больших масштабах в качестве деталей кон-

струкций по причине их высокой стоимости. Прослойки из металлических стекол используются в оборонной промышленности при производстве защитной брони для гашения энергии пробивающего снаряда за счет высокой вязкости разрушения таких прослоек.

Металлические стекла обладают также оригинальными электрическими и магнитными свойствами, благодаря чему используются при производстве магнитных экранов, считывающих головок аудио- и видеомэгнитофонов, устройств записи и хранения информации в компьютерной технике, трансформаторов и других устройств.

Основным способом получения металлических стекол является закалка из жидкого состояния. Этот метод заключается в сверхбыстром охлаждении расплава, в результате которого он переходит в твердое состояние, избежав кристаллизации. В зависимости от модификации метод закалки позволяет достаточно легко получать аморфные металлы в формах порошка, тонкой проволоки, тонкой ленты, пластинок. Намного труднее использовать этот метод для получения объемных металлических стекол.

Например, для получения пластинок массой до нескольких сотен миллиграмм капля расплава с большой скоростью выстреливается на непрерывно охлаждаемую медную плиту. Для получения же тонких лент шириной от десятых долей до десятков миллиметров расплав выдавливается на быстро вращающуюся охлаждающую поверхность. Для получения проволок толщиной от единиц до сотен микрон применяется протягивание расплава через трубку с циркулирующим в ней водным раствором [153, 191].

5.33. ВОЛШЕБНЫЙ ПСЕВДОСПЛАВ

Представьте себе, что нам требуется создать материал, способный работать при температурах, превышающих температуру его плавления. При этом деталь, изготовленная из этого материала, должна иметь достаточную жесткость и прочность. Такая задача часто возникает в реальной практике, например, при изготовлении сопла ракетного двигателя.

Действительно, температура газов, истекающих из ракетного сопла, может достигать 4000°C , а это выше, чем температура плавления самого тугоплавкого металла — вольфрама (3380°C). Что же сделать, чтобы сопло из вольфрама могло надежно работать при таких температурах?

Один из самых перспективных путей решения такой задачи — создание **композиционных материалов**, или **композитов**. Композиты включают в себя два или более материала и приобретают в результате такого объединения новые свойства. Типичный пример композита — железобетон, в котором объединяются свойства бетона и стали (см. ст. 5.16 на с. 490). Сегодня создано множество самых разнообразных композитов, и их число с каждым годом растет.

Идея решения нашей задачи состоит в том, чтобы сделать композит из двух компонентов, один из которых легкоплавкий, а другой — тугоплавкий. В качестве легкоплавкого компонента можно взять медь, а тугоплавкого — вольфрам. Такие композиты создаются методами **порошковой металлургии**, когда вольфрамовый порошок сначала прессуют, а потом спекают. В результате таких операций получают вольфрам в виде пористой губки. Изменяя режимы прессования и спекания, можно регулировать количество и размеры пор. Затем пористый вольфрам пропитывается расплавленной медью.

Созданный подобным образом материал называется **псевдосплавом** — это одна из разновидностей композитов. Название «псевдосплав» возникло из-за того, что это не настоящий сплав, у которого кристаллическая решетка состоит из разнородных атомов, — здесь перемешивания компонентов на атомном уровне не происходит (вольфрам с медью не растворяются друг в друге, поэтому их невозможно сплавить). Наш псевдосплав — это структура, представляющая собой жесткий вольфрамовый каркас, поры которого заполнены медью.

Принцип использования такого псевдосплава при высокой температуре следующий. Фазовые переходы I рода у веществ всегда происходят при фиксированных температурах (для данного давления) и с поглощением энергии — **скрытой теплоты фазового перехода**. В нашем случае такими фазовыми переходами будут плавление и испарение меди. Именно по-

глощение энергии при плавлении и испарении (кипении) меди в псевдосплаве послужит защитой вольфрамовому каркасу во время эксплуатации ракетного сопла.

Что же будет происходить с таким материалом при нагревании от раскаленного газа? Вначале температура композита станет расти до тех пор, пока не достигнет температуры плавления меди ($1\,083^{\circ}\text{C}$). Дальнейший подвод тепла к псевдосплаву не вызовет повышения его температуры в течение времени, пока не расплавится вся медь. После того, как вся медь расплавится, температура псевдосплава вновь начнет повышаться. Но при температуре кипения меди ($2\,595^{\circ}\text{C}$) вновь произойдет остановка, и пока вся медь не испарится, температура псевдосплава не повысится. Таким образом, температура газов, образующихся при сгорании топлива, может превышать температуру плавления вольфрама, но он не будет плавиться до тех пор, пока не испарится вся медь.

Конечно, сколь угодно долго такое положение сохраняться не будет. После того как вся расплавленная медь перейдет в пар, температура псевдосплава вновь начнет повышаться, и, когда она достигнет значения температуры плавления вольфрама ($3\,380^{\circ}\text{C}$), материал расплавится. Однако обычно это несущественно, так как в ракетах требуется, чтобы материал «продержался» в пределах нескольких минут, а это псевдосплаву вполне под силу.

Однако для дружбы между материалами, как и между людьми, нужна совместимость. Например, в высокотемпературных псевдосплавах хорошими друзьями вольфраму оказываются медь или серебро, но плохими — никель или железо. Дело в том, что медь и серебро отдают себя в жертву, не причиняя вольфраму вреда, а никель и железо не согласны погибать в одиночку — с повышением температуры они начинают интенсивно разъедать вольфрам. От этого резко падает прочность каркаса, он становится неработоспособным [55].

5.34. ТЕПЛОВЫЙ АККУМУЛЯТОР

Тепловые аккумуляторы известны человечеству с глубокой древности. Это и горячая зола, куда наши предки закапывали

продукты для их тепловой обработки; и горячие камни, которые накаливали на огне, а затем бросали в сосуд с водой для ее кипячения. Старинные утюги, которые нагревали на огне, а затем гладим ими, тоже тепловые аккумуляторы. Накаленные камни, которые мы поливаем водой в столь модных ныне парилках, это тоже аккумулятор тепла.

От каждого аккумулятора требуется, чтобы он запасал как можно больше энергии на единицу массы и «держал» эту энергию как можно дольше. Горячая вода, налитая в открытый сосуд, быстро охлаждается. Это не годится для аккумулятора. Поэтому горячую воду (например, чай или кофе) сохраняют в горячем состоянии в термосах. Тот, кто читал предыдущую статью, наверное, уже начал догадываться, что лучше всего тепловую энергию запастись в виде скрытой теплоты фазового перехода. В этом случае накопленная энергия равна

$$\Delta Q = c_{\text{уд}} m (T_2 - T_1) + \Delta Q_{\text{ф.п.}},$$

где $c_{\text{уд}}$ — удельная теплоемкость вещества; m — его масса; T_1 , T_2 — начальная и конечная температуры; $\Delta Q_{\text{ф.п.}}$ — теплота, аккумулированная за счет фазового перехода. Главное, чтобы температура фазового перехода находилась в промежутке между T_1 и T_2 .

В качестве примера можно привести широко распространенную в быту (по крайней мере, для женщин) вещь — термобигуди для укладки волос. Нагретые в кипятке, такие бигуди долго-долго остаются горячими, т. е. представляют собой самый настоящий тепловой аккумулятор. В качестве рабочего вещества внутри бигуди находится парафин или стеарин (из которых делают обыкновенные свечи). У парафина температура плавления равна 54°C . При кипячении в воде парафин внутри бигуди полностью расплавляется, запасая при этом теплоту плавления. При остывании же сначала температура бигуди падает довольно резко, а затем, дойдя до 54°C , держится на этом уровне до тех пор, пока парафин полностью не перейдет в твердое состояние. Затем бигуди опять достаточно быстро остывает до комнатной температуры. По сравнению с водой время остывания такого же объема парафина дольше в несколько раз.

В качестве рабочего тела для теплового аккумулятора годится, вообще говоря, любое вещество. Другой вопрос, насколько эффективно его использование и чему равна температура фазового перехода. Например, удельная теплота плавления льда (при нормальных условиях) равна $3,3 \cdot 10^5$ Дж/кг или 80 кал/г. Напомним, что 1 кал численно равна количеству теплоты, необходимой для нагревания 1 г воды на 1 градус (см. ст. 2.27 на с. 157). Значит, при плавлении 1 кг льда в образовавшейся воде запасается энергия, достаточная для повышения температуры 1 кг воды на 80 градусов. Однако работать такой аккумулятор будет вокруг температуры 0°C , что резко сужает возможность его применения.

Среди перспективных веществ в качестве теплового аккумулятора можно выделить гидрид самого легкого металла — лития (см. ст. 5.7 на с. 476), удельная теплота плавления которого 650 кал/г при температуре плавления 650°C . Такой аккумулятор можно использовать для питания парового (опять!) автомобиля. Действительно, при кристаллизации 1 кг гидрида лития выделяется 650 ккал или $2,7 \cdot 10^6$ Дж теплоты. Если принять, что в автомобиле используется современная паровая турбина (или двигатель Стирлинга), КПД которой в среднем равен 40%, то в полезную работу будет преобразовано не менее 10^6 Дж энергии. Известно, что на ровной горизонтальной дороге машине массой 1 т для движения со средней скоростью 60–80 км/ч необходимо прикладывать силу в 250 Н. Значит, энергии 10^6 Дж достаточно, чтобы проехать 4 км. Если же тепловой аккумулятор автомобиля содержит 25 кг гидрида лития, запасенной энергии хватит на 100 км пути. Такое количество гидрида лития уже сравнимо с количеством бензина (в среднем, 10 л), необходимого для проезда 100 км современными бензиновыми автомобилями [41, 42, 154].

5.35. ПУЛЯ И ТЕПЛО

Пуля, вылетая из хорошего карабина, имеет скорость около 500 м/с. Предположим, что свинцовая пуля некоторой массы m , летящая с такой скоростью, попадает в абсолютно твердую мишень и останавливается, не отскакивая. Пусть

мишенью служит теплоизолирующий материал, так что пуля совсем не теряет теплоты. Предположим, что температура пули перед ударом в мишень равна $t_0 = 100^\circ\text{C}$ (за счет трения в стволе и контакта с пороховыми газами). Удельная теплоемкость свинца $c = 131 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot^\circ\text{C})$, температура его плавления $t_{\text{пл}} = 327,5^\circ\text{C}$, удельная теплота плавления $\lambda = 25 \text{ кДж}/\text{кг}$. Какая часть пули расплавится в результате столкновения с мишенью?

Кинетическая энергия пули равна

$$E_k = \frac{mv^2}{2} = \frac{500^2}{2}m = 125\,000\,m \text{ Дж},$$

которая при соударении с мишенью полностью превращается в тепло. Чтобы нагреть пулю от 100°C до температуры плавления свинца $327,5^\circ\text{C}$ потребуется энергия

$$\begin{aligned}\Delta Q_1 &= cm(t_{\text{пл}} - t_0) = \\ &= 131(327,5 - 100)m \approx 29\,800\,m \text{ Дж}.\end{aligned}$$

Следовательно, на плавление остается

$$\Delta Q_2 = E_k - \Delta Q_1 = 95\,200\,m \text{ Дж}.$$

С учетом того, что $\Delta Q_2 = \lambda m_{\text{пл}}$, где $m_{\text{пл}}$ — масса расплавившейся части пули, получаем

$$\frac{m_{\text{пл}}}{m} = \frac{\Delta Q_2/\lambda}{m} = \frac{95\,200}{\lambda} = \frac{95\,200}{25\,000} = 3,8.$$

Интересный результат — получается, что выделяющейся при попадании в мишень тепловой энергии достаточно, чтобы расплавить почти четыре пули! Фактически это означает, что пуля не только полностью расплавится, но еще у расплавленного свинца и температура поднимется выше $t_{\text{пл}} = 327,5^\circ\text{C}$.

И все-таки наш расчет неверен. Причина этого в том, что мы пренебрегли многими факторами, главными из которых являются зависимость температуры и удельной теплоты плавления от давления. Те значения $t_{\text{пл}} = 327,5^\circ\text{C}$ и $\lambda = 25 \text{ кДж}/\text{кг}$,

которые нам даны по условию, относятся к нормальному давлению ($p_0 = 10^5$ Па), но при соударении пули с мишенью развивается куда большее давление. А известно, что температура $t_{\text{пл}}$ и удельная теплота λ плавления большинства чистых веществ (за некоторым исключением; см. ст. 5.31), в том числе и свинца, возрастает с повышением давления (именно это утверждает уравнение Клапейрона—Клаузиуса; см. формулу (5.8) на с. 515).

Приблизительно развиваемое при торможении пули давление можно оценить следующим образом. Во время торможения на пулю действует сила

$$F = ma = m \frac{\Delta v}{\Delta t} = m \frac{v_2 - v_1}{\Delta t} = m \frac{v}{\Delta t},$$

где $\Delta v = v$ — изменение скорости пули; Δt — время, в течение которого происходит ее торможение до полной остановки. В самом грубом приближении представим пулю в форме цилиндра высоты l и площадью основания S , масса которого равна $m = \rho l S$, где $\rho = 11\,300$ кг/м³ — плотность свинца. При попадании в мишень цилиндр-пуля будет сплющиваться с заданной скоростью $v = 500$ м/с, поэтому промежуток времени Δt можно оценить как время, в течение которого цилиндр полностью сплющится: $\Delta t = l/v$. Тогда получим

$$F = m \frac{v}{\Delta t} = \rho l S \frac{v}{l/v} = \rho S v^2.$$

Соответственно давление, которое при этом развивается, равно

$$p = \frac{F}{S} = \rho v^2 = 11\,300 \cdot 500^2 \approx 2,8 \cdot 10^9 \text{ Па}.$$

Значит, давление при плавлении подскочит на $\Delta p = 2,8 \cdot 10^9$ Па.

Далее нам следует рассчитать изменения $\Delta t_{\text{пл}}$ и $\Delta \lambda$. Вообще говоря, для этого надо воспользоваться уравнением Клапейрона—Клаузиуса (см. формулу (5.8) на с. 515). Однако это уравнение (одно!) содержит обе неизвестные величины

$t_{\text{пл}}$ и λ . Это означает, что для вычисления одной из них необходимо знать значение другой — получается замкнутый круг. Поэтому воспользуемся **приблизительными эмпирическими формулами**, используемыми в инженерной термодинамике:

$$\Delta t_{\text{пл}} = \frac{T_{\text{пл}} \Delta p}{41,3 \lambda \rho}, \quad \Delta \lambda = \frac{\Delta p}{41,3 \rho} \left(1 + \frac{T_{\text{пл}}}{\lambda} \Delta c_p \right),$$

где $T_{\text{пл}}$, λ — температура (в кельвинах) и удельная теплота плавления вещества при нормальном давлении; ρ — плотность; Δc_p — скачок теплоемкости при плавлении. Из справочной таблицы находим, что для свинца $\Delta c_p \approx 10$ Дж/(кг·°С). Тогда

$$\Delta t_{\text{пл}} = \frac{(327,5 + 273) \cdot 2,8 \cdot 10^9}{41,3 \cdot 25\,000 \cdot 11\,300} \approx 144^\circ\text{C},$$

$$\Delta \lambda = \frac{2,8 \cdot 10^9}{41,3 \cdot 11\,300} \left(1 + \frac{600,5}{25\,000} 10 \right) \approx 7\,500 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}.$$

Соответственно новые значения температуры и удельной теплоты плавления равны:

$$t'_{\text{пл}} = 327,5 + 144 = 471,5^\circ\text{C},$$

$$\lambda' = 25 + 7,5 = 32,5 \text{ кДж/кг}.$$

Теперь можно произвести новый расчет:

$$\Delta Q_1 = 131(471,5 - 100)m \approx 48\,666 m \text{ Дж};$$

$$\Delta Q_2 = E_k - \Delta Q_1 = 76\,333 m \text{ Дж};$$

$$\frac{m_{\text{пл}}}{m} = \frac{\Delta Q_2 / \lambda'}{m} = \frac{76\,333}{32\,500} \approx 2,35.$$

В конце необходимо отметить, что полученный результат ничего общего с реальностью не имеет. Во-первых, в современных пулях свинец содержится только в сердечнике, а снаружи — более твердая оболочка из других металлов. Во-вторых, абсолютно твердых мишеней, к тому же не проводящих тепло, не бывает, поэтому большая часть кинетической энергии пули передается в виде тепла не самой пуле, а, наоборот, мишени. Все это приводит к тому, что даже если температура и достигнет значения $t_{\text{пл}}$, расплавится лишь незначительная часть пули [18, 127, 142, 189, 215].

5.36. ЭФФЕКТ СВЕРХПЛАСТИЧНОСТИ МЕТАЛЛОВ

Интересным с технологической точки зрения является фазовый переход 2-го рода, испытываемый некоторыми металлами, — **перестройка кристаллической решетки (перекристаллизация)** при определенной температуре, при которой атомы перестраиваются в кристаллическую решетку иной симметрии. Такое свойство металлов существовать в разных кристаллических модификациях называется **полиморфизмом**. В момент перекристаллизации возникает **эффект сверхпластичности** — металл, ранее имевший прочную структуру, становится пластичным как глина. Но длится это явление считанные мгновения и протекает в очень узком и непостоянном интервале температур.

Непосредственно подстеречь момент, когда начнется фазовое превращение, невозможно, но известно, что при перестройке кристаллической решетки металл начинает переходить из парамагнитного состояния в ферромагнитное, что сопровождается резким изменением его магнитной проницаемости. Этим воспользовались для создания прессов, штампуемых изделия из металлов в сверхпластичном состоянии. Для этого заготовку, нагретую до температуры чуть выше интервала перекристаллизации, кладут в матрицу пресса. Остывая, металл заготовки в момент перекристаллизации резко изменяет свою магнитную проницаемость, что отмечается изменением тока в измерительной обмотке прибора-датчика, который немедленно включает пресс. Это позволяет отказаться от горячей штамповки металлических изделий и использовать для производства достаточно слабые прессы, что удешевляет технологический процесс [13, 49].

5.37. «ОЛОВЯННАЯ ЧУМА»

Еще одним примером фазового перехода 2-го рода (см. предыдущую статью) может служить перекристаллизация олова, которая происходит при температуре $13,2^{\circ}\text{C}$. Из-за этого бывает два вида олова. Первый — обыкновенное

серебристо-белое олово, являющееся ковким металлом и которое может вырастать в виде больших монокристаллов. Белое олово получается при температурах, превышающих $13,2^{\circ}\text{C}$. Если же температура опускается ниже $13,2^{\circ}\text{C}$, то атомы олова могут перестроиться и образовать кристаллы другой разновидности — хрупкого серого олова, которое не является металлом. Свойства этих двух видов олова совершенно различны.

Плотность белого олова $7\,300\text{ кг/м}^3$, а серого — $5\,800\text{ кг/м}^3$. Тепловое расширение у серого олова в 4 раза больше, чем у белого, поэтому, переходя из белой разновидности в серую, олово резко меняет свой объем и рассыпается в порошок. Если серое олово обдать кипятком, то от сильного нагревания атомы снова перестраиваются и олово переходит обратно в белую разновидность.

Тем не менее, в обычных условиях перекристаллизация олова наблюдается достаточно редко. Дело в том, что существует такое явление как **переохлаждение**. Известно, что при осторожном и аккуратном охлаждении чистой (без центров кристаллизации в виде пылинок и пузырьков газа) жидкости, например, воды, ниже точки замерзания, она будет все еще оставаться в жидком состоянии (см. ст. 5.31 на с. 514). Однако любое внешнее возмущение (толчок, сотрясение, попадание пыли) приводит к моментальному замерзанию жидкости. То же справедливо и для твердых тел, и наблюдающееся при температуре ниже $13,2^{\circ}\text{C}$ белое олово — это фактически **переохлажденный кристалл**. Только в отличие от жидкостей атомы олова уже построены в кристаллическую решетку (т. е. между ними очень сильные связи) и их не так-то легко перестроить. Именно это позволяет применять олово для пайки и при этом спаянные изделия не разваливаются. Для того, чтобы все-таки произошла перекристаллизация, необходимо значительно охладить олово и произвести механическое воздействие значительной силы (например, поцарапать или сдавить) — только тогда начнется переход из переохлажденной белой разновидности олова в более устойчивую серую. Процесс этот имеет цепной характер — если в каком-то месте объема олова произошла его перекристаллизация, то процесс

распространяется и на все прилегающие участки. В старые времена, когда не было понимания физических механизмов перекристаллизации, такое явление получило название **оловянной чумы**.

В истории известно множество случаев оловянной чумы. Например, странная история произошла зимой в конце XIX в. в Петербурге: на одном из складов военного обмундирования «простудились» и «заболели» ... солдатские пуговицы (в те времена пуговицы для шинелей делали из олова). На холодном, неотапливаемом складе лежали большие запасы начищенных белых пуговиц. Когда первые несколько пуговиц слегка потемнели, на это никто не обратил внимания. Но пуговицы продолжали темнеть, теряли блеск и через несколько дней рассыпались в порошок. Самым странным для военных было то, что испорченные пуговицы как бы «заражали» своих соседей и разрушение распространялось как чума. В несколько дней горы ярко блестящих белых пуговиц превратились в бесформенную грудку серого порошка и все имущество склада погибло от «оловянной чумы». И совсем трагична другая история во время экспедиции английского капитана **Р. Скотта** (1868–1912) к Южному полюсу в 1910 г.: на морозе разрушились запаянные оловом бидоны с запасом горючего и оно вытекло, что стало одной из причин гибели экспедиции.

Совершенно чистое металлическое (т.е. белое) олово теперь обычно не употребляется — к нему обязательно добавляются примеси. Оказалось, что если добавить к олову немного, например, висмута, то можно предотвратить оловянную чуму. Атомы висмута в кристаллической решетке олова, как камни на гладкой дороге, мешают перестройке, и белое олово остается металлом и не разрушается даже при низких температурах [25, 156].

5.38. СПЛАВЫ С ПАМЯТЬЮ

Учеными обнаружено, что некоторые сплавы металлов (титан-никель, золото-кадмий, медь-алюминий и пр.) обладают замечательным свойством — «эффeктом памяти». Если из такого сплава изготовить деталь, а затем ее деформировать,

то после нагрева до определенной температуры деталь восстанавливает в точности свою первоначальную форму.

Из всех известных сейчас науке сплавов «с памятью» наиболее уникальны по спектру свойств сплавы из никеля и титана — **нитинолы**. Нитинолы легко обрабатываются, они сравнительно экономичны, коррозионностойки, хорошо гасят вибрации. Замечательно, что при восстановлении своей формы нитинолы развивают очень большие усилия. Этим свойством пользуются для создания многослойных деталей. Для этого из нитинола создают деталь сложной формы, а после превращают ее в плоский лист. На поверхность этого листа обычными приемами (с помощью проката, напыления, сварки или как-либо иначе) наносят слой другого металла или сплава. Образовавшийся металлический «слоеный пирог» после нагревания вновь превращается в деталь первоначальной формы. Таким способом можно создавать многослойные изделия любой формы, которые обычными приемами сделать никак нельзя.

Из нитинола американцы сделали антенны для спутников. В момент запуска антенна свернута, занимает очень мало места. В космосе же, нагретая солнечными лучами, она принимает сложнейшие формы, приданные ей еще на Земле.

Несколько лет назад итальянская фирма высокой моды «Согро Ново» создала мужскую сорочку из ткани, в которой на каждые 5 нейлоновых волокон приходится 1 тонкая проволочка из нитинола. Если у этой рубашки закатать рукава и нагреть ее, скажем, до 35°C , а затем охладить и рукава опустить, то при повторном достижении этой температуры рукава сами закатятся вверх. Точно так же достаточно один раз отгладить эту сорочку утюгом, например, с температурой 50°C , а потом можно ее как угодно скомкать, но после нагрева (на этот раз феном) до этой температуры все складки на ней разгладятся сами.

Сплавы «с памятью» открывают новые возможности и в непосредственном преобразовании тепловой энергии в механическую. Например, нагретую проволочку из нитинола можно свернуть в виде пружины, а потом охладить ее и подвесить гирю, при этом пружина растянется. Если теперь через пружину пропустить электрический ток, то пружина нагреется и

начнет восстанавливать свою форму, при этом гиря поползет вверх (будет совершаться механическая работа); если выключить ток — гиря опустится обратно, и т. д. По сути дела — это искусственный мускул. На этом принципе можно делать двигатели нового типа, использующие даровую энергию Солнца.

Перспективы для сплавов «с памятью» самые заманчивые: тут и тепловая автоматика, быстродействующие датчики, термоупругие элементы, реле, приборы контроля, тепловые домкраты, напряженный железобетон и многое другое [49, 62, 99].

5.39. УГЛЕРОД, ЖИЗНЬ, ФУЛЛЕРЕН И ГРАФЕН

Углерод представляется самым удивительным химическим элементом в природе. Именно он является основой биологической жизни на нашей планете: все биологические (органические) молекулы в своей основе содержат углерод, образуя бесконечное множество различных веществ (известно несколько миллионов органических соединений).

Но почему же именно углерод взял на себя труднейшую задачу быть основой всего живого? Ответ на этот вопрос неоднозначен, но можно отметить главное химическое свойство углерода: только он имеет замечательную способность к росту — усложнению химической структуры, причем не только со «своими» атомами, но и с большинством других «чужих» элементов. Это свойство углерода основано на его способности образовывать очень прочные **ковалентные** связи, хотя он может образовывать и **ионные** (металлические) связи. Углерод четырехвалентен, т. е. на внешней электронной оболочке вращаются четыре валентных слабо связанных с ядром электрона. Степень его окисления в разных обстоятельствах разная: с неметаллами он электроположителен, с металлами — электроотрицателен.

Если соединились два атома углерода, то валентность получившейся молекулы может стать равной двум (если связь между атомами тройная, т. е. на ее образование каждый атом потратил по три валентных электрона, например, как

в ацетилене), четырем (если связь двойная) или шести (при одинарной связи). Что же тут говорить о более сложных соединениях углерода! Подсчитано, например, что из 20 атомов углерода и 42 атомов водорода можно получить 366 319 различных углеводородов состава $C_{20}H_{42}$. А если в «игре» не десятки, а несколько тысяч атомов? А если в «игре» участвуют не только углерод и водород, но и другие химические элементы?

Вторая особенность углерода в том, что химические связи атомов углерода как между собой, так и с атомами, входящими в состав органических веществ (водород, кислород, азот, сера, фосфор и пр.), могут разрушаться под воздействием природных факторов при обычных для Земли температурах и давлениях. Поэтому углерод непрерывно круговращается в природе: из атмосферы — в растения (фотосинтез; см. ст. 2.2 на с. 97), из растений — в животные организмы, из живого — в мертвое, из мертвого — в газообразное и т. д. Это круговращение, поддерживая развитие живой природы, также обеспечивает нас энергией, запасенной в химических связях (древесина, уголь, нефть, газ; см. ст. 2.2 на с. 97).

Свободный атомарный углерод существует в четырех кристаллических модификациях с очень разнообразными физическими и химическими свойствами: кроме широко известных алмаза и графита, это также карбин и лонсдейлит.

Алмаз — самое твердое вещество в природе (см. ст. 5.5 на с. 472). Его кристаллическая решетка имеет элементы в форме тетраэдра — пирамиды с четырьмя равновеликими треугольными гранями и четырьмя вершинами (рис. 5.9, а). Как известно, треугольная конструкция — очень жесткая фигура: ее можно сломать, но деформировать или смять нельзя. Именно поэтому прочность алмаза столь высока.

В отличие от него в другой кристаллической разновидности углерода — **графите** — атомы расположены слоями (рис. 5.9, б), причем наиболее сильные связи между атомами углерода расположены в пределах слоя, а связи между слоями — слабые. По этой причине слои при механических воздействиях сравнительно легко скользят друг относительно друга и этим обусловлена мягкость графита.

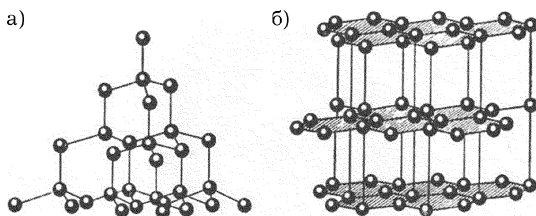


Рис. 5.9

Карбин представляет собой одномерный аналог графита: наиболее сильные связи между атомами углерода тянутся в виде нити, так что карбин можно представить как кристалл, построенный из длинных цепочек атомов углерода, уложенных параллельно друг другу. Карбин получен искусственно в 60-е годы XX в. советскими химиками **В. В. Коршаком**, **А. М. Сдачковым**, **В. И. Касаточкиным** и **Ю. П. Кудрявцевым** и представляет собой мелкокристаллический порошок черного цвета. Он обладает полупроводниковыми свойствами, причем под действием света электропроводность карбина сильно увеличивается. На этом свойстве основано первое практическое применение карбина — в фотоэлементах. Важно, что карбин не утрачивает фотопроводимости при температуре до 500°C ; это намного больше, чем у других материалов того же назначения. И, самое главное, карбин — самое прочное соединение (на растяжение и сжатие) из всех имеющих на Земле веществ, его прочность более чем в 350 раз превышает прочность стали при плотности всего 2 г/см^3 (у стали плотность $7,8\text{ г/см}^3$).

Лонсдейлит также получен искусственно и, кроме этого, найден в метеоритах. Его структура напоминает совокупность одинаково ориентированных шестигранных столбиков-призм. Каждый столбик можно представить построенным наложенными друг на друга бензольными кольцами. Свойства лонсдейлита окончательно еще не установлены.

Все формы свободного углерода устойчивы к щелочам и кислотам и медленно окисляются только очень сильными окислителями; нерастворимы в обычных неорганических и органических растворителях (но растворяются в некоторых

расплавленных металлах). Очень высока температура плавления углерода (в виде графита под давлением свыше 100 атм) — около 4 000 °С.

В узлах кристаллической решетки рассмотренных кристаллов расположены атомы углерода, так что в принципе эти кристаллы можно рассматривать как очень большие молекулы. Однако в узлах решетки могут находиться и настоящие (в классическом понимании) молекулы из атомов углерода и атомов других элементов — за счет уже упомянутой своей уникальности углерод имеет возможность для построения молекулярных скелетов различных типов — линейных, разветвленных, циклических, объемных. Примерами таких молекул являются все органические молекулы — от простейших бутана и полиэтилена до нуклеиновых кислот и белков, в которых многие тысячи атомов. Если связи между такими молекулами достаточно сильны, то может образоваться прочная кристаллическая решетка.

Несмотря на давно известную уникальную способность атомов углерода связываться в сложные разветвленные и объемные молекулярные структуры, тем не менее полным сюрпризом стало случайное открытие в 80-е годы XX в. стабильных каркасных (объемных) молекул, состоящих только из атомов углерода — **фуллеренов** (рис. 5.10). Это открытие признано одним из удивительных и важнейших открытий в науке XX столетия. За свое открытие американские ученые

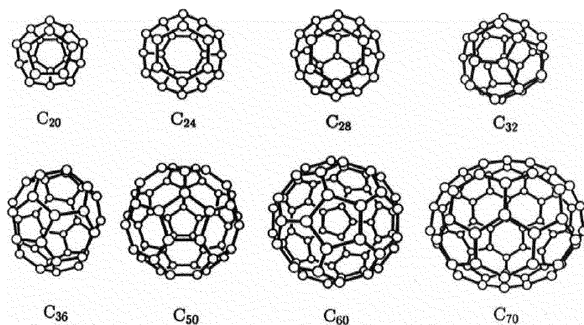


Рис. 5.10

Р. Керл, **Р. Смолли** и английский ученый **Г. Крото** в 1996 г. были удостоены Нобелевской премии по химии.

Свое название фуллерен получил в честь известного архитектора **Бакминстера Фуллера**, создавшего сооружения, куполообразный каркас которых по форме похож на наиболее доступную модификацию фуллерена C_{60} . Кристаллы, образуемые фуллеренами, называются **фуллеритами**. Вскоре были получены структуры и несферической формы; например, фуллерен C_{70} вытянут и напоминает мяч для игры в регби (см. рис. 5.10). Кроме того, были выявлены каркасные структуры углерода в виде фуллереновых трубок, название которых сегодня на слуху у всех — это так называемые **нанотрубки** (рис. 5.11). Они могут быть не только открытые, но и закрытые (с обеих сторон или только с одной).

Подлинный бум в исследовании фуллеренов начался в 1990 г. после того, как немецкий ученый **В. Кретчмер** и американский исследователь **Д. Хафман** разработали технологию получения фуллеренов в достаточных количествах. Новая технология позволила многочисленным научным лабораториям исследовать фуллерены не только в молекулярной форме, но также и в кристаллическом состоянии:

- в 1991 г. американские ученые обнаружили сверхпроводимость фуллеритов, легированных атомами щелочных металлов;

- было выяснено, что молекулы фуллеренов обладают высокой электроотрицательностью и это делает их сильными окислителями;

- было обнаружено, что фуллериты представляют собой полупроводники с шириной запрещенной зоны 1–2 эВ, поэтому обладают фотопроводимостью при облучении видимым светом;

- было доказано, что использование фуллеренов в качестве присадки к смазочному маслу существенно (до 10 раз) снижает коэффициент трения металлических поверхностей

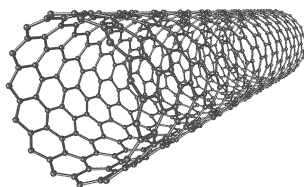


Рис. 5.11

и соответственно повышает износостойкость деталей и агрегатов;

— начаты активные разработки по применению фуллеренов в создании нового типа аккумуляторных батарей, не подверженных, в отличие от традиционно используемых батарей на основе лития, разрушению электродов;

— широко разрабатывается идея создания противораковых медицинских препаратов на основе водорастворимых соединений фуллеренов, внутри которых помещен один или несколько атомов какого-либо элемента. Введение такого лекарства в ткань позволит избирательно воздействовать на пораженные опухолью клетки, препятствуя их дальнейшему размножению;

— и многое, многое другое.

В России, к сожалению, нанорынка нет, но, к счастью, он начал формироваться. Например, усилиями ученых Тамбовского государственного технического университета на базе завода «Комсомолец» создано первое в России опытно-промышленное производство многослойных углеродных нанотрубок производительностью до 2 т в год.

Казалось бы, все, больше сюрпризов от углерода нечего ждать. Однако в 2004 г. американскими учеными (выходцами из России) **К. Новоселовым** и **А. Геймом** был открыт **графен** — двумерная кристаллическая решетка углерода толщиной в один атом (!). За это открытие им была присуждена Нобелевская премия по физике за 2010 г.

Графен — материал с уникальными электрическими, оптическими и механическими свойствами. Его можно представить как одну плоскость графита (см. рис. 5.9, б), отделенную от объемного кристалла. Самое интересное то, что по теоретическим расчетам такая структура графена неустойчива и должна была бы развалиться даже от теплового движения атомов. Оказалось, однако, что тончайшая поверхность графена принимает еле заметную волнообразную форму, чего достаточно, чтобы графен оказался устойчив. Более того, графен обладает большой механической жесткостью (в 200 раз прочнее стали) и рекордно большой теплопроводностью. Высокая подвижность электронов в кристалле графена обуславливает его высокую электропроводность (его электрическое сопротивление

на 35% ниже сопротивления меди), что делает его перспективным материалом для использования в нанoeлектронике и, возможно, в будущем он заменит кремний в интегральных микросхемах.

В лабораторных условиях графен получают механическим отщеплением (отшелушиванием) слоев от чистого графита. Когда вы пишете карандашом, то делаете то же самое — другое дело, что потом сложно изъять достаточно большой участок графена из этого графитового массива.

Для промышленного производства графена используются химические методы и метод термического разложения карбида кремния SiC.

Поскольку графен был получен недавно, он еще недостаточно хорошо изучен и привлекает к себе повышенный интерес [4, 46, 57, 85, 136, 168, 187, 191, 197, 207].

5.40. МЕТАЛЛИЧЕСКИЙ ВОДОРОД

Изобретая все более совершенные устройства, человек должен был их из чего-то делать. Это «что-то» в конечном итоге предопределяло все. Виды и качества материалов оказывали влияние на технический уровень в каждую эпоху; вспомните, например, названия «бронзовый век», «железный век».

Несомненно, одной из самых интересных целей современной технологии материалов является получение **металлического водорода**. Вы спросите: что может иметь общего водород со свойствами металла? Ведь водород — это газ, а металлы — твердые тела, совершенно непохожие на газ. Это действительно так, но только в привычных условиях — при нормальном давлении и обычной комнатной температуре. Но достаточно газообразный водород охладить до температуры 20 К, чтобы получить легкую жидкость, литр которой весит всего лишь 70 г. Если жидкий водород охладить еще на шесть кельвинов, то получается уже твердое тело, тоже очень легкое — оно весит всего 80 г. Но это не ожидаемый металлический водород, наоборот: по свойствам он далек от металлов. Скорее можно сказать, что это типичный изолятор, причем очень ненадежный: стоит только чуть-чуть повысить

температуру, как он разрушается. Что же следует сделать, чтобы получить металлическую модификацию водорода?

Для ответа вспомним, что из себя представляют металлы: это зафиксированные в узлах кристаллической решетки положительные ионы, погруженные в «море» свободных электронов (электронный газ). Положительные ионы, вообще говоря, должны отталкиваться друг от друга, но электроны экранируют отталкивание ионов. В свою очередь, и электроны остаются в пределах металла, так как их удерживает притяжение ионов. Таким образом создается очень стабильная система, а наличие свободных электронов обуславливает у металлов хорошую электропроводность.

Дальше вспомним, что представляет собой атом водорода: он состоит из одного протона и одного вращающегося электрона. Значит, нам надо сблизить атомы водорода настолько, чтобы электроны «забыли», к какому атому они принадлежат, становясь тем самым «общественными», т. е. свободными. Для этого необходимо сильное сжатие замороженного твердого водорода.

Какое нужно для этого давление — точно неизвестно, но специалисты сходятся во мнении, что это давление где-то порядка 4 500 000 атм, что в полтора раза превышает давление в центре нашей Земли. Сложность в том, что при таких высоких давлениях начинает разрушаться любое оборудование, поэтому для его изготовления нужны необычайно твердые материалы и особые технологии. Первый успех был достигнут еще в 1975 г., когда группа ученых под руководством **Л. Верещагина** (1909–1977) из Института физики высоких давлений СССР получила водород в металлическом состоянии при давлении около 3 000 000 атм. Однако для того, чтобы металлический водород оставался в неизменном состоянии и при нормальных давлениях и температурах (как обычный металл), нужны еще большие давления, чего пока не удается достичь.

Уверенность в том, что этого можно добиться, придает обнаружение мощного магнитного поля вокруг Юпитера, что связывают с мощными электрическими токами в сверхпроводящем металлическом водороде, образовавшемся внутри Юпи-

тера под действием огромных давлений, существующих внутри планеты.

Для чего нужен такой металл? Даже если принять, что металлический водород будет несколько тяжелее замороженного, и тогда это был бы самый легкий в природе металл. Он стал бы великолепным материалом для авиационной промышленности, строительных конструкций с огромными пролетами и высотой. Совершенно восхитительны были бы его электрические свойства: расчеты показывают, что уже при 242 К (-31°C) у металлического водорода наступает состояние сверхпроводимости, тогда как лучшие современные сверхпроводники работают при температурах ниже 25 К!

Однако металлический водород еще не получен, вернее, не получена кристаллическая модификация металлического водорода, существующего при обычных температурах и давлениях. Положение на самом деле весьма парадоксальное: мы почти все знаем о том, чего еще нет! [101, 161, 195]

5.41. БУТЫЛКА НА ДНЕ ОКЕАНА

Известно, что при погружении в толщу воды из-за повышения давления твердые тела сжимаются. Например, если сухую доску опустить на глубину 1 км, то под воздействием существующего там давления ее толщина уменьшится наполовину, а на глубине 5 км станет не толще фанеры. Но такое происходит, только если доска сухая, т. е. содержит воздушные поры. Как только вода пропитает доску, то она опять разбухнет и по объему станет ненамного меньше первоначального объема. А все из-за того, что у воды очень маленькая сжимаемость по сравнению с газами (см. ст. 4.13 на с. 388).

Вышесказанное касается сплошных пористых тел. А что будет с непроницаемым телом, образующим замкнутый объем? Например, допустим, что в море на глубине 1 км затонула незакупоренная бутылка. На бутылку в этом случае действует давление толщи воды порядка 100 атм (см. ст.ст. 1.22, 1.27, 4.13). Как вы думаете, как изменится объем бутылки под давлением?

Может показаться совершенно бесспорным, что вместимость бутылки не должна нисколько измениться, так как давление воды с равной силой действует на наружную и на внутреннюю поверхности стеклянной стенки бутылки. Между тем, такое заключение оказывается неверным: бутылка сожмется, и объем ее уменьшится.

Все дело в том, что под давлением воды при указанных условиях произойдет всестороннее (объемное) сжатие стекла. Это значит, что средние расстояния между молекулами стекла чуть-чуть уменьшатся. Это приведет к уменьшению и объема, образуемого стеклом, т. е. бутылки.

Чтобы понять механизм уменьшения объема бутылки, представьте вначале, что стекло имеет форму правильного параллелепипеда, объем которого в результате объемного сжатия уменьшается на некоторую величину (рис. 5.12, а). А теперь вырежем внутренность параллелепипеда, чтобы имитировать внутренний объем бутылки. Очевидно, что при сжатии внутренний свободный объем уменьшится ровно настолько, насколько уменьшился бы объем вырезанной части параллелепипеда (рис. 5.12, б).

Сделаем примерный расчет. Относительное изменение объема тела $\Delta V/V$ при всестороннем сжатии прямо пропорционально оказываемому давлению p :

$$\frac{\Delta V}{V} = \frac{1}{K} \cdot p,$$

где K — коэффициент, называемый **модулем всестороннего сжатия**. Из теории известно, что модуль K выражается через модуль Юнга E (характеризует упругие свойства твердых тел при одноосных сжатиях и растяжениях) и коэффициент Пуассона ν (определяет изменение поперечных размеров тела при

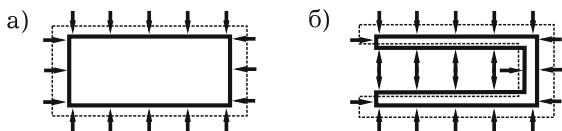


Рис. 5.12

продольных сжатиях и растяжениях):

$$K = \frac{E}{3(1 - 2\nu)}.$$

По справочным таблицам находим, что для стекла $\nu = 0,3$, $E = 6 \cdot 10^{10}$ Па. Примем объем бутылки равным 1 л. Тогда уменьшение объема бутылки под давлением 100 атм равно

$$\begin{aligned}\Delta V &= \frac{3(1 - 2\nu)}{E} pV = \\ &= \frac{3(1 - 2 \cdot 0,3)}{6 \cdot 10^6} \cdot 10^7 \cdot 10^{-3} = 2 \cdot 10^{-7} \text{ м}^3 = 0,2 \text{ см}^3.\end{aligned}$$

Факт уменьшения объема полых твердых тел под толщей воды приходится учитывать при точных измерениях на морских глубинах [95, 115].

5.42. ЭНЕРГИЯ ДЕФОРМАЦИИ

Аккумуляторы с использованием потенциальной энергии упругости применялись человеком еще в глубокой древности: вспомним хотя бы о луках, самострелах и катапультах. В эпоху Возрождения пружинные двигатели можно было встретить в заводных игрушках, часах и даже в «самобеглых» каретах, предназначенных исключительно для торжественного выезда королей. Пружины тогда ковали кузнецы, и стоили они весьма дорого. Сейчас же пружинные двигатели для самых различных механизмов выпускаются многомиллионными сериями.

В чем можно накопить больше потенциальной энергии — в растянутой стальной пружине, резине или сжатом газе?

Обычно отвечают, что в стальной пружине, но это не так. Для растяжения резины на ту же величину потребуется в десятки раз меньшая сила. При этом резина выдерживает в сотни раз большие растяжения (сталь растягивается в упругой зоне очень незначительно — примерно на 1–2%). Да и плотность резины в несколько раз меньше, чем у стали. В результате **удельная энергия** (т. е. энергия, отнесенная к килограмму массы деформированного тела) у резины оказывается

в десятки раз больше (порядка 3–4 кДж/кг), чем у стали (порядка 0,3–0,4 кДж/кг). Почему же повсеместно не применяют вместо стальных пружин резиновые элементы (например, резиновые энергонакопители для часов, приборов, заводных игрушек и т. д.)?

В действительности, когда имеется потребность в высокой удельной энергии, все-таки применяют именно резиновые накопители. Например, летающие игрушки или модели самолетов снабжают именно резиновыми моторами. Всякого рода амортизаторы, ловители в палубной авиации, «отбойники» в автомобилях и т. д. тоже делают с использованием резины. Но широко применять резиновые энергонакопители мешают их малые долговечность, надежность, стабильность свойств. Кроме того, при деформации резиновых элементов много механической энергии рассеивается в тепловую (резина греется и отдает тепло окружающей среде).

На свете существует еще ряд материалов, которые куда эластичнее резины. Прежде всего, к таким материалам относятся **гидрогели** — материалы, твердые частицы которых равномерно распределены в объеме воды (примером геля в быту может служить обычный кисель). Недавно ученые создали гидрогель, который обладает невероятной эластичностью и который практически невозможно повредить механическим воздействием. Он прочнее резины и может растягиваться в 20 раз относительно изначальной длины. Кроме этого, гель обладает свойствами самовосстановления: когда он теряет эластичность, достаточно нагреть его до 80 °С, чтобы изначальные свойства полностью восстановились.

Если уж говорить о накоплении потенциальной энергии, то непревзойденными по удельной энергоемкости являются газы. Благодаря малой плотности и огромной сжимаемости газы накапливают энергии в десятки раз больше, чем резина той же массы. Но при сжатии газы нагреваются, и это тепло чаще всего рассеивается при «хранении» энергии. Отсюда — большие потери энергии и малый КПД газовых накопителей энергии.

В табл. 5.1 для сравнения приведены показатели некоторых типов аккумуляторов энергии, известных человечеству сегодня или предполагаемых к использованию в будущем.

Следует упомянуть еще об одном перспективном «упругом» накопителе энергии. Это — так называемые **псевдоупругие материалы**, в основном, сплавы титана и никеля — нитинолы (т. е. это те же материалы, что обладают «эффектом памяти»). Проволоку из такого материала можно деформировать раз в десять больше, чем стальную. Отсюда и на порядок бóльшая удельная энергоемкость. Более того, псевдоупругие материалы не подвержены усталости (как, например, сталь) и крайне долговечны. Однако у них имеется большой недостаток — свойство «псевдоупругости» приобретает ими только при 150–200 °С. При обычной же температуре такие материалы ведут себя «вяло», как будто бы они изготовлены из очень прочной смолы. Соответственно, КПД накопления и выделения энергии в таких случаях ничтожен. Интересно, однако, что при часто повторяющихся деформациях из-за перехода механической энергии в тепло такой материал сперва нагревается, а когда температура его достигает нужного уровня, он начинает работать с полной силой и высоким КПД [13, 41, 42, 44, 81].

Таблица 5.1

Показатели аккумуляторов энергии

Тип аккумулятора	Удельная энергия, кДж/кг	Удельная мощность, Вт/кг
<i>Упругие аккумуляторы</i>		
Пружинный (сталь)	0,32	>10
Резиновый	3,2	~80
Газовый	28	>10 ⁴
<i>Электрохимические аккумуляторы</i>		
Свинцово-кислотный	64	~80
Никель-кадмиевый	110	~80
Серебряно-цинковый	400	~150
Серно-натриевый	800	~150
Топливный элемент	170	~45
<i>Тепловые аккумуляторы</i>		
Тепловой аккумулятор в паре с двигателем Стирлинга	8,5	—
<i>Маховичные аккумуляторы</i>		
Стальной диск	10	>10 ⁴
Ленточный супермаховик	150	>10 ⁴
Супермаховик из специального стекловолокна	650	>10 ⁴
Предполагаемый супермаховик из углеродного наноматериала	26 000	—

НЕСЕРЬЕЗНО О СЕРЬЕЗНОМ И СЕРЬЕЗНО О НЕСЕРЬЕЗНОМ

6.1. ЭКСПЕРИМЕНТАТОРЫ И ТЕОРЕТИКИ

Так уж сложилось, что физиков делят на теоретиков и экспериментаторов. Корни этого уходят в глубину веков. Например, во времена И. Ньютона физики делились на натурфилософов (т. е. физиков-теоретиков) и естествоиспытателей (т. е. физиков-экспериментаторов). Считается, что экспериментатор умеет работать руками и очень слабо разбирается в теории, а теоретик, наоборот, создает теории и ничего не смыслит в приборах. С этим, конечно, можно поспорить, но, видимо, кое-какие основания для этого есть. По крайней мере, истории известны несколько свидетельств, подтверждающих правомерность такого разделения физиков.

Одно из них связано с замечательным швейцарским физиком **Вольфгангом Паули** (1900–1958), который внес существенный вклад в квантовую механику: он ввел понятие спина элементарной частицы, предсказал существование нейтрино и сформулировал принцип запрета Паули, за что в 1945 г. был удостоен Нобелевской премии по физике. Паули был стопроцентным теоретиком. Более того, его неспособность обращаться с любым экспериментальным оборудованием вошла у друзей в поговорку. Утверждали даже, что ему достаточно было просто войти в лабораторию, чтобы в ней что-нибудь сразу же переставало работать. Это мистическое явление окрестили «эффekten Паули» (в отличие от знаменитого принципа Паули в квантовой теории). Из документально зарегистрированных проявлений «эффекта Паули» самым

поразительным, несомненно, является следующий. Однажды в лаборатории другого известного физика **Джеймса Франка** (1882–1964) в Геттингене (Германия) произошел настоящий взрыв, разрушивший дорожную установку. Время этого ЧП было точно зафиксировано. Как потом оказалось, взрыв произошел именно в тот момент, когда поезд, в котором Паули следовал из Цюриха в Копенгаген, остановился на 8 минут в Геттингене в нескольких километрах от лаборатории. Сам Дж. Франк потом говорил: «Такой большой радиус действия эффекта заставляет признать Паули величайшим теоретиком всех времен!»

Об «экспериментальных способностях» великого советского физика-теоретика **Л. Д. Ландау** (1908–1968) тоже ходили легенды: стоило ему появиться в какой-нибудь лаборатории, как установки выходили из строя, разбивались стеклянные колбы, портились приборы. Физики не могли установить причины: то ли великий Ландау боялся эксперимента, то ли эксперимент боялся его. Но сотрудники лабораторий, куда приходил Ландау, на всякий случай просили его класть «шаловливые» руки на спинку стула и не отрывать их от нее [71, 136, 145, 168, 175].

6.2. КАК ДЕЛАЮТСЯ ВЕЛИКИЕ ОТКРЫТИЯ

Исходя из собственного богатого опыта, **Альберт Эйнштейн** (1879–1955) утверждал, что великие открытия делают следующим образом: подавляющее большинство людей знает, что это невозможно, а затем находится один человек, который не знает, — вот он-то и делает открытие.

С этим можно поспорить: во-первых, человек должен все-таки иметь хоть какое-то представление о том, что собирается делать, во-вторых, он должен быть заинтересован в этом и настойчив в достижении цели, и, в-третьих, здесь большую роль может сыграть случай, но, как заметил еще французский микробиолог и химик **Луи Пастер** (1822–1895), случай «не всякому помогает... Судьба одаривает только подготовленные умы».

Когда в 1932 г. голландский физик **Б. Х. Кеезом** (1876–1956) открыл у гелия явление сверхвысокой теплопроводности при понижении температуры до 2,17 К (см. ст. 3.54 на с. 364), многие ученые разных стран заинтересовались удивительными свойствами жидкого гелия. Был среди них и советский ученый **П. Л. Капица** (1894–1984). Экспериментируя, он создал лабораторную установку для получения жидкого гелия, обнаружил его сверхтекучие свойства и подробно изучил их, за что в 1978 г. ему была присуждена Нобелевская премия. Капица о своем открытии говорил так: «Мне в жизни в первый раз удалось найти такое фундаментальное свойство вещества. Я много делал экспериментов в разных областях, но это уже вопрос везения или невезения. Когда такой случай подвернулся, нельзя было его упускать».

Все это может показаться достаточно простым и понятным, но в реальной жизни происходящие события могут выглядеть намного драматичнее. Это хорошо иллюстрируется на примере открытия Америки **Христофором Колумбом** (1451–1506). Колумб был одержим идеей, что Земля круглая и что можно достичь Восточной Индии, плывя на Запад. Обратите внимание на следующее:

- 1) идея никоим образом не была оригинальной, но он получил информацию;
- 2) он встретился с огромными трудностями как в поиске лиц, которые могли бы его субсидировать, так и непосредственно в процессе проведения экспедиции;
- 3) он не нашел нового пути в Индию, но зато нашел новую часть света;
- 4) несмотря на все доказательства противного, он все же свято верил, что открыл дорогу на Восток;
- 5) при жизни он не дождался ни особого почета, ни существенного вознаграждения;
- 6) с тех пор найдены неопровержимые доказательства, что Колумб не был первым европейцем, достигшим берегов Америки.

Так что, удача удачей, но иметь умную голову и много знать — никому не помешает [62, 143, 145].

6.3. КАК РОЖДАЕТСЯ НАУЧНЫЙ ИНТЕРЕС

Как известно (см. предыдущую статью), явление сверхтекучести жидкого гелия было экспериментально исследовано **П. Л. Капицей**. Теоретически же это явление было объяснено **Л. Д. Ландау**, который, к тому же, предсказал у гелия еще несколько эффектов. Эти эффекты были выявлены с помощью ряда изящных опытов другим известным советским физиком **Э. Л. Андроникашвили** (1910–1989).

В конце 50-х гг. XX в., посещая знаменитую Лейденскую лабораторию в Голландии (где и начались исследования свойств жидкого гелия), Андроникашвили познакомился там с известным американским физиком **Р. Фейнманом** (1918–1988), который тоже внес весомый вклад в теорию жидкого гелия. Однажды он спросил у Фейнмана:

— Скажите, Фейнман, когда вы начали заниматься гелием?

— Ха! — ответил тот. — С того дня, как прочитал вашу работу «Два вида движения в гелии-II».

— Бросьте шутить!

— Я не шучу. Как-то я услышал, что какой-то Андроникашвили написал работу о том, что гелий-II может стоять и двигаться одновременно. «Чепуха, — подумал я. — Это какой-то сумасшедший». Потом я услышал об этой работе второй раз. Дай, думаю, посмотрю в статье, кого благодарит этот Андроникашвили. Оказывается, благодарит Капицу и Ландау. Тогда я решил, что в одном институте не может быть сразу трех сумасшедших и постарался понять, в чем тут дело. А потом заинтересовался этой проблемой и стал работать сам [175].

6.4. ГАРАНТИЯ ПЕРВЕНСТВА

В истории физики встречается много случаев, когда открытие какого-либо физического закона оспаривалось несколькими учеными. Чего только не придумывали ученые, чтобы сохранить за собой первенство.

В средние века было модно зашифровывать свои открытия в виде анаграмм и публиковать в научных изданиях. Анаграммы представляли собой последовательности латинских букв,

расставленных в алфавитном порядке. Но если расставить их в правильном порядке, известном только автору, то должна была получиться фраза, выражающая суть открытия. К такому способу закрепления за собой первенства ученому приходилось обращаться в том случае, если не было полной уверенности в достоверности полученных результатов. Этим как бы делалась заявка на приоритет на тот случай, если кто-нибудь вдруг опередит автора.

Например, в 1676 г. английский физик **Р. Гук** (1635–1703) опубликовал открытый им закон пропорциональности удлинения тела приложенной к нему силе (теперь мы называем его законом Гука) в виде анаграммы **ceiinnosssttuu**. Ему это пришлось сделать из-за того, что параллельно с ним этой проблемой занимался голландский ученый **Х. Гюйгенс** (1629–1695), а Гук еще не был уверен в правильности своего закона. Три года спустя, убедившись в своей правоте, Гук опубликовал расшифровку анаграммы — **ut tensio sic vis**, что после расстановки пробелов превращается в выражение на латыни «Ut tensio sic vis», в переводе означающее «Каково удлинение, такова и сила».

В конце XVIII в. на смену таким ухищрениям пришла система публикаций в ведущих научных журналах мира и регистраций в патентных организациях [53, 107].

6.5. ПРИНЦИПЫ ДЛЯ НОВЫХ ТЕОРИЙ

Есть несколько основных принципов, которые можно сформулировать для создателей новых физических законов. Эти принципы, вообще говоря, ниоткуда не следуют и, по большей части, являются интуитивными, но их справедливость неоднократно подтверждалась в истории физики с появлением каждой новой значимой теории.

- **Принцип математичности** — исторически первый принцип теоретической физики — был сформулирован итальянским физиком **Галилео Галилеем** (1564–1642): «Книга природы написана на естественном языке разума — языке математики». Создавая новую теорию, физик-теоретик всегда ищет соответствующий ей математический аппарат. Если в

математике этот аппарат еще не разработан, то он обязательно будет создан — теоретику в этом помогут «чистые» математики (им, главное, математически правильно поставить задачу). Так, при создании теории гравитации и формулировке основных законов механики великому английскому физiku **И. Ньютону** (1643–1727) пришлось разработать основы теории дифференциального и интегрального исчисления, которая потом была доведена до законченной формы последующими великими математиками. Или, при создании квантовой механики в начале XX в. выяснилось, что имевшихся в математике того времени средств для ее описания недостаточно. В ответ на «запрос» физиков была разработана теория операторов и теория групп.

Математизация теории дает массу преимуществ для ее применения в науке и жизни, однако невозможно логически обосновать, почему настоящая теория должна быть обязательно облачена в математическую форму. По выражению американского физика **Ю. П. Вигнера** (1902–1995), «непостижимая эффективность математики в физике — одна из загадок мироздания».

● **Принцип соответствия** описывает отношение между старой и новой физическими теориями: новая теория должна охватывать и старую. Другими словами, в области, правильно описываемой старой теорией, новая должна давать те же результаты (иначе новая теория неверна), т. е. старая теория должна быть частным или предельным случаем новой; вместе с тем новая теория объясняет явления, недоступные объяснению старой теорией. Принцип соответствия был сформулирован в 1923 г. датским физиком-теоретиком **Н. Бором** (1885–1962) как косвенное подтверждение правильности выдвинутой им в 1913 г. теории строения атома и спектров излучения и поглощения: он показал, что между предложенной им неклассической теорией излучения и традиционной (классической) существует строгое соответствие.

● Тем не менее, для новой теории должен также выполняться и **принцип «безумности»**: с точки зрения старой теории новая должна быть совершенно «безумной» и идеологически непонятной. Например, в «старой» механике Ньютона энергия

бесконечно делима и наименьшая ее порция может быть сколь угодно мала, тогда как в «новой» квантовой механике существует конечная наименьшая порция энергии — квант. С точки зрения механики Ньютона существование квантов энергии абсолютно непонятно и потому «безумно». Таким образом, переход к новой теории всегда требует свежих, неординарных, «безумных» идей. Недаром Н. Бор, рассматривая и отвергая очередную научную гипотезу, замечал: «Эта идея недостаточна безумна для того, чтобы быть верной».

• **Принцип математической красоты** — в сильнейшей степени неформальный принцип. Понятие красоты является очень субъективным (зависящим от человека), а уж если говорить о математической красоте физической теории, то даже ее понимание дано не каждому смертному. Одним из таких людей, который и начал говорить о ней, был английский физик-теоретик **П. Дирак** (1902–1984): «Стройность какого-нибудь уравнения является более важным, чем соответствие его эксперименту... Если нет полного согласия результатов какого-либо теоретического исследования с экспериментом, это может быть обусловлено более тонкими деталями, которые не удалось принять во внимание!» Иначе говоря, если теория противоречит эксперименту, то либо она недостаточно красива, либо несовершенен эксперимент.

• **Принцип простоты** — еще один интуитивный и неформальный принцип физики, вероятно, связанный с предыдущим. Иногда этот принцип называют «**Бритвой Оккама**» (или «**Лезвием Оккама**») по имени английского монаха-философа **У. Оккама** (1285–1349), который сформулировал философский принцип бережливости при получении новых знаний: «Не следует множить сущее без необходимости» (либо «Не следует привлекать новые сущности без крайней на то необходимости»). Термин «бритва» является философским, под которым понимается инструмент, помогающий отбрасывать маловероятные и неправдоподобные объяснения при установлении истины. В современном понимании принцип простоты состоит в следующем: если какое-то явление может быть правильно объяснено двумя способами, то тот из них, который обходится меньшим количеством сущностей, и надо

считать верным (проще говоря, самое простое объяснение, скорее всего, и есть правильное). Как писал немецкий физик-теоретик **М. Планк** (1858–1947): «Я всегда держался мнения, что закон природы выражается тем проще, чем более общим он является».

Чтобы не быть голословным, можно привести в пример теорию женской красоты, созданную замечательным физиком-теоретиком **Л. Д. Ландау**. В этой теории соблюдены все вышеназванные принципы. Исходя из своего понимания женской красоты, Ландау вывел следующую формулу показателя женской привлекательности:

$$L = k \frac{R_1 R_2 H}{R_3^2 M},$$

где R_1 — обхват бюста, R_2 — обхват бедер, R_3 — обхват талии, H — рост, M — масса, причем все размеры берутся в см, а масса — в кг; k — коэффициент пропорциональности. Коэффициент k , вообще говоря, сложным образом зависит от расстояния r между наблюдателем и объектом, характеристик среды наблюдения и состояния наблюдателя, но в воздушной среде и при расстояниях r порядка нескольких метров для адекватного наблюдателя его можно считать равным 1. Так, если принять параметры для женщины (по стандартам 60-х гг. XX в.) приблизительно равными 80–80–60–170–60 (в указанной выше последовательности), то по формуле Ландау получим значение 5. Если же принять параметры «антимодели», например, 120–120–120–170–100, то получим 2.

Соблюдение принципа математичности в этой теории непосредственно следует из того, что у нее имеется математическое выражение, позволяющее вычислить показатель женской привлекательности для любой наперед заданной женщины. Работает и принцип соответствия, например, из этой теории запросто вытекает как частный случай полуэмпирическая теория **П. Дирака** о женской привлекательности. Согласно Дираку существует оптимальное расстояние $r_{\max}$, на котором женская привлекательность максимальна, поскольку в двух пределах — при $r = 0$ и $r = \infty$ — привлекательность обращается

в нуль (ничего не видно), а между двумя минимумами обязательно должен существовать максимум. Можно показать, что из теории Ландау при соответствующем выборе зависимости коэффициента k от расстояния r можно получить теорию Дирака. Безумность этой теории очевидна для любого человека. С математической точки зрения формула Ландау безупречна, и в этом ее математическая красота. Простота этой теории достигается тем, что все несущественные для обычных условий характеристики спрятаны в коэффициенте k .

В конце необходимо отметить, что теория Ландау является классической, основанной на предположении о непрерывном воздействии женской красоты на наблюдателя. Но, как известно, любое взаимодействие в природе носит квантовый характер.

На сегодняшний день квантовой теории женской привлекательности не существует — ее создание все еще дело будущего [136, 141, 146, 168, 175, 191].

6.6. САМОУЧИТЕЛЬ ПО СОЗДАНИЮ НОВЫХ ТЕОРИЙ

Шаг 1: выбрать какое-либо поле. Возможны 4 варианта: а) биополе; б) информационное поле; в) энергетическое поле; г) произвольная смесь трех предыдущих. В принципе, можно выбрать новое неизвестное науке поле и назвать его, например, молекулярно-тороидальным или, еще круче, торонным. Однако лучше не отклоняться от предложенных вариантов: обычно люди не задают вопросов типа «что значит биополе и каким законам оно подчиняется», а про непривычное для них торонное поле могут и спросить.

Шаг 2: подготовить ссылки на труды великих ученых. Примеры: Эйлер, Лейбниц, Пуанкаре, обязательно — Эйнштейн. На Ньютона лучше не ссылаться — большинству он надоел еще в школе. Хорошо также иметь в запасе труды другого опровергателя укоренившихся законов. Тогда в диспутах можно спросить с удивлением: «Как, вы не знакомы с трудами X?» И неважно, что эти труды опубликованы на конференции по спелеологии 20 лет назад — эффект обеспечен.

Шаг 3: определить, какая польза от новой теории человечеству. При этом нужно обещать видимый эффект от теории через 2–5 лет. Меньше 2 лет опасно — не успеют забыть и потребуют предъявить; больше 5 лет тоже нежелательно — не будут ждать и потеряют интерес. Чтобы подогреть этот интерес, рекомендуется намекнуть, что ваша опытная установка уже работает, но именно в данный момент ее осмотреть нельзя (варианты объяснения: находится в другом городе, дорабатывается, отсутствует защитный костюм и т. д.).

Шаг 4: найти обоснование, почему до сих пор никто «этого» не обнаружил. Это — самое сложное, именно здесь надо включить воображение. Например, ваше поле может улавливаться только каким-либо органом человека, лучше — мозгом, хотя возможны варианты. Еще раз настоятельно рекомендуется «иметь» устройство, «улавливающее» ваше поле. Если захотят детально ознакомиться с ним, аккуратно откажите, выбрав подходящее объяснение из предыдущего шага. Другие варианты: скажите, что сможете это сделать после получения патента или после того, как ведомство («сами знаете какое») снимет гриф секретности (понимающе улыбнитесь).

Шаг 5: ввести в терминологию что-нибудь японское или китайское. Это придает загадочность и глубину вашей теории. Можно не утруждаться и взять примеры из «обычной» науки: производная Ли, матрица Кобаяши–Маскава, потенциал Юкавы. Потенциал Лифшица не использовать — он не японец.

Шаг 6: подумать о возможных опасностях и способах их избежать. Основную опасность представляют профессиональные ученые. К сожалению, для развития вашего детища контактов с ними не избежать, поэтому нужна серьезная подготовка. Надо знать много разделов физики — читайте научно-популярные журналы. На первых порах публичный спор с учеными нежелателен; начинать надо с заочных споров или дискуссий с людьми, знающих физику хуже вас.

Шаг 7: опубликовать статьи. Лучше публиковаться в трудах и сборниках вузов — за деньги сейчас большинство вузов (по крайней мере, провинциальных) с удовольствием напе-

чатаяют ваш труд, даже если тематика не подходит. Участвуйте в любых конференциях, куда удастся попасть. Не пытайтесь печататься в журналах, посвященных обычной науке, — рецензенты «зарубят». Даже если такое случилось, обратите этот факт себе во благо: при разговоре с «единомышленниками» обоснуйте отказ, например, сговором «релятивистов».

Шаг 8: вступать в диспуты с учеными. При диспутах очень важно иметь зрителей из числа лиц, знающих физику хуже вас, — только таким образом вы завоюете себе «паству». В спорах часто вводите новые термины, ссылайтесь на ученых начала прошлого века и на свои публикации, твердо стойте на том, что у вас — «другая наука», а ваши оппоненты — зашоренные ретрограды без капли воображения. Делайте упор на то, что для того, чтобы вас понять, надо подняться на новый уровень мышления, что недоступно профессиональным ученым, копающимся в мелочах.

Шаг 9: работа над ошибками. После каждого спора с любым ученым анализируйте его возражения и продумывайте ответные ходы. Таким образом, со временем ваша позиция будет только укрепляться.

Шаг 10: перейти на шаг 7 [109].

6.7. ДОКАЗАТЕЛЬНОСТЬ ТЕОРИИ БЕЗ ПРАКТИКИ

Какой сильной может быть внешне логичная и непротиворечивая физическая теория в отрыве от практики можно проиллюстрировать теорией устройства мира древнегреческого философа **Аристотеля** (384–322 до н. э.).

По его теории, Вселенная конечна и имеет наиболее симметричную (и совершенную) форму — форму сферы. У всякой сферы есть центр — единственная точка, выделенная своим особым местоположением среди всех остальных точек Вселенной. Поэтому естественное движение тел может происходить либо по окружности вокруг такого центра, либо по радиальным направлениям. «Простыми, — писал Аристотель, — являются только эти два движения по той причине, что и среди величин простые также только эти: прямая и окружность». Из

двух названных движений круговое движение по необходимости должно быть первичным. В самом деле, законченное по природе первично относительно незаконченного. Между тем круг — нечто законченное, чего нельзя сказать ни об одной прямой. Именно по кругу и движутся небесные тела.

Если бы Вселенная была бесконечной, то в ней не оказалось бы «ни центра, ни края, ни верха, ни низа, там у тел не может быть и никакого определенного места, куда направлены перемещения. Если же его нет, то не может быть и движения». Но движения есть, и мы их наблюдаем. Значит, «тело Вселенной не бесконечно».

Что находится в центре Вселенной? Поскольку естественное движение тяжелых тел должно быть направлено к нему, а мы видим, что такие тела падают вниз на Землю, то, следовательно, именно Земля и располагается в центре мира.

Есть, правда, люди, сомневающиеся в верности данного вывода и считающие, что Земля находится на некотором расстоянии от центра мира. Но «надо отличаться, вероятно, весьма беспечным образом мыслей, чтобы не удивляться, как же это возможно, чтобы в то время как маленькая часть Земли, если ее поднять и отпустить, движется и никогда не остается на месте (и причем движется тем быстрее, чем она больше), вся Земля, если бы ее подняли и отпустили, не двигалась. А между тем так оно и есть: столь огромная тяжесть пребывает в покое!»

А теперь, уважаемый читатель, забудьте все, что вы знаете из физики, и, закрыв глаза, прокрутите вышепрочитанное в голове — безупречно, не так ли? Не даром эта теория более тысячи лет господствовала в науке.

А вообще говоря, надо просто запомнить слова замечательного английского математика и философа **Б. Рассела** (1872–1970) о том, что **из ложного утверждения следует любое другое утверждение**. Когда его попросили доказать, что из неправильного утверждения $2 + 2 = 5$ следует, что Рассел — папа римский, он привел следующую логическую цепочку:

- 1) предположим, что $2 + 2 = 5$;
- 2) вычтем из обеих частей 2, тогда $2 = 3$;
- 3) переставим левую и правую части, получим $3 = 2$;

4) вычтем из обеих частей 1, тогда $2 = 1$.

Далее, папа римский и Рассел — это два человека. Так как $2 = 1$, то папа римский и Рассел — это одно лицо. Следовательно, Рассел — папа римский [141, 168].

6.8. «И ГЕНИЙ — ПАРАДОКСОВ ДРУГ»

Есть две мудрости, возведенные в народе в ранг постулатов, т. е. утверждений, не требующих доказательства:

- 1) кошки всегда приземляются на лапы;
- 2) бутерброд всегда падает маслом вниз.

Рассмотрим теперь кошку, падающую на пол, к спине которой прикреплен бутерброд маслом вверх. Как упадет на пол такая система? Возникает парадокс, который требуется решить.

Сразу же отмечаем все фантастические домыслы, в том числе и мнение, что результатом эксперимента станет антигравитация. Согласно авторов этого мнения, кошка будет пытаться приземлиться на лапы, но в то же время бутерброд будет стремиться упасть, как обычно, маслом вниз. Чем ближе к полу, тем сильнее будет это стремление. Поэтому система «кошка-бутерброд» начнет вращаться и ее падение с приближением к полу замедлится. В конце концов, система должна достигнуть стабильного состояния, зависнув недалеко от пола и вращаясь с большой скоростью. Заметим, однако, что такая ситуация возможна только в отсутствие воздуха, а это невозможно, так как ставит кошку в условия, несовместимые с жизнью. При наличии же воздуха гравитационная энергия падения за счет вязкого трения перешла бы в тепло и растопила масло до жидкого состояния, что нарушает условия опыта. Несостоятельны также доводы тех, кто считает, что кошка во время падения слижет масло с бутерброда и все-таки успеет приземлиться на лапы. Это следует из того, что масло может быть любым, но не любое масло кошка слижет (например, машинное).

На самом деле, никакого парадокса нет. Если предположить, что кошка приземлится на лапы, то бутерброд так и останется «не упавшим»; если же маслом вниз упадет

бутерброд, то кошка будет «не упавшей». Ну, а какой из вариантов наиболее вероятен — это сильно зависит от начальных условий. Правда, остается еще вариант падения системы «кошка-бутерброд» на бок, но он не рассматривается, поскольку мы предполагаем абсолютную истинность двух приведенных в начале утверждений.

Еще один вариант разрешения противоречия заключается в том, что кошка с привязанным бутербродом является составным объектом и поэтому не может являться по определению «кошкой» в первом правиле или просто «бутербродом» во втором. Другими словами, правила «бутерброда» и «кошки» определены только для отдельных элементов и не распространяются на кошку с привязанным бутербродом [171].

6.9. ЕЩЕ ОДИН ПАРАДОКС

Всем хорошо известно ироническое выражение «Если ты такой умный, то почему такой бедный?», которое можно трактовать как парадокс. Однако немногие знают, что этот грустный парадокс имеет вполне реальное логическое объяснение с точки зрения физики. Оно основано на двух бесспорных фактах, т. е. постулатах:

- 1) знание = сила;
- 2) время = деньги.

Итак, из физического определения мощности следует, что $N = A/t = Fs/t = Fv$, откуда

$$\frac{A}{Fv} = t.$$

Подставляя в полученное выражение значения для t и F из приведенных выше постулатов, получаем

$$\frac{\text{работа}}{\text{знание} \cdot \text{скорость}} = \text{деньги}.$$

Полученное соотношение показывает, что устремляя знание или скорость к нулю, мы можем получить за любую работу сколь угодно большие деньги. Отсюда вывод: чем глупее и ленивее человек, тем больше денег он сможет заработать.

В подтверждение можно привести слова жены А. Эйнштейна на вопрос журналиста о том, что она думает о своем муже:

— Мой муж гений! — сказала госпожа Эйнштейн. — Он умеет делать абсолютно все, кроме денег [141, 175].

6.10. ЛОГИКА И ВЕРА

Однажды в университете во время занятия по эволюционной биологии один умный профессор задал студенту интересный вопрос:

— Бог хороший?

Студент ответил:

— Да.

— А скажи мне, существует ли на Земле зло?

— Да.

— И Бог создал все, верно?

— Да.

— Так кто создал зло?

Студент не нашелся что ответить. А профессор продолжал:

— Наука утверждает, что у человека есть 5 чувств, чтобы исследовать окружающий мир. Скажи мне, ты когда-нибудь видел Бога?

— Нет, сэр.

— Скажи нам, ты слышал Бога?

— Нет, сэр.

— Ты когда-нибудь ощущал Бога? Пробовал его на вкус? Нюхал его?

— Боюсь, что нет, сэр.

— И ты до сих пор в него веришь?

— Да.

— Исходя из полученных выводов, наука может утверждать, что Бога нет. Ты можешь что-то противопоставить этому?

— Нет, профессор. У меня есть только одно — вера.

Профессор торжествующе:

— Вот именно. Вера — это главная проблема науки.

Тогда начал задавать вопросы студент:

— Профессор, холод существует?

— Что за вопрос? Конечно, существует. Тебе никогда не было холодно?

— На самом деле, сэр, холода не существует. В соответствии с законами физики, то, что мы считаем холодом, в действительности является отсутствием тепла. Абсолютный ноль есть полное отсутствие тепла — вся материя становится инертной и неспособной реагировать при этой температуре. Холода не существует. Мы создали это слово для описания того, что мы чувствуем при отсутствии тепла.

В аудитории повисла тишина. А студент продолжал:

— Профессор, темнота существует?

— Конечно, существует. Что такое ночь, если не темнота?

— Вы опять неправы, сэр. Темноты также не существует. Темнота в действительности есть отсутствие света. Мы можем изучить свет, но не темноту. Как вы можете узнать, насколько темным является какое-либо пространство? Для этого вы измеряете количество света. Темнота — это понятие, которое человек использует, чтобы описать, что происходит при отсутствии света. А теперь скажите, сэр, смерть существует?

— Конечно. Есть жизнь, и есть смерть — обратная ее сторона.

— Вы снова неправы, профессор. Смерть — это не обратная сторона жизни, это ее отсутствие. В вашей научной теории появилась серьезная трещина.

Это был уже серьезный выпад. Профессор занервничал:

— К чему вы ведете, молодой человек?

— К тому, профессор, что вы учите студентов, что все мы произошли от обезьян. Вы наблюдали эволюцию собственными глазами?

Профессор с улыбкой покачал головой, понимая, к чему идет разговор — все-таки это был умный профессор. А студент продолжил:

— Никто не видел этого процесса, а значит, вы в бóльшей степени священник, а не ученый.

Аудитория взорвалась от смеха. Разгоряченный студент продолжал:

— А теперь скажите, есть кто-нибудь в этом классе, кто видел мозг профессора? Слышал его, нюхал его, прикасался

к нему? Видимо, никто. Тогда, опираясь на научные факты, можно сделать вывод, что у профессора нет мозга. При всем уважении к вам, профессор, как мы можем доверять сказанному вами на лекциях?

В аудитории повисла тишина. Но профессор действительно был умным:

— Думаю, вам просто стоит мне поверить.

— Вот именно! Между Богом и человеком есть только одна связь — это ВЕРА!

Профессор сел. А студента звали **Альберт Эйнштейн** [199].

6.11. КАК ДОКАЗАТЬ СВОЮ ПРАВОТУ

Жизненное наблюдение **Н. В. Гулиа**, знаменитого советского и постсоветского механика XX в., изобретателя супермаховика: «Меньше всего, оказывается, убеждают цифры, формулы, математические доказательства. А вот демонстрации опытов, фотографий, киносъемок действуют неотразимо, хотя они и не всегда бывают достоверны».

В доказательство этому можно привести случай из жизни французского химика **А. Лавуазье** (1743–1794) — первооткрывателя химического состава атмосферного воздуха. Лавуазье потратил несколько лет на то, чтобы убедить ученый мир в неправильности теории флогистона — учения о неведомой «огненной субстанции», якобы заполняющей все горючие вещества и высвобождающейся из них при горении. Но все впустую — его достоверные опыты были недостаточно эффектными, недостаточно поражали воображение его коллег.

Наконец Лавуазье решил драматизировать идею. И вот весной 1772 г. он провел опыты, которые произвели сенсацию и вызвали огромный интерес к его исследованиям. Воспользовавшись огромным увеличительным стеклом, Лавуазье сжег в запаянном сосуде алмаз. Хотя сжигание алмаза с научной точки зрения ничем не лучше сжигания угля или графита, огромная стоимость эксперимента привлекла всеобщее внимание. Об опытах Лавуазье заговорили, а заодно заговорили и о том, что теория флогистона неверна.

А вот другой пример. Французский ученый **Ж. Роберваль** (1602–1675) долгое время доказывал своим коллегам, что давление сжатого воздуха не ослабевает с течением времени. Однако его научные доводы многие ученые считали недостаточно убедительными, и тогда Роберваль решил драматизировать идею. Он зарядил воздушное духовое ружье и положил его в кладовую на... 16 лет. По истечении этого срока он собрал сомневающихся (вернее, тех, кто дожил до окончания эксперимента) и произвел выстрел из ружья, которое выстрелило как будто было только что заряжено [42, 175].

6.12. О ПОЛЬЗЕ ССЫЛОК НА АВТОРИТЕТЫ

Весьма поучительна история получения основного уравнения молекулярно-кинетической теории идеального газа $p = \frac{1}{3}nm_0\langle v^2 \rangle$, связывающего макроскопические параметры (давление, объем, температура) газа с микроскопическими (масса молекул, средняя скорость их движения). Считается, что его впервые получил в 1857 г. немецкий физик **Р. Клаузиус** (1822–1888), а затем в 1859 г. оно было уточнено английским физиком **Дж. Максвеллом** (1831–1879).

Однако основоположником молекулярно-кинетической теории следует считать **Д. Бернулли** (1700–1782), который первый предположил, что причиной давления газа является хаотическое движение частиц, и использовал это положение при написании своей «Гидродинамики» в 1738 г. Используя идеи Бернулли, английский исследователь **Дж. Дж. Уотерстон** (1811–1883) задолго до Клаузиуса и Максвелла вывел уравнение, связывающее давление и среднюю скорость молекул. В 1845 г. он представил свою работу для доклада на заседании Лондонского королевского общества. Однако рецензент охарактеризовал работу неизвестного в «высоких кругах» исследователя как «пустую, если не бессмысленную, и непригодную даже для чтения перед Обществом» (в существование атомов и молекул большинство ученых тогда не верило).

Лишь спустя полвека, в 1892 г. английский физик **лорд Рэлей** (1842–1919) отыскал забытую и уже потерявшую актуальность работу Уотерстона в архиве Лондонского коро-

левского общества. Он сопроводил ее весьма уместным замечанием: если бы автор упомянул своего великого предшественника Д. Бернулли, то у рецензента не хватило бы смелости столь безапелляционно отвергнуть этот труд, и математическое обоснование молекулярно-кинетической теории газов произошло бы на 15 лет раньше [169].

6.13. ИСТОРИЯ ОДНОЙ АВАНТЮРЫ

Как известно, современная наука отрицает существование «вечных двигателей» (или **perpetuum mobile**). Вообще говоря, известные в истории проекты «вечных двигателей» можно разделить на 2 больших класса:

— работающие в нарушение I начала термодинамики, т. е. производящие работу, не получая энергии извне, — «вечные двигатели» I рода;

— работающие в нарушение II начала термодинамики. Такие двигатели не нарушают I начало термодинамики, но получают работу без перепада температуры, т. е. фактически из окружающей нас среды — это «вечные двигатели» II рода.

Идея создания «вечного двигателя» всегда волновала умы людей, и этим иногда пользовались ловкие, умные, но бесчестные люди. В этой статье описывается одна такая авантюра, поставленная с истинно американским размахом и предприимчивостью.

Американец **Джон Кили** (1837–1898) происходил из Филадельфии. Он был плотником и до 35-летнего возраста никак не проявлял себя в области наук. Более того, данных о том, что он получил какое-либо образование, нет. Однако в 1873 г. в газетах стали выходить его заметки, в которых он писал, что открыл «эфирную силу», которую можно получить «расщеплением» обыкновенной воды. И далее расписывал перспективы использования открытой им «силы»: если организовать производство соответствующих двигателей, то, используя небольшое количество воды, можно будет получать огромные количества энергии. На специально устроенной выставке Кили демонстрировал свой «вечный двигатель», работающий на этой «эфирной силе».

Кили быстро нашел среди крупных промышленных воротил людей, желающих вложить часть своих капиталов в разработку этой энергетической жилы, сулящей огромные прибыли. Была создана «Компания по производству моторов Кили» с капиталом в 5 млн долларов! Доверие акционеров поддерживалось не только учеными речами (на которые Кили был большим мастер), рекламой в печати, но и его новыми «научно-техническими достижениями». Главным из них было «создание» агрегата под названием «Либерейтор» («Освободитель»), который расщеплял воду, освобождая энергию. Кили утверждал, что его мотор, заправленный одной квартой (1,1 л) воды, может провести пассажирский поезд поперек всего американского континента — от Филадельфии до Сан-Франциско. Можно представить себе, какие прибыли сулила такая техника!

Так прошло пять лет (1875–1880 гг.), в течение которых фирма Кили процветала и ее акции охотно раскупались несмотря на то, что ни одного мотора выпущено не было. В немалой степени этому способствовало и то, что нашлись ученые (правда, не физики и не энергетики), которые активно его поддерживали. Однако в конце концов противоречие между грандиозными обещаниями Кили и скромными результатами его деятельности привело к тому, что главные акционеры «Компании по производству моторов Кили» перестали его финансировать. В газетах стали появляться скептические статьи настоящих специалистов-физиков, которые прямо обвиняли Кили в шарлатанстве. Детище Кили явно вскоре должно было пойти на дно.

Однако случилось нечто совершенно неожиданное: Кили вдруг получил мощную финансовую и моральную поддержку, которая не только помогла ему «остаться на плаву», но и обрести новые силы. Французы в таких загадочных случаях говорят: «Ищите женщину!» Такой женщиной оказалась миссис Мур, богатая вдова филадельфийского бумажного фабриканта. Она прочла в одном номере газеты сразу две статьи. В первой рассказывалось о бедственном положении Кили, который, дойдя до полной нищеты, упорно работает над своим изобретением. В другой статье была описана история некое-

го изобретателя, не понятого современниками и погибшего в одиночестве; лишь после смерти его труд был оценен. Совместное действие этих публикаций было настолько сильным, что вдова отыскала Кили, познакомилась с ним и... наступил новый период его творчества. Это было в 1882 г. Нужды в деньгах опять не было: состояние вдовы превышало 5 млн долларов. Вдохновленный вдовой, Кили сделал новое «открытие» — «вибрационную силу в жидкости, находящейся между атомами безграничного эфира».

Безгранично веря в талант Кили, миссис Мур решила привлечь для поддержки его дела известных ученых и инженеров. Эта идея не вызвала особого восторга у Кили, но отказать полностью своей покровительнице он не мог. Как всегда в подобных случаях, эксперты разделились на три группы. Большинство приглашенных отказались от участия в экспертизе, не желая тратить время на эти не внушавшие доверия дела. Вторая группа из несколько ученых мужей дала положительные отзывы о трудах Кили, сильно не вникая в суть явлений. Наконец, среди приглашенных для экспертизы специалистов нашлись и такие, которые, имея достаточно высокую научно-инженерную квалификацию, обладали также неким спортивно-детективным духом. Эти решили докопаться до истины и выяснить, на чем были основаны удивительные эффекты, которые показывал Кили. И в один прекрасный день, когда Кили демонстрировал металлические шары и диски, которые, находясь в воде, по команде (и даже под музыку!) всплывали на поверхность, зависали под ней или тонули под действием таинственных сил, экспертам удалось получить доказательство того, что все эти объекты представляли собой полые сосуды, менявшие объем при изменении давления воздуха, подаваемого в них по тонким полым трубкам (эксперты поступили гениально просто: как бы «случайно» сломали одну такую скрытую трубку во время демонстрации). Результаты были доложены миссис Мур, и в 1896 г. она прекратила поддержку Кили.

Все же она была доброй женщиной и оставила изобретателю пожизненную ежемесячную «стипендию» в размере 250 долларов.

Когда Кили в 1898 г. умер, его дом был осмотрен и в подвале была обнаружена целая компрессорная станция. Таким образом, Кили занимался надувательством не только в переносном, но и в самом прямом смысле.

Созданные Кили устройства свидетельствуют о его несомненном инженерном таланте и техническом мастерстве. Невольно возникает мысль, что несмотря на отсутствие образования он был намного способнее и умнее многих обманутых им ученых. Однако Кили прекрасно понимал, что, пойдя по пути финансовых афер, он не может претендовать на место в истории науки. Поэтому, уже будучи стариком, он сказал одному из своих друзей, что хотел бы на своей могиле иметь надпись: «Кили, величайший мошенник XIX века» [19].

6.14. ИСТОРИЯ ОДНОГО ОПРОСА

Вот вам еще пример того, как незнание и безграмотность позволяют манипулировать общественным сознанием.

В последние годы XX в. американский журнал «Skeptical Inquirer» опубликовал заметку о проведенном в США опросе с требованием запретить химическое соединение **дигидрогенмонооксид**. При опросе перечислялись следующие опасные свойства этого вещества:

1) при попадании в желудок дигидрогенмонооксид может вызвать усиленное потоотделение, в больших количествах — рвоту;

2) дигидрогенмонооксид — основной компонент кислотных дождей;

3) в газообразной форме дигидрогенмонооксид вызывает тяжелые ожоги;

4) при случайном вдыхании этого вещества человек может погибнуть;

5) это соединение участвует в эрозии почв, повреждает памятники архитектуры, является основной причиной коррозии металлов;

6) дигидрогенмонооксид снижает эффективность работы автомобильных тормозов;

7) большие количества этого вещества обнаружены в раковых опухолях и во всех болезнетворных микробах.

Читатель, конечно, уже догадался, что распространенное в быту название дигидрогенмонооксида — **вода**. Однако результаты вышеупомянутого опроса оказались следующими: из 50 опрошенных 43 человека согласились подписать петицию о запрете дигидрогенмонооксида, 6 человек не имели определенного мнения, и лишь один сообразил, что скрывается за этим мудреным названием [62].

6.15. СУП РУМФОРДА

Английский физик **граф Румфорд (Бенджамин Томпсон)** (1753–1814) — один из предшественников Р. Майера в открытии I начала термодинамики (см. п. 2.4. на с. 102) — был знаменит не только физическими исследованиями. Карл Маркс в своем труде «Капитал» (т. 1, гл. 22) приводит уникальный кулинарный рецепт так называемого «супа Румфорда» из книги Румфорда «Политические, экономические, философские и другие эссе»:

«5 фунтов ячменя, 5 фунтов кукурузы, на 3 пенса сеledок, на 1 пенс соли, на 1 пенс уксуса, на 2 пенса перца и зелени, итого на сумму 20 3/4 пенса. Получается суп на 64 человека, при этом при средних ценах хлеба стоимость этого может быть еще понижена до 1/4 пенса на душу».

Маркс приводит этот рецепт как пример того, какими способами жадные капиталисты стараются подешевле прокормить своих рабочих, и указывает имя автора: «Один американский краснбай, возведенный в баронское звание янки Бенджамин Томпсон, он же граф Румфорд» (Румфорд родился в Америке, но титул графа получил в Англии).

История же этого рецепта такова. В конце 1780-х гг. Румфорд, будучи министром полиции в Баварии, предложил убрать с улиц Мюнхена нищих. В первый день нового 1790 г., когда по традиции толпы бродяг со всей Баварии прибыли в Мюнхен собирать милостыню, они были окружены полицией и армией и отправлены в созданный Румфордом работный дом.

В работном доме с военной дисциплиной и строгим распорядком бродяги были обязаны трудиться на пользу государства, получая взамен приют и пищу. Для минимизации расходов на их питание Румфорд воспользовался теорией алхимика Ван Гельмонта, согласно которой главная пища растений — это вода, а минеральные вещества лишь «катализируют» ее разложение. То же, посчитал Румфорд, верно и для человека. Из этого он сделал логичный вывод, что лучшим и самым питательным блюдом будет суп. Пятилетние эксперименты на солдатах и обитателях работного дома позволили Румфорду предложить рецепт, как написано в вышеуказанной его книге, «наидешевейшей, вкуснейшей и самой питательной пищи, которую только можно себе представить. Это суп, состоящий из перловой ячменной крупы, гороха, картофеля, мелко нарезанного белого хлеба, уксуса, соли и воды в определенных пропорциях».

Румфорд также определил порцию такого супа на одного человека — 700 миллилитров, и способ ее подачи: высушенные кусочки белого хлеба добавляются в последний момент и призваны заставить едока усиленно жевать, замедляя процесс поедания и тем повышая питательность супа.

Похлебка Румфорда стала основой для питания солдат практически всех армий мира вплоть до середины XX в. И в настоящее время рецепт Румфорда почти в неизменном виде используется Армией спасения для кормления бездомных. Практически Румфорд стал основателем диетологии — науки о питании, причем, что самое интересное, основываясь на заведомо неправильной теории Ван Гельмонта [191].

6.16. КОМПЬЮТЕР И АВТОМОБИЛЬ

Наблюдая за бурным развитием компьютерной техники в последнее время, возникает острое чувство сожаления и зависти, что наше автомобилестроение и энергетика не могут развиваться такими же темпами. Как утверждает глава корпорации Microsoft **Билл Гейтс**, если бы автомобиль прогрессировал так же быстро, как компьютер, то «Роллс-ройс» стоил бы сейчас меньше доллара, а на литре бензина можно было

бы проехать тысячу километров. Действительно, с момента появления компьютеров их цена в сопоставлении с производительностью упала именно в такой пропорции.

Тем не менее, повод для надежды есть. Группой ученых из Швейцарской высшей политехнической школы разработан самый экономичный автомобиль в мире весом около 30 кг. Автомобиль работает на топливном элементе, который производит электроэнергию из водорода и приводит в движение два электромотора. Единственным отходом такого автомобиля является вода. Расход водорода эквивалентен проезду 5134 км пути на 1 л бензина. Получается, чтобы объехать вокруг земного шара новому автомобилю требуется всего 8 л бензина. Однако никаких сведений о стоимости нового автомобиля нет [63, 182].

6.17. КОСНОСТЬ МЫШЛЕНИЯ И РАЗВИТИЕ ТЕХНИКИ

В 1908 г. один из основателей американской автомобильной промышленности **Генри Форд** (1863–1947) запустил в производство модель своего автомобиля «Форд Лиззи» (модель Т, мощность мотора 20,4 л.с., максимальная скорость 65 км/ч). Благодаря низкой цене (850 долларов в 1908 г., 440 долларов в 1915 г.), высокой надежности и экономичности автомобиль пользовался бешеным спросом. Для управления автомобилем приходилось прикладывать столь незначительные усилия, что с такой задачей справлялись даже женщины, отдававшие «Форду-Т» предпочтение перед другими автомобилями. В рекламных проспектах сообщалось, что научиться ездить на «Форде-Т» можно за 12 мин, и это не было преувеличением.

Считая модель Т идеальным автомобилем для народа, Форд не желал ничего менять в ее конструкции. Инженеры, осмелившихся предложить какие-либо изменения, пусть даже во внешнем облике автомобиля, Форд увольнял. Когда в 1912 г. один из ведущих конструкторов фирмы, пользуясь временным отсутствием хозяина, изготовил экземпляр новой модели, Форд пришел в такую ярость, что лично уничтожил

этот экземпляр, оторвав голыми руками двери, разбив стекла и попрыгав на крыше и капоте.

Однако в начале 1920-х годов продажи модели Т стали падать. Сын Форда испортил отношения с отцом, уговаривая его перейти на новую модель. Наконец в 1927 г. Форд был вынужден прекратить производство модели Т (всего было выпущено 15 миллионов автомобилей!) и перевести завод на новую модель. Но пока Форд упорствовал, первенство в автомобилестроении перешло к «Дженерал Моторс». Вот так-то вот! [63, 134]

6.18. ФИЗИКИ И МАТЕМАТИКИ

О том, что мышление физиков и математиков отличны друг от друга, известно давно. Нисколько не умаляя труд математиков, без которых ни одна физическая теория не встала бы на ноги, приведем высказывание известного американского физика **Д. У. Гиббса** (1839–1903): «Математик может говорить, что ему хочется, но физик должен, хотя бы в какой-то мере, быть в здравом рассудке». Для подтверждения этому приведем широко известный анекдот.

Физику и математику дают газовую плиту, спички, воду и чайник. Ставится задача: вскипятить воду. Оба ее решают одинаково: наливают воду в чайник, спичками зажигают газ и ставят чайник на плиту. Далее задачу усложняют: теперь газовая плита уже горит, а вода налита в чайник. Физик просто ставит чайник на плиту. Математик выливает воду из чайника, тем самым сводя задачу к предыдущему случаю.

В оправдание математиков можно привести мнение величайшего русского математика **А. Н. Колмогорова** (1903–1987) по этим вопросам. Он говорил, что математик не обязан начинать (как физик) с практических задач, он может работать в «чистой» математике, рождая новую абстрактную теорию «на кончике пера». И если он настоящий математик, эта теория будет содержать по-настоящему новые идеи, а значит, рано или поздно она окажется востребованной, даже если автор к этому не стремился. Плохой математик тоже может создать абстрактную теорию, но интерес к ней (даже ес-

ли она сначала в центре внимания) его не переживет, и его труды будут лежать в библиотеках, никем не востребованные [123, 169, 193].

6.19. ФИЗИКА И ЖИЗНЬ

На протяжении большей части XX в. многие физики свысока смотрели на своих ученых собратьев, занимавшихся исследованиями в других областях естествознания.

Рассказывают, что, когда жена американского физика-теоретика **Вольфганга Паули** (1900–1958) ушла от него к химику, Паули просто не мог в это поверить: «Я еще понял бы, если бы она ушла к тореадору. Но к химику...»

Великий английский физик **Эрнест Резерфорд** (1871–1937) однажды сказал: «Вся наука — это либо физика, либо коллекционирование марок». Судьба «отомстила» Резерфорду за это высказывание со свойственной ей иногда иронией: в 1908 г. его удостоили Нобелевской премии не по физике, а по химии.

Ради справедливости необходимо отметить, что такая «корпоративность» присуща не только физикам. Английский ученый **Г. Х. Харди** (1877–1947), считавшийся при жизни одним из лучших математиков своего времени, очень кичился тем, что он «совсем чистый» математик. В одной популярной статье он написал, что гордится полной бесполезностью всех своих математических открытий. Но с этим ему не повезло: большая часть его чисто математических открытий была впоследствии переоткрыта, и его вклад в них во многом забыт, но одно его открытие, относящееся к «чистой» аналитической теории чисел и носящее сегодня название закона Харди—Вайнберга, осталось навсегда в науке. Ибо это один из основных законов... молекулярной биологии! [63, 123]

6.20. ЗЕМЛЯ, ПРИРОДА, ЧЕЛОВЕК

Изучая историю человечества, невольно наталкиваешься на мысль, что человек, преобразовывая природу, разрушая при этом ее извечный порядок, сформировавшийся за

многие сотни и сотни миллионов лет, загрязняя ее, тратя на это громадные усилия и время, в конце концов получает порцию удобной для использования энергии, развивает с ее помощью науки и технологии с единственной целью — чтобы как можно меньше работать. Многим, скорее всего, понятно, что при таком «имперском» отношении к природе она будет сопротивляться и воспринимать человечество как «раковую опухоль» на своем теле. Как-то не верится, что «оформляя» нас как высшую ступень биологического развития, как вид, умеющий мыслить и созидать, природа своей конечной целью ставила праздное существование человечества в будущем. Наоборот, хочется верить, что для разумного человека природой предназначена более возвышенная и благородная миссия. Видимо, по этой причине природа еще многое прощает нам, хотя иногда дает довольно чувствительные оплеухи, если мы сильно «расшалимся».

Видимо, подобные мысли подвигли английского ученого **Дж. Лавлока** в 60-х годах XX в. выдвинуть так называемую **гипотезу Геи** (Гея — греческая богиня, которая вывела мир из хаоса), суть которой можно сформулировать очень просто: Земля и ее биосфера — это живой организм. Лавлок утверждает: «Земля — больше, чем просто дом, это живой организм, и мы являемся его частью». С гипотезой Геи перекликаются **основные законы экологии**, сформулированные в то же время американским экологом и биологом **Б. Коммонером**. Их всего четыре:

- 1) все связано со всем;
- 2) ничто не дается даром;
- 3) все должно куда-то деваться;
- 4) природа знает лучше.

Отсюда вывод: надо изучать природу, т.е., фактически, изучать себя как часть природы. И если вы, читатель, посвятили себя **физике — науке, изучающей природу**, — то знайте, что самыми ближайшими соратниками в этом деле для вас являются психологи и физиологи, а уж потом все остальные *-оги, -ики, -омы, -офы, -исты* и т.д. И наш долг, долг сына — заботиться о природе, лелеять ее, как любящий сын заботится о своей матери [63, 136].

6.21. О ТЕРМОДИНАМИКЕ

Народная мудрость давно отметила, что всякая вещь или явление — это «палка о двух концах», подразумевая, что кроме положительных сторон всегда имеются и отрицательные. Так думали вплоть до возникновения термодинамики. Термодинамика же подправила это положение: любое явление в природе — это «палка о трех началах». Игры с природой по правилам «палки о трех началах» очень жесткие:

- первое начало: вам не выиграть;
- второе начало: вам не сыграть вничью;
- третье начало: вам даже не дадут сыграть до конца.

ПЕРЕФРАЗИРУЯ известную фразу, можно сказать, что «все законы природы равны, но законы термодинамики — равнее других» [136, 146].

6.22. ВАРИАНТЫ ВОПРОСОВ ДЛЯ ЭКЗАМЕНА ПО МОЛЕКУЛЯРНОЙ ФИЗИКЕ

Вопрос на «отлично»: «В каких единицах измеряется температура?»

Вопрос на «хорошо»: «Температура измеряется: а) в килограммах; б) в штуках; в) в кельвинах».

Вопрос на «удовлетворительно»: «А не в кельвинах ли измеряется температура?»

И был вечер, и было утро. И пришла сессия. И живые позавидовали мертвым... [141, 200]

6.23. ГИМН ФИЗИКОВ

На мотив «Дубинушки» [190]

Тот, кто физиком стал,
Тот грустить перестал:
На физмате не жизнь, а малина.
Только физика — соль,
Остальное все ноль.
А филолог и химик — дубина.

Припев:

Эх, дубинушка, ухнем.
Может физика сама пойдет.
Поддернем, поддернем да ухнем.

На физмате живем,
Интегралы жуем
И квантуем моменты и спины.
А как станет невмочь —
Все учебники прочь,
И затынем родную «Дубину».

Припев

Свет давно не горит,
А студент все не спит:
Над конспектами гнет свою спину.
Сто экзаменов сдал,
Сто зачетов он сдал,
Но остался дубиной дубина.

Припев

Деканат весь кипит,
И декан говорит:
«Неприглядна учебы картина».
Мы на это плюем,
Мы уверены в том,
Что и сам он большая дубина.

Припев

6.24. ФИЗМАТОВСКАЯ ПЕЧАЛЬНАЯ

На мотив «Раскинулось море широко»

Раскинулась плоскость по модулю пять,
В ряды интегралы вставали.
«Студент! Не сумел производную

взять!» —

Ему в деканате сказали.

«Не смей на халяву экзамен сдавать,
Декан наш тобой недоволен.
Сумей теорему Коши доказать —
Иначе ты будешь уволен».

И рад доказать — да сознания нет,
В глазах у него помутилось.
Увидел стипендии меркнувший свет,
Упал — сердце больше не билось.

К нему набежала профессоров рать,
Бородки над ним колыхали.
Декан обещал три стипендии дать,
Но пятки уже остывали.

Его раздели, как будто на бал,
И в матрицу труп завернули.
А вместо молитвы над ним прочитал
Доцент теорему Бернулли.

Три дня в деканате покойник лежал,
В штаны Пифагора одетый.
В руках квадратичную форму держал
И эллипс, на вектор надетый.

Напрасно студенты ждут друга домой,
В науке без жертв не бывает.
А синуса график волна за волной
На ось ординат набегают.

Наука уже доказала давно —
Материя не исчезает:
Загнется студент — на могиле его
Огромный лопух вырастает.

6.25. РУКОВОДСТВО К ВЫПОЛНЕНИЮ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

1. Если вы не знаете, что делаете, делайте это аккуратно.
2. Горячая колба выглядит точно так же, как и холодная.

3. Накопленный опыт прямо пропорционален количеству разрушенного материала и оборудования.

4. Прошлый опыт всегда правилен и не должен искажаться фактами настоящего. Если есть сомнение, замените его прочным убеждением.

5. Не верьте в чудеса — прямо полагайтесь на них.

6. Работа в составе группы жизненно важна — она позволяет вам упрекать в неудачах кого-нибудь другого.

7. Записывание полученных данных весьма существенно — оно показывает, что вы все-таки что-то делали.

8. Что бы не произошло, всегда найдется тот, кто скажет, что это имело место в соответствии с его предположением.

9. Величина, к которой что-то добавляют, что-то из нее вычитают, которую умножают и делят, чтобы получить правильный ответ, называется константой.

10. Вероятность того, что опыт удастся, обратно пропорциональна его желательности.

11. Эксперименты должны быть воспроизводимы: они не всегда должны получаться в одних и тех же условиях. Если эксперимент получается, следует провести заведомо неправильный опыт.

12. Эксперимент можно считать удачным, если пришлось отбросить не более половины полученных данных.

13. Стремясь к аккуратности, сначала проведите кривую, потом наносите экспериментальные данные.

14. Если эксперимент совсем не удался, его всегда можно использовать как отрицательный пример.

15. Подпись преподавателя в зачетке автоматически стирает из памяти все сведения о проделанной работе [56].

6.26. ЭВОЛЮЦИЯ СТУДЕНТА

Первокурсник. Пуглив. Чутко реагирует на ласку и выпечку в буфете. Предпочитает держаться в группе из 15–20 особей. К студенческому билету отношение трепетное. На занятия приходит за 20 мин до открытия университета. Сон нервный, неглубокий. Речь разборчива и понятна. При упоминании таких слов, как сессия, экзамен, испытывает

страх и ведет себя, как африканская птица страус. Среда обитания: все виды библиотек и студенческих столовых. Цель существования: любыми путями получить все книги из списка рекомендуемой литературы.

Второкурсник. Наглый, голодный и горластый. Реагирует только на съестное. На контакт идет из чисто корыстных побуждений. В группы объединяется редко. Студенческий билет применяет как средство индивидуальной защиты от кондукторов и вахтеров. Выбор лекций для посещения происходит случайным образом. Сон крепкий, с цветными снами. Речь при желании можно разобрать. Все еще боится сессии, но пугает ею первокурсников, с интересом наблюдая, как они уподобляются страусу. Среда обитания: поближе к пище. Цель существования: добыча курсовых и лабораторных у старших курсов.

Третьекурсник. Задумчив вследствие частой игры на компе. На провокации со съестным поддается редко, подозрителен. При опасности дергается указательный палец правой руки в поисках кнопки мыши. Студенческий билет часто теряется, затем находится и обмывается. В университет ходит регулярно за стипендией. Сон крепкий, но спит редко. Ночами ковыряется в компьютере, где и засыпает. Речь быстрая, несвязная, почти неразборчива, изобилует ненормативной компьютерной лексикой. Страх перед экзаменом атрофирован. Среда обитания: где придется. Цель существования: найти все книги из списка рекомендованной литературы, взятых на первом курсе, и сдать их.

Четверокурсник. На лекции заходит случайно, но вопрос «Что такое лекция?» ставит его в тупик. Спит крепко. Храпит, чем очень огорчает преподавателей. Видит сны исключительно по профилю подготовки. В совершенстве владеет 3–4 языками программирования, вследствие чего напрочь не знает русского языка. При случайных встречах со студенческим билетом долго и с интересом его рассматривает. Самая высокая активность наблюдается во время сдачи экзаменов — боится забыть дату очередного экзамена. Среда

обитания: везде и регулярно. Цель существования определить невозможно.

Пятикурсник. Виртуален — его существование подтверждается лишь наличием фамилии в списке деканата. Практически не взаимодействует с реальностью. Определение его уровня знаний на экзамене — «проблема квантовых измерений». О среде обитания и его интересах имеются лишь смутные догадки. К концу 5-го курса переходит в метастабильное состояние — разобраться в скачанном из Интернета дипломе [199].

6.27. ПЛАНИРОВАНИЕ НАУЧНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ

Однажды известному советскому физику и химику, профессору МГУ **А. В. Фросту** (1906–1952) предложили составить поквартальный план работы его лаборатории на будущий год. Фрост представил на рассмотрение начальства такой план:

первый квартал — закрыть первое начало термодинамики;
второй квартал — закрыть второе начало термодинамики;
третий квартал — закрыть третье начало термодинамики;
четвертый квартал — открыть четвертое начало термодинамики.

Больше к нему с подобными глупостями не приставали [56].

6.28. НЕСТАНДАРТНОЕ МЫШЛЕНИЕ

Ж. Гей-Люссак (1778–1850) — крупнейший французский химик и физик, автор одноименного газового закона — во время одного из своих химических опытов повредил один глаз. Как-то раз он столкнулся с епископом Сиезским — самонадеянным богословом, попавшим в число членов Французской академии «по знакомству». Епископ ядовито заметил:

— Не понимаю, как можно быть ученым, имея всего один глаз! Что можно увидеть одним глазом?

— Да уж побольше вашего, — не растерялся Гей-Люссак. — Вот, например, я вижу у вас два глаза, а вы у меня — только один!

Когда в 1802 г. Гей-Люссак проводил в Париже научные опыты, ему понадобились стеклянные трубки. Качественные трубки в то время делали стеклодувы в Германии. Ученый их заказал, но французские таможенники наложили на посылку такую высокую пошлину, что Гей-Люссак не смог ее выкупить. Посылку отправили обратно в Германию.

Об этом узнал немецкий ученый **А. Гумбольд** (1769–1859) и решил помочь Гей-Люссаку: он посоветовал стеклодувам при отправке посылки запаять концы трубок и наклеить на них этикетки с надписью «Осторожно! Немецкий воздух!» Так как таможенного тарифа на воздух не существовало, то трубки дошли до Гей-Люссака без всяких пошлин [175]

6.29. КЕЛЬВИН, УЧЕНИКИ И ОСЛЫ

Великий английский физик **Томсон (лорд Кельвин)** (автор одной из формулировок второго начала термодинамики) однажды вынужден был отменить свою лекцию и написал на доске: «Professor Tomson will not meet his classes today» (Профессор Томсон не сможет встретиться сегодня со своими учениками).

Студенты решили подшутить над профессором и стерли букву «с» в слове «classes» (англ. *lasses* — любовницы). На следующий день, увидев надпись, Томсон не растерялся, а, стерев еще одну букву «l» в том же слове, молча ушел (англ. *asses* — ослы) [145].

6.30. НЕРНСТ И ПРИРОДА

На столе у профессора **Вальтера Нернста** (немецкого физика, сформулировавшего в 1906 г. третье начало термодинамики) стояла пробирка с органическим соединением дифенилметаном, температура плавления которого 26 °С. Если в 11 утра препарат таял, Нернст говорил: «Против природы не поперешь!» И уводил студентов заниматься плаванием.

В свободное время Нернст разводил карпов. Однажды кто-то глубокомысленно заметил: «Странный выбор. Кур разводить и то интереснее». Нернст невозмутимо ответил: «Я развожу таких животных, которые находятся в термодинамическом равновесии с окружающей средой. Разводить теплокровных — это значит обогревать на свои деньги мировое пространство» [145, 158].

6.31. МЕНДЕЛЕЕВ И ... ЧЕМОДАНЫ

В ст. 1.6 (с. 18) уже упоминалось, что русский ученый **Д. И. Менделеев** (1834–1907) был разносторонне одаренным человеком. Кроме науки, Д. И. Менделеев много времени посвящал также переплетному делу и... изготовлению чемоданов. Рассказывают такой случай. Однажды ученый покупал в одной лавке материалы.

— Кто это? — спросили лавочника.

— Неужели не знаете? — удивился тот. — Известный чемоданных дел мастер Менделеев!

Менделеев был очень польщен этой характеристикой [175].

6.32. ОБЪЯСНЕНИЕ БОРА

Датский физик **Нильс Бор** (1885–1962) — один из пионеров физики XX в., основатель копенгагенской школы квантовой механики. Помимо выдающихся научных достижений, он стал буквально отцом и наставником для целого поколения европейских и американских физиков-теоретиков и пользовался глубочайшим уважением даже со стороны ученых, принципиально расходившихся с ним во взглядах.

Рассказывают, что Бор часто приглашал своих учеников и коллег в гости к себе на дачу, расположенную на одном из прибрежных датских островков. Однажды среди гостей оказался один молодой физик, переживавший в то время ломку юношеского мировоззрения в сторону рационализма и настроенный очень воинственно (в научном смысле, конечно). И он заметил над входной дверью дачного домика Бора прибитую гвоздем лошадиную подкову.

— Но вы же, профессор Бор, — возмутился он, — не верите во всю эту чушь, будто бы подкова приносит удачу?!

— Конечно, не верю, — улыбнулся в ответ Бор. — Главное, что это работает, а веришь ты в это или нет — не суть важно [136, 175].

6.33. БОР И СИЛА ВОООБРАЖЕНИЯ

Вот еще одна история из биографии Н. Бора в бытность его студентом Копенгагенского университета.

На квалификационном экзамене по физике ему попался следующий вопрос: «Объясните, как рассчитать высоту небоскреба с помощью барометра?» Хотя Бор ясно понимал, что такой вопрос подталкивает к применению барометрической формулы, он, как потом признавался, был сыт по горло школой и колледжем, где учителя навязывают ученикам свой способ мышления, не всегда приемля нестандартные решения учеников. Поэтому он ответил так: «Привяжите кусок прочной веревки к основанию барометра, затем опустите барометр на веревке с крыши небоскреба так, чтобы он достал до земли. Длина веревки и длина барометра в сумме дадут высоту небоскреба».

«Высокооригинальный» ответ настолько поразил преподавателя (в плохом смысле этого слова), что Бор получил «неуд». Бор подал жалобу, утверждая, что его ответ абсолютно точен. Случай был и впрямь сложный, т.к. ответ действительно был абсолютно полным и верным! С другой стороны, экзамен был по физике и от Бора требовалась демонстрация применения знаний в этой области.

Руководство университета попросило независимого судью решить это дело, и в качестве такого судьи выбор пал на известного физика Э. Резерфорда. Резерфорд предложил Бору попытаться ответить еще раз и за шесть минут представить устный ответ, который показал бы знание хотя бы основных принципов физики. В течение первых пяти минут Бор сидел молча, собираясь с мыслями. Резерфорд напомнил ему, что время подходит к концу, на что Бор ответил, что у него есть несколько абсолютно точных вариантов решения и он не

знает, какой из них выбрать. Резерфорд предложил высказать все варианты по очереди. Вот варианты ответов Бора:

1) вы можете поднять барометр на крышу и скинуть его оттуда, при этом надо засечь время, за которое он достигнет земли. Высота здания в таком случае может быть рассчитана по формуле $H = gt^2/2$. К сожалению, в таком случае теряется барометр;

2) если стоит солнечная погода, вы можете измерить длину барометра, а затем вычислить отношение полученного значения к длине его тени от Солнца. Затем вы измеряете длину тени небоскреба и находите решение из свойства подобных треугольников;

3) если вы хотите себя показать настоящим ученым, то можете привязать барометр к веревке и получить, таким образом, математический маятник. Качая его на земле и на крыше, можно определить периоды малых колебаний маятника, а по ним из формулы для периода $T = 2\pi\sqrt{l/g}$ рассчитать разницу в ускорении свободного падения g , которое, как известно, зависит от расстояния h от поверхности Земли: $g = \gamma M_3 / (R_3 + h)^2$. Высота здания находится путем вычисления разницы между этими расстояниями;

4) если пожарная лестница находится на внешней стене небоскреба, будет легче пройти ее и вычислить длину небоскреба в барометрах*, которое затем необходимо умножить на длину прибора;

5) конечно, если вы — скучный сторонник консервативных методов, то можете использовать барометр для измерения давления воздуха на крыше небоскреба и на земле, перевести разницу в метры, используя барометрическую формулу, и получить искомую высоту здания;

6) но, несомненно, лучшим способом было бы найти управляющего зданием и сказать ему: «Если хотите получить отличный новенький барометр, всего лишь скажите мне высоту этого небоскреба» [199].

*Сразу же на память приходит измерение длины удава в попугаях.

6.34. ОБ ИСПАРЕНИИ ОЦЕНОК

На одном экзамене известный физик и химик **И. А. Каблуков** (1857–1942) попросил одного студента рассказать, как в лаборатории получают водород.

— Из ртути, — ответил тот.

Каблуков удивился:

— Как это из ртути?! Обычно говорят из цинка, а вот из ртути — это что-то оригинальное. Напишите-ка реакцию.

Студент пишет $\text{Hg} = \text{H} + g$ и говорит:

— Ртуть нагревают и она разлагается на H и g . H — водород, он легкий и поэтому улетает, а g — ускорение силы тяжести, тяжелое, остается.

Академик не растерялся:

— За такой ответ надо ставить пятерку. Давайте зачетку. Только пятерку я сначала тоже подогрею: $5 = 3 + 2$. «Три» улетает, а «два» остается [56].

6.35. ЛЕГЕНДА О РЕДКОМ МЕТАЛЛЕ

О водороде ходят легенды, которые в науке называют гипотезами. Так вот, о водороде ходят гипотезы, что в твердом состоянии он — металл.

Правда, довести водород до такого состояния пока что не удалось, во всяком случае, на Земле его не довели до такого состояния. Но на других планетах уже довели — об этом тоже ходят гипотезы.

На Земле водород — газ, который встречается на каждом шагу и запросто вступает в любые соединения. В соединение с кислородом (вода), в соединение с углеродом (что-то живое). Металл водород вряд ли стал бы с кем-то соединяться, он бы существовал сам по себе. И это понятно: ведь по прочности он мог бы заменить сталь, а по редкости мог бы заменить золото.

На Земле давно пора заменить сталь и золото, и это с успехом сделал бы металл водород. Зачем же ему с кем-то соединяться, если он один может всех заменить? В первую очередь он бы заменил воду. Разве станет металл рожать

воду, даже если этот металл — водород? Во вторую очередь он бы заменил кислород — старый, добрый земной кислород, к которому мы все так привыкли. Его бы, конечно, не было без воды. Очень многое изменилось бы на Земле, как, возможно, изменилось и на других планетах. Мы бы, наверно, и не узнали своей Земли...

А пока о водороде ходят легенды. Легенды, которые в науке называют гипотезами. С той разницей, что подтверждение легенд надо искать в прошлом, а подтверждение гипотез — всегда в будущем... [65]

6.36. О НЬЮТОНЕ НА КВАДРАТЕ

В загробном мире Архимед, Паскаль и Ньютон играют в прятки. Архимеду вышло водить, и он, закрыв глаза, начинает считать. Паскаль убегает, а Ньютон оглядывается, берет палку, рисует вокруг себя квадрат со стороной 1 м и становится внутрь квадрата. Архимед заканчивает считать, открывает глаза и видит Ньютона:

— О, я вижу Ньютона!

— Э, нет! Ньютон на метр квадратный — это Паскаль! [175]

6.37. ЧТО ТАКОЕ ОКИСЛЕНИЕ!

Разговор ведут два полена.

— Окисляемся, браток?

— Окисляемся.

— Ну и как оно? Ничего?

— Ничего.

— Что-то ты больно спешишь. Окисляться надо медленно, с толком, с пониманием...

— А чего тянуть? Раз — и готово!

— Это смотря как готово... Ты окисляйся по совести, не почем зря. У меня в этом деле опыт есть, я уже три года тут окисляюсь...

Окисляются два полена. Одно медленно, другое быстро. Быстро — это значит, горит. Медленно — это значит, гниет. Вот какие бывают окисления [65].

6.38. ЗНАЕТЕ ЛИ ВЫ, ЧТО...

- Бывают ветераны броуновского движения [209].
- Скоро весь научный мир отметит 200-летие со дня рождения Кельвина или, что то же самое, — 73-летие Цельсия [209].
- Б.Паскаль повторял опыт Торричелли по доказательству существования давления атмосферы не только с водой, но и с вином — вино во Франции было дешевле воды! [43]
- Первоначально идеальный газ (модель, в которой пренебрегают взаимодействием молекул и их размерами) назывался **совершенным газом**. Эта модель была введена в середине XIX в. немецким физиком **Р. Клаузиусом** (1822–1888) [168].
- Одна лошадиная сила — это сила, которую развивает лошадь ростом один метр и весом один килограмм. Эта лошадь хранится в Париже в палате мер и весов [194].
- Нечистая сила — это произведение нечистой массы на нечистое ускорение, а божественная сила — божественной массы на божественное ускорение [194, 200].
- По мнению физиков, красивая девушка — всего лишь удачное сочетание атомов и молекул, находящихся в термодинамическом равновесии [200].
- Река Ганг в Индии считается «священной», и это неспроста. Ее водой ежедневно умывается несколько миллионов человек, однако это не приводит к эпидемиям, как можно было бы ожидать. Все дело в том, что в водах Ганга растворено значительное количество серебра, обладающего бактерицидными свойствами. Вода из этой реки в открытых сосудах не портится даже при 40-градусной жаре [5].
- Американцы в течение долгого времени для закалки стали возили воду из Англии, так как по их мнению хорошую закалку можно было сделать только в английской воде [13].

- В бешеном огурце, пока он зреет, накапливаются газы, и к моменту созревания их давление достигает 3 атм. Неожиданно огурец с треском отрывается от своей ножки и подпрыгивает, а из отверстия, где только что была ножка плода, бьет на 6–8 м липкий сок с семенами [143].
- Слово «температура» с латинского означает «смесь». О бронзе, например, раньше говорили, что она — «температура олова и меди», т. е. градус теплоты отражал крепость смеси. До сих пор сохранился обычай крепость вина (смеси воды и спирта) измерять в градусах [66, 169, 208].
- Обычное стекло способно растворяться в воде, и вместе со стаканом горячего чая мы каждый раз выпиваем около 10^{-4} г стекла [25].
- С бородой мужчинам теплее, и это ведет к неприятному для них термодинамическому следствию. Физиологи обнаружили, что если зимой утепление нижней части лица бородой действует положительно, то летом, особенно при физических усилиях, голова и мозг бородатого мужчины перегреваются. Это ведет к тому, что чем больше и гуще борода, тем сильнее выпадают волосы на голове (чаще образуется лысина) для охлаждения мозга [77].
- В наших местах произрастает растение **ясенец**, которое выделяет эфирные соединения. Если в жаркий солнечный безветренный день к ясенцу поднести зажженную спичку, то над ним вспыхнет пламя и тут же погаснет, само растение от огня не страдает. Отсюда народное название этого растения — «неопалимая купина». Руками трогать растение не рекомендуется — можно получить ожог с долго незаживающими язвами [143].
- Коэффициентом полезного действия называется отношение рожденной мышки к родившей ее горé [65].
- Физическая работоспособность у женщин на 30% ниже, чем у мужчин того же возраста. Женщины способны поднимать на 30–50% меньше тяжести, чем мужчины. И только 2% женщин обладают в среднем такой же работоспособностью, как мужчины. Значит, женщинам нельзя выполнять работы, связанные с большими физическими на-

грузками, — это приводит к их преждевременному физическому износу [162].

- Помимо всем известных классических паровозов, существовали также **электропаровозы**, в которых вода в котле нагревалась не горением угля, а с помощью электрического тока от контактной сети. Такие локомотивы использовались в Швейцарии во время Второй мировой войны из-за того, что не хватало угля, но было доступно электричество от множества гидроэлектростанций [191].
- Если собрать воедино весь уголь, находящийся в недрах нашей планеты, то получится куб со стороной 21 км. Знаменитая гора Эверест (высота 8,8 км) выглядела бы по сравнению с ним лилипутом [164].
- Помимо трех известных формулировок второго начала термодинамики (Клаузиуса, Кельвина и через энтропию) существует и современная четвертая: **холодильник не работает, если он не включен в розетку**. Она полностью эквивалентна предыдущим и всего лишь означает, что самопроизвольно без совершения внешней работы (источником которой в данном случае является электрическая сеть) нельзя передать тепло от холодного тела к горячему [136].
- Желудок у котенка не больше наперстка, следовательно, те 2 л молока, которые он способен выпить за час, находятся в его желудке под давлением 50 000 атм, что в 10 раз больше давления в эпицентре ядерного взрыва [199].
- Пожарные иногда в воду для тушения пожаров добавляют порошок, т.к. он после сгорания связывает кислород, затрудняя тем самым процесс горения [5].

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

Книжные и журнальные источники

1. *Апресов С.* Реактивный двигатель своими руками / С. Апресов, Д. Горячкин // Популярная механика. — 2013. — № 8. — С. 54–57; 2013. — № 9. — С. 68–71.
2. *Асламазов Л. Г.* Удивительная физика / Л. Г. Асламазов, А. А. Варламов. — М.: Наука, 1988. — 160 с. — (Б-чка «Квант». Вып. 63).
3. *Базаров И. П.* Заблуждения и ошибки в термодинамике / И. П. Базаров. — 2-е изд., испр. — М.: Едиториал УРСС, 2003. — 120 с.
4. *Балабанов В. И.* Нанотехнологии. Наука будущего / В. И. Балабанов. — М.: Эксмо, 2009. — 256 с. — (Сер. «Открытия, которые потрясли мир»).
5. *Баландин Б.* 10 000 вопросов для очень умных / Б. Баландин. — М.: РИПОЛ классик, 2007. — 512 с.
6. *Белоконева О.* На пути к ветру и солнцу / О. Белоконева // Наука и жизнь. — 2011. — № 9. — С. 2–6.
7. *Билимович Б. Ф.* Тепловые явления в технике : пособие для учащихся / Б. Ф. Билимович. — М.: Просвещение, 1981. — 96 с.
8. *Билимович Б. Ф.* Физические викторины в средней школе : пособие для учителей / Б. Ф. Билимович. — 3-е изд., перераб. — М.: Просвещение, 1977. — 159 с.
9. *Блудов М. И.* Беседы по физике : учеб. пособие для учащихся / М. И. Блудов; под ред. Л. В. Тарасова. — 3-е изд., перераб. — Ч. I. — М.: Просвещение, 1984. — 207 с.
10. *Блюменфельд Л. А.* Информация, термодинамика и конструкция биологических систем / Л. А. Блюменфельд // Соросовский образовательный журнал. — 1996. — № 7. — С. 88–92.
11. *Богданов К. Ю.* Прогулки с физикой / К. Ю. Богданов. — М.: Бюро Квантум, 2006. — 192 с. — (Б-чка «Квант». Вып. 98).

12. *Богданов К. Ю.* Физик в гостях у биолога / К. Ю. Богданов. — М.: Наука, 1986. — 144 с. — (Б-чка «Квант». Вып. 49).
13. *Бокштейн Б. С.* Атомы блуждают по кристаллу / Б. С. Бокштейн; под ред. Л. Г. Асламазова. — М.: Наука, 1984. — 208 с. — (Б-чка «Квант». Вып. 28).
14. *Бокштейн Б. С.* Почему и как движутся атомы в твердых телах / Б. С. Бокштейн // Соросовский образовательный журнал. — 1995. — № 1. — С. 108–115.
15. *Бокштейн Б. С.* Термодиффузия / Б. С. Бокштейн // Соросовский образовательный журнал. — 1999. — № 4. — С. 40–43.
16. *Болховитинов В. Н.* Твое свободное время (занимательные задачи, опыты, игры) / В. Н. Болховитинов, Б. И. Колтовой, И. К. Лаговский. — М.: Детская лит-ра, 1970. — 464 с.
17. *Босс В.* Интуиция и математика / В. Босс. — М.: Айрис-пресс, 2003. — 192 с.
18. *Бретшнайдер С.* Свойства газов и жидкостей. Инженерные методы расчета / С. Бретшнайдер; пер. с польск. под ред. П. Г. Романкова. — М.-Л.: Химия, 1966. — 536 с.
19. *Бродянский В. М.* Вечный двигатель — прежде и теперь. От утопии — к науке, от науки — к утопии / В. М. Бродянский. — М.: Энергоатомиздат, 1989. — 256 с. — (Серия «Научно-популярная б-ка школьника»).
20. *Бутиков Е. И.* Физика в примерах и задачах / Е. И. Бутиков, А. А. Быков, А. С. Кондратьев. — 3-е изд., испр. и доп. — М.: МЦНМО, 2008. — 516 с.
21. *Бухбиндер И. Л.* Фундаментальные взаимодействия / И. Л. Бухбиндер // Соросовский образовательный журнал. — 1997. — № 5. — С. 66–73.
22. *Вайскопф В.* Наука и удивительное. Как человек понимает природу / В. Вайскопф; пер. с англ. А. С. Компанейца. — М.: Наука, 1965. — 228 с.
23. *Ванклив Дж.* Занимательные опыты по физике / Дж. Ванклив; пер. с англ. Н. Липуновой. — М.: АСТ; Астрель, 2008. — 254 с.
24. *Варикаш В. М.* Физика в живой природе : книга для учащихся / В. М. Варикаш, Б. А. Кимбар, И. М. Варикаш. — Минск: Народная асвета, 1984. — 126 с.
25. *Венецкий С. И.* Рассказы о металлах / С. И. Венецкий. — 3-е изд. — М.: Металлургия, 1979. — 240 с.
26. *Вешняковская Е.* Торф как национальная идея / Е. Вешняковская // Наука и жизнь. — 2011. — № 4. — С. 44–54.

27. Вигдорovich Д. Голодание мозга — страдания тела / Д. Вигдорovich // Наука и жизнь. — 2013. — № 10. — С. 40–45.
28. Войнилович П. Источники энергии / П. Войнилович, П. Албычев; под. ред. проф. В. И. Лебедева. — М.: Госкультпросветиздат, 1950. — 56 с.
29. Воынский М. С. Необыкновенная жизнь обыкновенной капли / М. С. Воынский. — М.: Знание, 1986. — 144 с. — (Сер. «Наука и прогресс»).
30. Гальперштейн Л. Забавная физика : науч.-популяр. книга / Л. Гальперштейн. — Переизд., доп. и перераб. — М.: Дет. лит., 1993. — 255 с.
31. Гальперштейн Л. Здравствуй, физика! / Л. Гальперштейн. — М.: Дет. лит., 1967. — 208 с. — (Б-чка пионера «Знай и умей»).
32. Гальперштейн Л. Я. Лаборатория юного физика / Л. Я. Гальперштейн, П. П. Хлебников. — М.: Детгиз, 1962. — 128 с. — (Сер. «Школьная б-ка»).
33. Гарифуллин Ф. А. Возникновение конвекции в горизонтальных слоях жидкости / Ф. А. Гарифуллин // Соросовский образовательный журнал. — 2000. — Т. 6. — № 8. — С. 108–114.
34. Гегузин Я. Е. Пузыри / Я. Е. Гегузин. — М.: Наука, 1985. — 176 с. — (Б-чка «Квант». Вып. 46).
35. Гельфер Я. М. История и методология термодинамики и статистической физики : учебное пособие / Я. М. Гельфер. — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Высш. шк., 1981. — 536 с.
36. Гершензон Е. М. Молекулярная физика : уч. пособие для высш. пед. уч. зав. по спец. «Физика» / Е. М. Гершензон, Н. Н. Малов, А. Н. Мансуров. — М.: Academia, 2000. — 265 с.
37. Голицын М. В. Альтернативные энергоносители / М. В. Голицын, А. М. Голицын, Н. В. Пронина; отв. ред. Г. С. Голицын. — М.: Наука, 2004. — 159 с.
38. Горев Л. А. Занимательные опыты по физике в 6–7 классах : пособие для учителей / Л. А. Горев. — М.: Просвещение, 1977. — 152 с.
39. Гроссе Э. Химия для любознательных. Основы химии и занимательные опыты / Э. Гроссе, Х. Вайсмантель // Интернет-журнал «Домашняя лаборатория». — 2007. — № 8. — С. 308–519.
40. Губарев В. Академик Лев Зеленый: дыхание марсианских пустынь / В. Губарев // Наука и жизнь. — 2013. — № 10. — С. 14–26.

41. Гулиа Н.В. Накопители энергии / Н.В. Гулиа; отв. ред. М.Ю. Очан. — М.: Наука, 1980. — 152 с. — (Сер. «Наука и технический прогресс»).
42. Гулиа Н.В. Удивительная механика. В поисках «энергетической капсулы» / Н.В. Гулиа. — М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2006. — 175 с. — (Сер. «О чем умолчали учебники»).
43. Гулиа Н.В. Удивительная физика / Н.В. Гулиа. — М.: ЭНАС, 2012. — 416 с. — (Сер. «О чем умолчали учебники»).
44. Гулиа Н.В. Физика: парадоксальная механика в вопросах и ответах / Н.В. Гулиа. — М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2004. — 82 с.
45. Гуревич Ю.Г. Булат. Структура, свойства и секреты изготовления : монография / Ю.Г. Гуревич. — Курган: Изд-во Курганского гос. ун-та, 2006. — 158 с.
46. Гурьянов А. Трубки завтрашнего мира / А. Гурьянов // Наука и жизнь. — 2010. — № 2. — С. 16–21.
47. Дворсон А.Н. Термодинамика и молекулярная физика : факультативный курс для средней школы / А.Н. Дворсон. — СПб: СММО Пресс, 2002. — 272 с.
48. Дегтярев К. Тепло Земли / К. Дегтярев // Наука и жизнь. — 2013. — № 10. — С. 31–37.
49. Денисов С. Указатель физических эффектов и явлений для изобретателей и рационализаторов : справочник / С. Денисов, В. Ефимов, В. Зубарев, В. Кустов. — Обнинск, 1977. — 214 с.
50. Джеймс П. Древние изобретения / П. Джеймс, Н. Торп; пер. с англ. — Мн.: ООО «Попурри», 1997. — 768 с.
51. Донат Б. Физика в играх / Б. Донат; пер. с немец.; перераб. А. Абрамова. — М.-Л.: Детиздат ЦК ВЛКСМ, 1937. — 244 с.
52. Драбкин Л.М. Солнечные электростанции / Л.М. Драбкин // Соросовский образовательный журнал. — 1999. — № 4. — С. 105–109.
53. Займовский В.А. Необычные свойства обычных металлов / В.А. Займовский, Т.Л. Колупаева; под ред. Л.Г. Асламзова. — М.: Наука, 1984. — 192 с. — (Б-чка «Квант». Вып. 32).
54. Замятина Н. Елочки-иглочки / Н. Замятина // Наука и жизнь. — 2005. — № 12. — С. 156–159.
55. Занимательно о физике и математике / сост. С.С. Кротов, А.П. Савин. — М.: Наука, 1987. — 144 с. — (Б-чка «Квант». Вып. 50).
56. Золотов Ю.А. Химики еще шутят / Ю.А. Золотов. — М.: Либликом, 2009. — 80 с.

57. Золотухин И. В. Фуллерит — новая форма углерода / И. В. Золотухин // Соросовский образовательный журнал. — 1996. — № 2. — С. 51–56.
58. Кипяток в металлургии // Юный техник. — 2013. — № 3. — С. 24.
59. Кипяток по-новому // Юный техник. — 2013. — № 3. — С. 22–24.
60. Кириллин В. А. Энергетика сегодня и завтра / В. А. Кириллин. — М.: Педагогика, 1983. — 128 с. — (Сер. «Б-чка Детской энциклопедии “Ученые — школьнику”»).
61. Китайгородский А. И. Невероятно — не факт / А. И. Китайгородский. — М.: Мол. гвардия, 1972. — 257 с. — (Сер. «Эв-рика»).
62. Кондрашов А. П. Новейшая книга фактов / А. П. Кондрашов. — Т. 3. Физика, химия и техника. История и археология. Разное. — М.: Рипол Классик, 2008. — 450 с.
63. Кондрашов А. П. Новейший справочник уникальных фактов в вопросах и ответах / А. П. Кондрашов. — М.: Рипол Классик, 2009. — 672 с.
64. Красночуб А. О теплопередаче и не только / А. Красночуб // Квант. — 2010. — № 5. — С. 43–46.
65. Кривин Ф. Несерьезные Архимеды / Ф. Кривин. — М.: Мол. гвардия, 1971. — 224 с. — (Сер. «Эврика»).
66. Кричевский И. Р. Термодинамика для многих / И. Р. Кричевский, И. В. Петрянов. — М.: Педагогика, 1975. — 160 с. — (Сер. «Б-чка Детской энциклопедии “Ученые — школьнику”»).
67. Кудрявцев П. С. История физики и техники : уч. пособие для студентов пед. ин-тов П. С. Кудрявцев, И. Я. Конфедератов. — М.: Учпедгиз, 1960. — 508 с.
68. Кузнецов А. П. Анализ в физике / А. П. Кузнецов, С. П. Кузнецов, А. В. Савин, Н. В. Станкевич. — Саратов: Изд-во «Научная книга», 2008. — 90 с.
69. Кулик Н. Чудо, которого нет / Н. Кулик // Наука и жизнь. — 2011. — № 5. — С. 72–73.
70. Ланге В. Н. Физические парадоксы, софизмы и занимательные задачи : учебное пособие / В. Н. Ланге. — М.: Просвещение, 1967. — 166 с.
71. Ланина И. Я. Внеклассная работа по физике / И. Я. Ланина. — М.: Просвещение, 1977. — 224 с. — (Сер. «Б-ка учителя физики»).

72. *Лебедев В. И.* Занимательная техника в прошлом / В. И. Лебедев. — Л.: Время, 1927. — 194 с.
73. *Лисовский Л. П.* Трение в природе и технике / Л. П. Лисовский, А. Е. Саломонович; под ред. проф. С. Э. Хайкина. — М.-Л.: Гостехиздат, 1948. — 52 с. — (Сер. «Научно-популярная б-ка»).
74. *Льоцци М.* История физики / М. Льоцци; пер. с итал. Э. Л. Бурштейна. — М.: Мир, 1970. — 464 с.
75. *Майер В. В.* Кумулятивный эффект в простых опытах / В. В. Майер. — М.: Наука, 1989. — 192 с.
76. *Майер В. В.* Простые опыты со струями и звуком : учеб. руково / В. В. Майер. — М.: Наука, 1985. — 128 с. — (Сер. «Б-чка физико-математической школы»).
77. *Майоров А. Н.* Физика для любознательных, или О чем не узнаешь на уроке / А. Н. Майоров. — Ярославль: «Академия развития», «Академия, К^о», 1999. — 176 с. — (Сер. «Это мы не проходили»).
78. *Макаровец Н.* Ох, лето красное! Любил бы я тебя, когда б не зной... / Н. Макаровец, В. Анохин, Е. Свиридов // Наука и жизнь. — 2011. — № 4. — С. 99–102.
79. *Макеева Г. П.* Физические парадоксы и занимательные вопросы / Г. П. Макеева, М. С. Цедрик. — 3-е изд., перераб. — Мн.: Нар. асвета, 1981. — 144 с.
80. *Маковецкий П. В.* Смотри в корень! Сборник любопытных задач и вопросов / П. В. Маковецкий. — 3-е изд., испр. и доп. — М.: Наука, 1976. — 448 с.
81. Материалы XXI века // Юный техник. — 2013. — № 1. — С. 20–23.
82. *Мезенцев В.* Энциклопедия чудес / В. Мезенцев. — Ф.: Гл. ред. КСЭ, 1990. — 528 с.
83. *Миддлтон У.* История теорий дождя и других форм осадков / У. Миддлтон; пер. с англ. — М.: Гидрометеиздат, 1969. — 198 с.
84. *Миннарт М.* Свет и цвет в природе / М. Миннарт; пер. с голланд. — М.: Наука, 1969. — 360 с.
85. *Мусский С. А.* 100 великих чудес техники / С. А. Мусский. — М.: Вече, 2001. — 432 с.
86. *Низе Г.* Игры и научные развлечения / Г. Низе. — М.: Изд-во детской литературы, 1958. — 160 с.

87. *Никонов А.* Верхом на бомбе. Судьба планеты Земля и ее обитателей / А. Никонов. — СПб.: НЦ ЭНАС, Питер, 2008. — 320 с.
88. Опыты в домашней лаборатории / отв. ред. И. К. Кикоин. — М.: Наука, 1980. — 144 с. — (Б-чка «Квант». Вып. 4).
89. *Орир Дж.* Популярная физика / пер. с англ. под ред. Л. В. Гессена. — М.: Мир, 1964. — 447 с.
90. *Осипов А. И.* Термодинамика вчера, сегодня, завтра. Часть 1. Равновесная термодинамика / А. И. Осипов // Соросовский образовательный журнал. — 1999. — № 4. — С. 79–85.
91. *Осипов А. И.* Энтропия и ее роль в науке / А. И. Осипов, А. В. Уваров // Соросовский образовательный журнал. — 2004. — Т. 8. — № 1. — С. 70–79.
92. *Перельман Я. И.* Занимательная физика. Парадоксы, головоломки, задачи, опыты, замысловатые вопросы и рассказы из области физики / Я. И. Перельман. — Кн. 1. — 14-е изд. / под ред. проф. А. Б. Млодзеевского. — М.-Л.: Гостехиздат, 1947. — 271 с.
93. *Перельман Я. И.* Занимательная физика. Парадоксы, головоломки, задачи, опыты, замысловатые вопросы и рассказы из области физики / Я. И. Перельман. — Кн. 2. — 13-е изд., перераб. и доп. — Л.: Мол. Гвардия, 1936. — 280 с.
94. *Перельман Я. И.* Занимательные задачи и опыты / Я. И. Перельман. — М.: Детгиз, 1959. — 528 с. — (Сер. «Школьная б-ка»).
95. *Перельман Я. И.* Знаете ли вы физику? / Я. И. Перельман. — 3-е изд., перераб. и доп. — М.: Наука, 1992. — 272 с. — (Б-чка «Квант». Вып. 82).
96. *Перельман Я. И.* Наука на досуге: сборник занимательных задач, головоломок, фокусов, игр из области физики, математики, географии, астрономии, метеорологии, химии / Я. И. Перельман, С. В. Глязер, В. И. Прянишников, В. В. Рюмин. — Л.: Мол. гвардия, 1935. — 220 с.
97. *Перельман Я. И.* Физика на каждом шагу / Я. И. Перельман. — М.: АСТ; Астрель: Полиграфиздат, 2010. — 250 с.
98. *Перельман Я. И.* Физическая хрестоматия : пособие по физике и книга для чтения / Я. И. Перельман. — Ч. 1. — Петроград: Изд-во «Сеятель», 1922. — 232 с.
99. *Петрович Н. Т.* Беседы об изобретательстве / Н. Т. Петрович. — М.: Мол. гвардия, 1978. — 192 с. — (Сер. «Эврика»).

100. *Петрянов И. В.* Великий закон / И. В. Петрянов, Д. Н. Трифонов. — М.: Педагогика, 1976. — 124 с. — (Сер. «Б-чка Детской энциклопедии “Ученые — школьнику”»).
101. *Петрянов И. В.* Самое необыкновенное вещество в мире / И. В. Петрянов. — М.: Педагогика, 1975. — 96 с. — (Сер. «Б-чка Детской энциклопедии “Ученые — школьнику”»).
102. *Проценко А. Н.* Энергетика сегодня и завтра / А. Н. Проценко. — М.: Мол. гвардия, 1987. — 220 с. — (Сер. «Эврика»).
103. Пять минут на размышление / по мат. Л. Успенского, А. Студенцова, Я. Перельмана и др. — М.: Госкультпросветиздат, 1950. — 343 с.
104. *Рабиза Ф. В.* Опыты без приборов / Ф. В. Рабиза. — М.: Детская лит-ра, 1988. — 112 с.
105. *Разумовский В. Г.* Творческие задачи по физике / В. Г. Разумовский. — М.: Просвещение, 1966. — 156 с.
106. *Рачлис Х.* Физика в ванне / Х. Рачлис; пер. с англ. — М.: Наука, 1986. — 96 с. — (Б-чка «Квант». Вып. 51).
107. *Роджерс Э.* Физика для любознательных : в 3 т. / Э. Роджерс; пер. с англ. — Т. 1. Материя, движение, сила. — М.: Мир, 1969. — 479 с.
108. *Роджерс Э.* Физика для любознательных : в 3 т. / Э. Роджерс; пер. с англ. — Т. 2. Наука о Земле и Вселенной. Молекулы и энергия. — М.: Мир, 1970. — 656 с.
109. *Рубин С. Г.* Устройство нашей Вселенной / С. Г. Рубин. — Фрязино: Век 2, 2006. — 312 с. — (Сер. «Наука для всех»).
110. *Рыжов К. В.* Сто великих изобретений / К. В. Рыжов. — М.: Вече, 1999. — 528 с.
111. *Савельев И. В.* Курс общей физики : в 3-х т. / И. В. Савельев. — Т. I. Физические основы механики. Колебания и волны. Молекулярная физика и термодинамика. — М.: Наука, 1970. — 512 с.
112. *Сарычева Л. И.* Структура материи / Л. И. Сарычева // Соровский образовательный журнал. — 2000. — Т. 6. — № 2. — С. 113–120.
113. *Седов Е. А.* Одна формула и весь мир. Книга об энтропии / Е. А. Седов. — М.: Знание, 1982. — 176 с.
114. *Семке А. И.* Нестандартные задачи по физике. Для классов естественно-научного профиля / А. И. Семке. — Ярославль: Академия развития, 2007. — 320 с. — (Сер. «В помощь учителю»).

115. *Сергеев Б. Ф.* Жизнь океанских глубин / Б. Ф. Сергеев. — М.: Мол. гвардия, 1990. — 301 с. — (Сер. «Эврика»).
116. *Силин А. А.* Трение и мы / А. А. Силин. — М.: Наука, 1987. — 192 с. — (Б-чка «Квант». Вып. 57).
117. *Слободянюк А. И.* Очень длинные физические задачи / А. И. Слободянюк. — Ч. 1. Задачи 1–9. — Свободно распространяемое с разрешения автора электронное издание. — 55 с.
118. *Смирнов В. А.* Опыты и самоделки по физике / В. А. Смирнов. — Л.: Детгиз, 1955. — 112 с.
119. *Смит Э.* Познавательные опыты в школе и дома / Э. Смит. — М.: Росмэн-Издат, 2001. — 96 с.
120. *Сморodinский Я. А.* Температура / Я. А. Смородинский. — М.: Наука, 1981. — 160 с. — (Б-чка «Квант». Вып. 12).
121. *Соколов Э. Т.* Ряд волшебных изменений: рассказы о фазовых переходах первого рода / Э. Т. Соколов. — Мн.: Выш. шк., 1987. — 224 с. — (Сер. «Мир заним. науки»).
122. *Соловьев А.* Ветренная ветряная энергетика / А. Соловьев, К. Дегтярев // Наука и жизнь. — 2013. — № 7. — С. 42–47.
123. *Сосинский А. Б.* Мыльные пленки и случайные блуждания / А. Б. Сосинский. — М.: МЦНМО, 2000. — 24 с. — (Б-ка «Мат. просвещение»).
124. *Сумбатов А.* Пепел над миром / А. Сумбатов // Наука и жизнь. — 2010. — № 8. — С. 60–62.
125. *Суорц Кл. Э.* Необыкновенная физика обыкновенных явлений : в 2 т. / Кл. Э. Суорц; пер. с англ. — Т. 1. — М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1986. — 400 с.
126. *Сытин В. Г.* Лекции по молекулярной физике : учебное пособие / В. Г. Сытин. — Чебоксары: Чуваш. гос. пед. ун-т, 2009. — 172 с.
127. *Таблицы физических величин : справочник / под ред. акад. И. К. Кикоина.* — М.: Атомиздат, 1976. — 1008 с.
128. *Тарасов Л. В.* Вопросы и задачи по физике (Анализ характерных ошибок поступающих во втузы) : уч. пособие / Л. В. Тарасов, А. Н. Тарасова. — 4-е изд., стереотип. — М.: Высш. шк., 1990. — 256 с.
129. *Тарасов Л. В.* Закономерности окружающего мира : в 3 кн. / Л. В. Тарасов. — Кн. 2. Вероятность в современном обществе. — М.: Физматлит, 2004. — 360 с.
130. *Тарасов Л. В.* Физика в природе : кн. для учащихся / Л. В. Тарасов. — М.: Просвещение, 1988. — 351 с.

131. *Тисандье Г.* Научные развлечения. Знакомство с законами природы путем игр, забав и опытов, не требующих специальных приборов / Г. Тисандье; пер. с франц. под ред. Ф. Павленкова. — 2-е изд., доп. — СПб.: Типография А. М. Котомина, 1885. — 398 с.
132. *Тит Том.* Научные забавы: интересные опыты, самоделки, развлечения / Том Тит; пер. с франц. — 2-е изд. — М.: Изд. дом Мещерякова, 2007. — 224 с.
133. *Тит Том.* Научные забавы. Физика: опыты, фокусы и развлечения / Том Тит; пер. с франц. — М.: АСТ: Астрель, 2007. — 223 с.
134. *Толмачев Л.* Автомобиль, поставивший мир на колеса / Л. Толмачев // Наука и жизнь. — 2011. — № 5. — С. 116–119.
135. *Транковский С.* Десятитысячные доли градуса из бутылки / С. Транковский // Наука и жизнь. — 2010. — № 2. — С. 67.
136. *Трефил Дж.* 200 законов мироздания / Дж. Трефил; пер. с англ. — М.: Гелеос, 2007. — 528 с.
137. *Тульчинский М. Е.* Занимательные задачи-парадоксы и софизмы по физике / М. Е. Тульчинский. — М.: Просвещение, 1971. — 160 с.
138. *Тульчинский М. Е.* Качественные задачи по физике в средней школе : пособие для учителей / М. Е. Тульчинский. — 4-е изд., переработ. и доп. — М.: Просвещение, 1972. — 240 с.
139. *Уокер Г.* Машины, работающие по циклу Стирлинга / Г. Уокер; пер. с англ. — М.: Энергия, 1978. — 152 с.
140. *Уокер Дж.* Физический фейерверк / Дж. Уокер; пер. с англ.; под ред. И. Ш. Слободецкого. — 2-е изд. — М.: Мир, 1988. — 298 с.
141. *Федин С. Н.* Математики тоже шутят / С. Н. Федин. — М.: Книжный дом «Либроком», 2009. — 208 с.
142. *Фен Дж.* Машины, энергия, энтропия / Дж. Фен; пер. с англ. М. Ю. Новикова; под ред. Ю. Г. Рудого. — М.: Мир, 1986. — 336 с.
143. *Физика : занимательные материалы к урокам. 8 кл.* / авт.-сост. А. И. Сёмке. — М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2004. — 152 с. — (Сер. «Портфель учителя»).
144. *Физика в вопросах и ответах* / сост. Е. М. Балдин, П. В. Воробьев, И. Ф. Гинзбург и др.; под общ. ред. В. И. Шелеста. — Новосибирск, 1999. — 44 с.

145. Физики шутят / сост.-перевод. Ю. Конобеев, В. Павлинчук, Н. Работнов, В. Турчин; пер. с англ. — М.: Мир, 1993. — 208 с.
146. Физики продолжают шутить / сост.-перевод. Ю. Конобеев, В. Павлинчук, Н. Работнов, В. Турчин; пер. с англ. — М.: Либроком, 2010. — 232 с.
147. Физическая смекалка. Занимательные задачи и опыты по физике для детей : пособие для начальной и средней школы / техн. ред. С. Костеша. — М.: Омега, 1994. — 256 с.
148. Фрай С. Книга всеобщих заблуждений / С. Фрай, Д. Ллойд, Д. Митчинсон; перевод А. Рахубы. — М.: Фантом Пресс, 2008. — 480 с.
149. Хилькевич С.С. Физика вокруг нас / С.С. Хилькевич. — М.: Наука, 1985. — 160 с. — (Б-чка «Квант». Вып. 40).
150. Цингер А.В. Задачи и вопросы по физике : пособие для студентов учительских институтов / А.В. Цингер; под. к печ. Д.И. Сахаровым и С.Н. Жарковым. — 9-е изд. — М.: Учпедгиз, 1951. — 312 с.
151. Черепанов Г.П. Механика хрупкого разрушения / Г.П. Черепанов. — М.: Наука, 1974. — 640 с.
152. Чернов А.А. Путешествия на воздушном шаре / А.А. Чернов. — Л.: Гидрометеиздат, 1975. — 232 с.
153. Черноуцан А.И. Физические свойства процесса стеклования / А.И. Черноуцан // Соросовский образовательный журнал. — 2001. — Т. 7. — № 3. — С. 103–109.
154. Чирков Ю.В. Занимательно об энергетике / Ю.В. Чирков. — М.: Мол. гвардия, 1981. — 207 с. — (Сер. «Эврика»).
155. Шабалин С.А. Измерения для всех / С.А. Шабалин. — М.: Изд-во стандартов, 1991. — 560 с.
156. Шаскольская М.П. Очерки о свойствах кристаллов / М.П. Шаскольская. — М.: Наука, 1978. — 192 с.
157. Шаскольская М.П. Сборник избранных задач по физике : уч. рук-во / М.П. Шаскольская, И.А. Эльцин; под. ред. С.Э. Хайкина. — 5-е изд., перераб. — М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1986. — 208 с.
158. Шилейко А.В. Информация или интуиция? / А.В. Шилейко, Т.И. Шилейко. — М.: Мол. гвардия, 1983. — 208 с. — (Сер. «Эврика»).
159. Штремель М.А. Разрушение / М.А. Штремель // Соросовский образовательный журнал. — 1997. — № 4. — С. 91–98.

160. Эврика — 75 / сост. Н. А. Лазарев. — М.: Мол. гвардия, 1975. — 339 с. — (Сер. «Эврика»).
161. Эврика — 76 / сост. А. В. Малинов. — М.: Мол. гвардия, 1976. — 336 с. — (Сер. «Эврика»).
162. Эврика — 83–84 / сост. А. Лельевр. — М.: Мол. гвардия, 1984. — 287 с. — (Сер. «Эврика»).
163. Эврика — 87 / сост. А. Лельевр. — М.: Мол. гвардия, 1987. — 318 с. — (Сер. «Эврика»).
164. Эврика — 88 / сост. А. В. Лельевр. — М.: Мол. гвардия, 1988. — 301 с. — (Сер. «Эврика»).
165. Эдельман В. С. Вблизи абсолютного нуля / В. С. Эдельман. — М.: Наука, 1983. — 176 с. — (Б-чка «Квант». Вып. 26).
166. Энциклопедический словарь юного техника / сост. Б. В. Зубков, С. В. Чумаков. — 2-е изд., испр. и доп. — М.: Педагогика, 1987. — 464 с.
167. Энциклопедический словарь юного физика / сост. В. А. Чуянов. — М.: Педагогика, 1984. — 352 с.
168. Энциклопедия для детей. — Т. 16. Физика. — Ч. 1. Биография физики. Путешествие вглубь материи. Механическая картина мира / гл. ред. В. А. Володин. — М.: Аванта+, 2000. — 448 с.
169. Энциклопедия для детей. — Т. 16. Физика. — Ч. 2. Электричество и магнетизм. Термодинамика и квантовая механика. Физика ядра и элементарных частиц / гл. ред. В. А. Володин. — М.: Аванта+, 2000. — 432 с.
170. Эткинс П. Порядок и беспорядок в природе / П. Эткинс; пер. с англ. Ю. Г. Рудого. — М.: Мир, 1987. — 224 с.

Интернет-источники

171. class-fizika.narod.ru, class-fizika.spb.ru, class-fizika-narod.ru — познавательные сайты «КЛАСС!ная физика для любознательных».
172. dic.academic.ru — сайт «Академик»: словари и энциклопедии.
173. elkin52.narod.ru — сайт заслуженного учителя РФ В. Елькина «Занимательная физика в вопросах и ответах».
174. fiz.1september.ru — сайт учебно-методической газеты «Физика».
175. fiz.do.am — сайт «Учителю физики и его ученикам».
176. fizhimlab.ru — сайт «Физхимлаб», посвященный выращиванию кристаллов.

177. fizportal.ru — физический портал для школьников.
178. ido.tsu.ru — сайт института дистанционного образования Томского государственного университета.
179. igrushka.kz — сайт «Игрушка. Энциклопедия мастерства».
180. innovatory.narod.ru — сайт «Профессия изобретатель»: помощь изобретателям в реализации их интеллектуального труда.
181. isachkin-af.ru — сайт А. Ф. Исачкина: все про глобальное потепление.
182. izobretenija.ru — информационно-познавательный сайт «Изобретения, который потрясут мир».
183. khd2.narod.ru — сайт «Perpetuum mobile»: философские мысли и современные идеи получения энергии в удобной форме из неудобной.
184. kristallov.net — сайт, посвященный описанию и классификации минералов и твердых растворов.
185. new.intuit.ru — сайт Национального открытого университета «Интуит».
186. newsdiscover.net — интересные новости со всего мира.
187. n-t.ru — электронная библиотека «Наука и техника».
188. oasiswater.com.ua — доставка питьевой воды «Оазис».
189. physik.ucoz.ru — сайт «Школьная физика» учителя физики А. С. Шептикина.
190. phymathforum.flybb.ru — физико-математический форум.
191. ru.wikipedia.org — свободная энциклопедия «Википедия».
192. simplescience.ru — сайт «Simple science»: научно-популярный Интернет-канал.
193. sh-fizika.ru — сайт «Школьная физика».
194. svetik0566.ucoz.ru — сайт С. Бельтюковой «Физика для лириков и не только».
195. tech-edu.ru — сайт МБОУ ДОД «Центр детского (юношеского) технического творчества “Городской”» г. Липецк.
196. techeniegolfstrim.ru — информационный сайт «Течение Гольфстрим» — все о Гольфстриме и погоде.
197. traditio-ru.org — свободная русская энциклопедия «Традиция».
198. turboart.ru — сайт, посвященный промышленной обработке металлов и неметаллов.
199. www.afportal.ru — научно-познавательный сайт «Астрофизический портал».

200. www.all-fizika.com — сайт «Вся физика».
201. www.automotivehistory.ru — познавательный сайт «История автомобилестроения»: все про автомобили.
202. www.autosecret.net — сайт полезной и интересной информации для автолюбителей.
203. www.chemistry.narod.ru — справочно-информационный сайт «Мир химии».
204. www.evroles-msk.narod.ru — информационный сайт группы компаний «НОК-Сервис»: решение проблем, связанных с экологией и чистотой.
205. www.kovka-pro.ru — информационный сайт по методам обработки металлов.
206. www.kripkrap.ru — сайт «Крип крап»: поделки своими руками.
207. www.nanometer.ru — сайт «Нанометр» нанотехнологического сообщества.
208. www.openclass.ru — образовательный сайт «Открытый класс» сетевых образовательных сообществ.
209. www.prikolist.biz — сайт «Приколист»: портал приколов и юмора.
210. www.proshkolu.ru — бесплатный школьный портал.
211. www.rusactive.ru — сайт «Русская изобретательная компания»: изобретения и патенты.
212. www.stirlingmotors.ru — познавательный сайт «Стирлинг машины».
213. www.vodo-laz.ru — сайт «Человек под водой» для водолазов и аквалангистов.
214. www.vofem.ru/ru — сайт с электронной версией научно-популярного журнала «Вестник опытной физики и элементарной математики», выходявшего в России в 1886–1917 гг.
215. www.ximicat.com — химический online-каталог.
216. zmisuda.jimdo.com — сайт учителя физики М. Е. Харитоновой.

УКАЗАТЕЛЬ ОПЫТОВ И НАБЛЮДЕНИЙ

1. Наблюдение броуновского движения 21
2. Воздушный термоскоп 37
3. Измерение давления с помощью испорченного ртутного барометра 49
4. Опыт с перевернутым стаканом, доказывающий существование атмосферного давления 57
5. Простая автоматическая поилка для домашних животных 59
6. Усовершенствованная автоматическая поилка для домашних животных 60
7. Выдавливание воздуха из нагретого стакана с последующим всасыванием в него воды 67
8. Перенос свечи и отклонение пламени 68
9. Вертушка и тепло руки 70
10. Простейший акваланг 72
11. Картезианский водолаз 73
12. Самодельный всасывающий насос 80
13. Движение стакана на наклонной плоскости при его нагреве 82
14. Фонтанчик внутри нагретой банки 82
15. Фокус со стеклянной трубкой и водой 83
16. Катастрофа (бифуркация) в физической системе 85
17. Наблюдение эффузии газов через микроскопические отверстия воздушных шариков 90
18. Наблюдение эффузии воздуха при его нагревании в керамическом сосуде 91
19. Подбрасывание монет для доказательства неравнозначности различных «макросостояний» 137
20. Экономный теплообмен 151
21. Защитная сетка для предотвращения распространения пламени 162
22. Воздушный отопитель для гаража 165
23. Отопитель из старого холодильника 166
24. Тепловая машина для полива огорода 175
25. Конвекционный тепловой двигатель 176

26. Изгиб горящей спички 178
27. Гидрореактивная паровая лодка 184
28. Модель игрушки «Пьющая птица» 185
29. «Вечный двигатель» на основе кипятильника Франклина 187
30. Ветряной отопитель помещения из мешалки Джоуля 190
31. Сборка бесклапанного пульсирующего воздушно-реактивного двигателя 217
32. Демонстрация принципа холодной стены 301
33. Принцип холодной стены во время приема душа 301
34. Замерзание воды в криофоре (в кипятильнике Франклина) 302
35. Простая демонстрация принципа холодной стены 303
36. Наблюдение за уровнями воды в перевернутом сообщающемся сосуде 304
37. Кипячение жидкости с наночастицами с помощью солнечного света 307
38. Слежение за температурой при нагревании воды 307
39. Повторное кипение чайника при его выключении 308
40. Наблюдение за звуком закипающей воды 309
41. Капля на сильно нагретой поверхности 310
42. Некипение и кипение воды в бутылке, находящейся в кипящей воде 312
43. Кипение воды в бутылке при помощи снега 313
44. Действующая модель гейзера 316
45. Вентилятор и ощущение тепла 318
46. Ощущение тепла в сауне 320
47. Варка яиц в сауне 322
48. Высушивание бани 322
49. Сушка продуктов в холодильнике 323
50. Предотвращение заморозков на садовом участке 328
51. Режеляция льда 332
52. Растапливание льда солью при отрицательной температуре 333
53. Холодильник из соли и льда 333
54. Ледяная каша при замерзании соленой воды 336
55. Звук тающего льда 336
56. Сохранение льда при положительной температуре 337
57. Регулирование микроклимата в погребе 338
58. Простейшие холодильники, основанные на испарении воды 339
59. Остывание холодной и горячей воды 341
60. Наблюдение зависимости плотности воды от температуры 342
61. Бутылка с водой во льду 346
62. Охлаждение жидкости в бутылке 347

63. Наблюдение и предсказание погоды 351
64. Предсказание заморозков 358
65. Примерзание пальца к металлической кружке из морозильника 361
66. Кажущееся различие температур металлического и деревянного предметов 361
67. Приготовление тиксотропной жидкости и изучение ее свойств 382
68. Наблюдение за уровнем воды в стакане с плавающими кусками льда 385
69. Выбрасывание предмета из лодки в бассейне 386
70. Фокус с яйцом в солевом растворе 387
71. Водяные часы из сосуда Мариотта 395
72. Водяной метроном 396
73. Приведение в действие сифона пальцем 399
74. Приведение в действие сифона разрежением 399
75. Приведение в действие сифона инерцией воды 400
76. Модели автоматических сифонов 400
77. Модель сосуда Тантала 404
78. Модель поющей птички Герона 405
79. Модель птицы Филона, стерегущей своего птенца 406
80. Гидродинамический механизм (кумулятивный эффект) 408
81. Таранный водяной насос 409
82. Модель фонтана Герона 411
83. Демонстрация сил поверхностного натяжения с помощью П-образного каркаса 415
84. Опыт Плато 420
85. Наблюдение за радугой и определение диаметров капелек воды 421
86. Видеосъемка падения капельки воды 423
87. Падение капли варенья в чае 423
88. Распад ламинарной водяной струи из крана на капли 423
89. Фотосъемка распада водяной струи из крана на капли 424
90. Наблюдение водяной струи из крана с помощью стробоскопа 424
91. Распад жидкого цилиндра из слюны на капли 424
92. Распад жидкого цилиндра из лака на капли 424
93. Наблюдение капиллярных волн на струе из крана с помощью иголки 425
94. Наблюдение капиллярных волн на струе из крана с помощью ложки 427

95. Разница в массе холодных и горячих капель воды 429
96. Выведение жирных пятен 430
97. Движение воды в конусообразном капилляре 431
98. Приготовление мыльного раствора для выдувания пузырей 434
99. Опыты с мыльными пузырями 435
100. Капиллярные явления между параллельными пластинками 438
101. Самодельное перо из хвоинки сосны 439
102. Мерцание свечи 441
103. «Бездонный» бокал 441
104. Вода в парафинированном решете 443
105. Дозатор воды из решета 443
106. Измеритель коэффициента поверхностного натяжения жидкостей из решета 444
107. Смачивание керосина 444
108. Твердые тела в вибрирующем песке 445
109. Флотация 447
110. Фокус с осмосом 452
111. Закон Генри при наливании воды из водопровода 453
112. Растворение воздуха в воде 454
113. Флотация виноградинки в лимонаде 455
114. Получение углекислого газа 455
115. Хруст суставов 457
116. Разрезание стекла ножницами под водой 473
117. Отжиг и наклеп металлической проволоки 485
118. Тепловой домкрат 490
119. Ослабление струи горячей воды при вытекании из крана 492
120. Тепловой диод 493
121. Модель самобеглого шарика 496
122. Модель самокачающегося теплового двигателя 496
123. Выращивание кристалла соли 498
124. Выращивание «драгоценного» кристалла 502
125. Получение сухого льда 510
126. «Пение» сухого льда 510
127. Тепловой аккумулятор из бигуди 521

ИМЕННОЙ УКАЗАТЕЛЬ

- Авогадро А. 15, 25
Александр Македонский 338, 512
Анаксагор 6, 11
Анаксимандр 5
Анаксимен 5
Андроникашвили Э. Л. 548
Аносов П. П. 513
Аристотель 45, 555
Архимед 102, 584
- Бальяни Д. 46
Банки Д. 200
Бартон У. М. 204
Бернулли Д. 377, 562
Блаженев И. 401
Бойль Р. 24, 77
Больцман Л. 119, 136, 144
Бор Н. 550, 580, 581
Борн М. 473
Брайтон Дж. 213
Бранка Д. 171
Браун Р. 20
Бриджмен П. У. 507
Броунов П. И. 359
Бунзен Г. 315
- Вайс 491
Ван-дер-Ваальс Д. 274
Вант-Гофф Я. Х. 449
Вельсбах К. 102
Верещагин Л. 538
Верн Ж. 428
Вивiani В. 46
- Вигнер Ю. П. 550
Вуд Б. 368
- Гаврилов С. П. 204
Галилей Г. 34, 46, 549
Ганьян Э. 72
Гей-Люссак Ж. 578
Гей-Люссак Ж. Л. 24, 25
Гейм А. 536
Гейтс Б. 568
Гельмгольц Г. 105, 108
Гельмонт Я. Б. 24, 278
Генри У. 453
Гераклит 5
Герасимов Н. 211
Герон Александрийский 7, 171, 176, 211, 390, 399, 404, 405, 411
Гиббс Д. У. 570
Голиков И. Н. 513
Граф Румфорд (Томпсон Б.) 103, 567
Гриффитс А. А. 474
Грэм Т. 91
Гук Р. 445, 549
Гулиа Н. В. 561
Гумбольд А. 579
Гюйгенс Х. 549
- Даймлер Г. 197, 203
Дальтон Д. 25
Дальтон Дж. 276
Де Кусмао Б. 62
Де Луврье Ш. 211

- Де Шантуркуа А. 19
Декарт Р. 73
Демокрит 6, 11
Джером К. Д. 444
Джонс Б. 64
Джоуль Д. П. 105, 107, 190, 213
Дизель Р. 199, 205, 206
Дирак П. 551, 552
Дьюар Д. 435
Дэви Г. 103, 163
Дюбо Б. 248
Дюфор Л. 94

Жиффар А. 62

Иоффе А. Ф. 146, 473

Каблуков И. А. 583
Канницаро С. 19
Капица П. Л. 241, 547, 548
Кар Лукреций 7
Карно С. 116, 120
Касаточкин В. И. 533
Кеезом Б. Х. 547
Керл Р. 535
Кеттерле В. 270
Кили Д. 563
Клапейрон Б. 25
Клаузиус Р. 108, 119, 120, 125,
128, 144, 562, 585
Клеман Н. 117
Колмогоров А. Н. 570
Колумб Х. 547
Коммонер Б. 572
Корнелл Э. 270
Коршак В. В. 533
Костович И. С. 200
Кретчмер В. 535
Крото Г. 535
Крэппер Т. 403
Куанье 490
Кудрявцев Ю. П. 533
Кулон Ш. О. 14
Кусто Ж.-И. 72
Кюньо Ж. 182

Лаваль Г. 174
Лавлок Дж. 572
Лавуазье А. Л. 48, 103, 364, 561
Ланген Э. 197
Ландау Л. Д. 546, 548, 552
Лаплас П. 419
Лебединский Л. 183
Лебон 196
Леннард-Джонс Д. Э. 464
Ленуар Ж. 196
Линней К. 35
Ломоносов М. В. 24, 37, 55, 103
Лорд Кельвин (Томсон У.) 34,
108, 109, 119, 143,
168, 292, 434, 579
Лорд Рэлей (Стретт Д. В.) 428,
562
Лорен Р. 211
Лундквист Ф. В. 159
Лундстрем Й. 101

Майбах В. 197, 200
Майер Ю. Р. 104, 567
Максвелл Д. К. 13, 146, 562
Мариотт Э. 24, 395
Маркс К. 567
Маффиотти П. 211
Мах Э. 141, 212
Мейер Л. 19
Менделеев Д. И. 18, 26, 283, 580
Монгольфье Ж. 61
Монье Ж. 490

Нансен Ф. 337
Нернст В. 579
Нобель А. 205

- Нобель Э. 205
Новоселов К. 536
Ньюкомен Т. 172
Ньюлендс Д. 19
Ньютон И. 12, 445, 550, 584

Оккам У. 551
Отто Н. 197, 206

Папен Д. 172
Паскаль Б. 48, 584, 585
Пастер Л. 546
Паули В. 545, 571
Перрен Ж. 22
Петр I 172
Пиккар Б. 64
Планк М. 136, 552
Планкетт Р. 444
Плато Ж. А. Ф. 420
Платон 237
Платонов С. Д. 401
Ползунов И. И. 174
Поло М. 178
Попов А. С. 496
Попович П. Р. 430
Пристли Д. 48
Прут В. 69

Ранк Ж. 147
Ранкин У. 108, 142
Рассел Б. 556
Резерфорд Д. 48
Резерфорд Э. 571, 581
Рей Ж. 46
Реомюр Р. А. 37
Роберваль Ж. 562
Робертс-Аустен В. 478

Сдадков А. М. 533
Севери Т. 172
Сегнер Я. 171

Сеченов И. М. 452
Скотт Р. 529
Смолли Р. 535
Смолуховский М. 22
Соре Ш. 93
Стефан Й. 344
Стефенсон Д. 183
Стирлинг Р. 227
Страто 7
Стретт Д. В. (лорд Рэлей) 428, 562

Телешов Н. А. 211
Теннант С. 477
Тимирязев К. А. 98
Томпсон Б. (граф Румфорд) 103, 567
Томсон У. (лорд Кельвин) 34, 108, 109, 119, 143, 168, 292, 434, 579
Торричелли Э. 46
Тревитик Р. 182
Тривальд М. 317
Тэт П. Г. 390

Уайман К. 270
Уатт Д. 173, 202, 301
Уилкинсон В. 490
Уотерстон Д. Д. 562

Фалес 5
Фарадей М. 203
Фаренгейт Д. Г. 36
Фейнман Р. 548
Фик А. 93
Филон Византийский 407
Фон Герике О. 35, 48, 77
Форд Г. 206, 569
Франк Д. 546
Франклин Б. 187
Френкель Я. И. 374, 479

Фрост А. В. 578

Фуллер Б. 535

Хамфри Г. А. 215

Харди Г. Х. 571

Хафман Д. 535

Цельсий А. 35

Циолковский К. Э. 145, 211

Черепанов Е. А. 183

Черепанов М. Е. 183

Шарль Ж. 24, 25

Штиглер Р. 71

Шухов В. Г. 204

Эверсон К. 447

Эйлер Л. 103

Эйнштейн А. 13, 22, 271, 546,
559, 561

Эмпедокл 6, 11

Энгельс Ф. 144

Эпикур 6, 11

Юнг Т. 108

ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

I начало термодинамики 102,
109, 124

II начало термодинамики 116,
132, 143, 145, 168,
187, 242

А

Абсолютная температурная
шкала 34, 119

Абсолютный нуль температуры
29, 40, 43

Агрегатное состояние 269

Адиабатический процесс 42, 83,
142, 240, 242, 243,
250, 325, 349

Айсберг 194, 337

Айсберговая шипучка 337

Акваланг 72

Аморфное тело 459

Анизотропия 378, 459

Антифриз 335

Антициклон 349, 351

Апейрон 5

Атомная единица массы 16

Атомная энергетика 96, 223, 232

Аэростат 61

Б

Барометр 48, 49

Барометрическая формула 22,
52, 325

Бензин 97, 159, 181, 203

Бетон 490, 520

Биотопливо 206

Бит 149

Бифуркация 88

Бронза 511

Броуновское движение 20

Булат 512

В

Вакансия 479, 516

Вакуум 11

Ветер 97, 98, 179, 188, 190, 248,
324, 353

Вихревая труба 147

Вихревой холодильник 148

Вихревой эффект 147

Влажность 285, 321, 323, 324,
359

Внутренняя энергия 28, 66, 102,
109, 121, 126

Водность тумана 289

Водяное реле 405

Возобновляемый источник
энергии 97, 179, 188

Волна упругой деформации 468

Вытяжная тяга 69

Вязкость 375

Г

Газоанализатор 163

Газовая железа 76

Газогидрат 483

Гейзер 314

Геотермальная энергия 314

Геотермальный источник 97, 314

Гидравлический таран 410

Гидравлический удар 410
Гидрогель 542
Гидродинамический механизм
408
Гидроневесомость 75
Гидростатический парадокс 376
Гиперфльтрация 451
Гипотеза Геи 572
Глаз тайфуна 351
Глейзер 504
Глюкоза 252, 265
Гольфстрим 192
Гомеомерия 6
Гравитационное взаимодействие
12, 144
Градус 33, 35
Графен 536

Д

Дамаск 514
Двигатель Стирлинга 226, 523
Двигатель внешнего сгорания
227
Двигатель внутреннего сгорания
197, 203, 569
Деградация энергии 121, 122,
221
Демон Максвелла 145, 148, 150
Детандер 241
Детонация бензина 208
Дефект 516
Дефект масс 232
Деформация 467, 475, 541
Дизельное топливо 203, 205
Диссипативная сила 122
Диффузия 30, 93, 178, 348, 448,
453, 478
Добавочное давление 419, 431,
436
Дозатор воды 443
Дрова 96, 177, 181

Дырка 479

Ж

Жидкая нить 397
Жидкий кристалл 378

З

Зажигалка 101
Закон Авогадро 15, 17, 25, 67,
288
Закон Архимеда 383, 385, 386,
445, 455
Закон Бернулли 377, 422
Закон Бойля—Мариотта 24, 77,
78
Закон Вант-Гоффа 449
Закон Гей-Люссака 24, 38
Закон Генри 453, 481
Закон Гука 462, 466, 470, 492,
549
Закон Дальтона 25, 276, 287
Закон Джоуля—Ленца 107
Закон Паскаля 376
Закон Сивертса 481
Закон Фурье 113, 345
Закон Шарля 25, 82, 84
Заморозок 328, 358
Зарядовое число 9
Зыбучий песок 446

И

Идеальная тепловая машина
118, 125, 126, 132
Идеальная холодильная машина
126, 134
Излучение 111, 115, 116
Изостазия 384
Изотермический процесс 110,
242, 279
Изотоп 92, 232
Инвар 488

Информация 148
Испарение 142, 280, 304, 305,
320, 326, 327, 339,
341, 374, 453, 520

К

Калория 95, 103, 156, 158, 253
Капилляр 419
Капиллярная волна 423
Капиллярное давление 419, 431,
436
Капиллярное явление 419
Карбюратор 200
Картезианский водолаз 74
Касательное напряжение 462
Катастрофа 88
Керосин 159, 181, 203, 211, 444
Кессонная болезнь 72, 454
Кипение 156, 305, 307–309, 311,
313, 315, 335, 347
Кипятильник Франклина 187,
302
Кипящий слой 111
Количество теплоты 102, 109,
120, 125, 256, 323, 339
Композит 520
Конвекция 69, 111, 178, 347
Конденсация 142, 280, 305, 327
Коэффициент
ветроиспользования
191
Коэффициент поверхностного
натяжения 416, 475
Коэффициент растворимости 452
Краевой угол 418
Крекинг 204
Криофор 302
Кристалл 458
Кристаллизация 327, 333, 335,
339, 341, 345, 346, 514

Кристаллическая решетка 28,
124, 371, 459, 460,
463, 500, 515
Критическое состояние 283
Кумулятивный снаряд 409

Л

Ламинарное течение 377
Лампа Дэви 163
Лапласово давление 419, 431,
436
Лед 194, 329, 330, 332, 333,
335–337, 339, 344,
346–348, 362, 363,
371, 503, 504
Ледник 504
Ледобетон 491
Лошадиная сила 201

М

Магдебургские полушария 48
Макросостояние 137, 149
Мезосфера 245
Мениск 419, 440
Метаболизм 260, 264
Металлическое стекло 460, 518
Механическая работа 102, 109,
120, 121, 125, 258
Механический эквивалент
теплоты 105
Механическое напряжение 462,
466
Мешалка Джоуля 190
Микросостояние 137, 149
Микротермоциклирование 486
Модуль Юнга 462, 467, 492, 540
Модуль сдвига 462
Моль 16, 25
Монгольфьер 61

Монокристалл 459, 463, 498,
500, 502
Морось 289
Мыльный пузырь 434, 435, 437

Н

Наклёп 484, 486
Нанотрубка 535
Насос 46, 77, 80
Неньютоновская жидкость 376,
380
Необратимый процесс 127, 132
Неравенство Клаузиуса 129
Нефть 96, 97, 180, 203
Нитинол 530, 543
Нулевая плавучесть 75
Нулевые колебания 29
Нус (разум) 6, 11
Ньютоновская жидкость 376

О

Облако 287, 294, 298, 299, 325,
352, 359, 503
Обледенение 299
Обратимый процесс 127, 130,
132
Общее начало термодинамики
103
Огненное сверло 100
Огниво 100, 101
Озон 246
Октановое число 208
«Оловянная чума» 527
Осмоз 448, 452
Осмотическое давление 449, 452
Отжиг 484
Относительная атомная масса 16

П

Пар 278, 287, 302, 305, 307, 308,
313, 315, 320, 323, 326

Парниковый эффект 55, 237, 327
Паровая турбина 174, 222, 523
Паровоз 182
Паровой двигатель 117, 171,
196, 202, 227, 302
Парообразование 280, 305, 308
Перекристаллизация 527
«Перо Робинзона» 439
Плавление 328, 332, 333, 368,
514, 520
Пластическая деформация 461
Поверхностная энергия 414, 426,
480
Поверхностное натяжение 413,
420, 421, 428–430,
432, 436, 438, 440,
441, 443, 501
Подъёмная сила 62
Поликристалл 459
Полиморфизм 527
Полюс холода 42
Порошковая металлургия 520
Постоянная Авогадро 17
Потенциал Леннард-Джонса 464
«Поющая птичка» 405
Предел упругости 461
Примус 158
Принцип Карно 120, 259, 496
Принцип Уатта 301
Принцип возрастания энтропии
128
Принцип минимума
потенциальной энергии
415, 501
Принцип холодной стены 301
Природный газ 96, 97, 180, 181,
207
Псевдожидкость 111
Псевдосплав 520
Птичка Хоттабыча 185
Пыль 22, 112

Пьющая птичка 185

Р

Радуга 421

Реактивный двигатель 210, 217

Режеляция 332

Режим обострения 88

Репёр 33, 36

С

«Самобеглый шарик» 495

«Самокачалка» 495

Сверхтекучесть 365

Сегнерово колесо 171

Сила Архимеда 63

Сила поверхностного натяжения
415

Сильное взаимодействие 9, 14

Сифон 397, 399, 400, 403

Скоростной пиролиз 180

Слабое взаимодействие 15

Смачивание 417, 431, 446, 447

Снег 65, 314, 325, 327, 328, 335,
503

Снежник 326

Солевая ячейка 335

Солнечная постоянная 327

Солнечное излучение 97–99,
180, 222, 327, 358

Солнечный ветер 41

Сообщение 148

Сопло Лаваля 175

Состояние текучести 461

Сосуд Мариотта 395

«Сосуд Тантала» 404

Спички 101

Сплав с памятью 529

Стеклование 517

Стеклянный лед 507

«Стерегающая птичка» 406

Стиринг-машина 226, 523

Стратосфера 245

Сублимация 326, 465, 479,
508–510

Сухой лед 509, 510

Т

Таблица Менделеева 9, 16, 18,
481

Тайфун 350

Таранный насос 410

Твердость тела 472

Темная зона 23

Температура 27, 32

Температурная инерция грунта
363

Тепловая машина 118, 120, 175,
176, 184, 194–196,
210, 226, 247, 258

Тепловая смерть Вселенной 143

Тепловая труба 164

Тепловое равновесие 32

Тепловой аккумулятор 521

Тепловой диод 493

Тепловой домкрат 491

Тепловой насос 166

Тепловой остров 236

Теплоемкость 106, 113, 131, 156,
157, 522, 524

Теплопроводность 64, 111, 318,
337, 344, 345, 361,
363, 364, 498

Теплород 27, 102, 106, 109, 117,
118, 124

Теплый фронт 349

Термодиффузия 93

Термометр 32, 34, 238, 239, 364

Термос 81

Термоскоп 37

Термосфера 245

Термофорез 23

Термоядерная реакция 15

Термоядерная энергетика 97, 232
Тефлон 444
Тиксотропная жидкость 380
Токамак 235
Торричеллиева пустота 47, 49
Торф 96, 112
Точка росы 287, 325, 339
Тройная точка 34, 35
Тропосфера 244, 297
Труба Ранка 147
Туман 22, 282, 287, 289, 291,
294, 300, 323, 328
Туннельный эффект 235
Турбодетандер 241
Турбулентное течение 377

У

Уголь 96, 97, 112, 178, 181
Удельная теплота
кристаллизации 345
Удельная теплота плавления 515,
524
Удельная теплота сгорания 177,
181
Удельная теплота сублимации
465, 509
Умножающая система 76
Упругая деформация 460
Уравнение Ван-дер-Ваальса 274,
276, 278, 279
Уравнение Кельвина 292
Уравнение Клапейрона 25
Уравнение Клапейрона—
Клаузиуса 328, 515,
525
Уравнение Клапейрона—
Менделеева 26, 63, 66,
68, 271
Уравнение Ньютона 375
Уравнение Фика 93

Уравнение состояния идеального
газа 26
Уравнение фотосинтеза 98

Ф

Фаза 269, 280, 284, 364
Фазовый переход 142, 169, 328,
339, 345, 364, 509,
515, 520, 522
Фирн 326
Флотация 447, 455
Флуктуация 21, 144
Фонтан 83, 411
Фотосинтез 98, 179, 252
Фуллерен 534
Фуллерит 535

Х

Химическая энергия 97, 98, 122,
259
Хлорофилл 98
Холодильник 141, 166, 323, 333,
339
Холодный фронт 349

Ц

Центр кристаллизации 299, 341,
362, 499, 516
Центр парообразования 310
Цикл Брайтона 213, 216
Цикл Джоуля 213
Цикл Дизеля 199
Цикл Карно 118, 141, 228
Цикл Отто 197
Цикл Ранкина 142
Цикл Стирлинга 227
Цикл Уатта 173
Цикл Хамфри 215
Циклон 349, 351

Ч

Число степеней свободы 66

Чудесная сеть 76

Ш

Шкала Кельвина 34, 119

Шкала Реомюра 37

Шкала Фаренгейта 36

Шкала Цельсия 35

Шкала твердости Мооса 472

Э

Эвтектика 333, 369, 515

Электромагнитное
 взаимодействие 8, 13,
 463

Элементарная кристаллическая
 ячейка 459, 500

Энергия активации 376

Энергия ветра 97, 98

Энергия основного обмена 253,
 260, 265

Энтропия 124, 128, 129, 133,
 136, 140, 143, 150

Эолипил 171

Эпитаксия 503

Эффект Джоуля—Томсона 143

Эффект Дюфора 94

Эффект Иоффе 474

«Эффект Паули» 545

Эффект Соре 93

Эффект самоконсервации 483

Эффект сверхпластичности 527

Эффузия 90, 163

Я

Ядерное взаимодействие 9, 14

ОГЛАВЛЕНИЕ

<i>Предисловие</i>	3
<i>Глава I. Молекулярно-кинетическая теория и газы</i>	5
1.1. Зарождение атомистических представлений	5
1.2. Строение атомов и их сравнительная характеристика	8
1.3. Движущие силы природы	11
1.4. Измерение количества вещества	15
1.5. Нижний предел моля	17
1.6. Открытие периодической таблицы химических элементов	18
1.7. Броуновское движение	20
1.8. Дым, пыль, туман	22
1.9. Термофорез	23
1.10. Газ и газовые законы	24
1.11. Тепло и температура	27
1.12. Молекулы и охота	29
1.13. Взвешивание газа	30
1.14. Термодинамический метод измерения температуры	32
1.15. Температурные шкалы	34
1.16. Воздушный термоскоп	37
1.17. Тепловое движение при сверхнизких температурах	39
1.18. Такой горячий холодный космос	40
1.19. Самые низкие температуры	42
1.20. Истечение газа в пустоту	43
1.21. Вес вдоха	44
1.22. Как открывали атмосферу	45
1.23. Испорченный ртутный барометр	49
1.24. Вес и высота атмосферы	51
1.25. Атмосферы Венеры и Марса	54
1.26. Фокус с воздухом	57
1.27. Соотношение воздуха и воды на Земле	58
1.28. Автоматическая поилка	59
1.29. Кто изобрел аэростат?	61

1.30.	Воздушная шуба	64
1.31.	Парадокс с отоплением помещения	66
1.32.	Отклонение пламени свечи	68
1.33.	Печная труба, загадочная вертушка и сквозняк . .	69
1.34.	Опасное погружение и всплытие	71
1.35.	Экстренное всплытие	73
1.36.	Картезианский водолаз	73
1.37.	Погружение и всплытие рыб	75
1.38.	Как работает вакуумный насос	77
1.39.	Самодельный насос	80
1.40.	Удобный термос	81
1.41.	Опыты с нагревом воздуха	82
1.42.	Земля и газовые законы	84
1.43.	Скрытая катастрофа	85
1.44.	Наибольшая скорость снаряда	89
1.45.	Эффузия	90
1.46.	Термодиффузия	93

Глава II. Работа и теплота. Начала термодинамики 95

2.1.	Энергия и человечество	95
2.2.	Химическая энергия и Солнце	97
2.3.	Огонь и человек	100
2.4.	Как открывали I начало термодинамики	102
2.5.	О терминах термодинамики	109
2.6.	Работа при изотермическом процессе	110
2.7.	Кипящий слой	111
2.8.	Опасная пыль	112
2.9.	Паяльник и медь	114
2.10.	Одежда металлургов	115
2.11.	О форме чайника	115
2.12.	Кто открыл II начало термодинамики	116
2.13.	Качество энергии	119
2.14.	Зачем мы потираем руки?	122
2.15.	Работа за счет холода	123
2.16.	Энтропия	124
2.17.	Измерение энтропии	130
2.18.	Умный теплообмен	132
2.19.	Энтропия и молекулы	136
2.20.	Как работает холодильник	141
2.21.	О «тепловой смерти» Вселенной	143
2.22.	Демон Максвелла	145
2.23.	Вихревая труба	146
2.24.	Информация и энтропия	148
2.25.	Экономный теплообмен	151
2.26.	Экономное кипение	156
2.27.	Сравнение теплоемкостей веществ	157

2.28.	Примус вместо очага	158
2.29.	Как обнаружить пожар?	160
2.30.	Лампа Дэви	162
2.31.	Тепловая труба	164
2.32.	Лучшая печь — это холодильник!	166
2.33.	Почем чашка чая?	168
2.34.	Что может и не может пламя	169
2.35.	Как быстрее?	170
2.36.	Первые тепловые машины	171
2.37.	Тепловая машина для полива огорода	175
2.38.	Конвекционный тепловой двигатель	176
2.39.	Какие дрова выгоднее?	177
2.40.	Изгиб горящей спички	178
2.41.	Уголь	178
2.42.	Топлива и взрывчатые вещества	181
2.43.	Паровозы	182
2.44.	Паровая лодка	184
2.45.	«Пьющая птичка» — «вечный» двигатель	185
2.46.	Энергия ветра	188
2.47.	Отопление помещений ветром	190
2.48.	Гольфстрим и айсберг как тепловая машина	192
2.49.	«Вечный» соленый двигатель	195
2.50.	Как появились двигатели внутреннего сгорания	196
2.51.	Как работает карбюратор	200
2.52.	Мощность двигателя и лошадиная сила	201
2.53.	Топливо для двигателей внутреннего сгорания	203
2.54.	Октановое число бензина	208
2.55.	Реактивные двигатели	210
2.56.	Самодельный реактивный двигатель	217
2.57.	Тепловые потери	220
2.58.	Эффективность движения	223
2.59.	Машина Стирлинга	226
2.60.	Термоядерная энергетика	232
2.61.	Город — «остров тепла»	236
2.62.	Парниковый эффект	237
2.63.	Медицинский термометр	238
2.64.	Термометр на ветру	239
2.65.	Парадоксы адиабатического расширения	240
2.66.	Расширение изотермическое и адиабатическое	242
2.67.	Температура атмосферы	243
2.68.	Озоновый слой	246
2.69.	«Вечный» термоатмосферный двигатель	247
2.70.	Свечение метеора	249
2.71.	Пища — источник энергии	252
2.72.	Тепловая и механическая мощность человека	256

2.73.	Живой организм и тепловая машина	258
2.74.	Масса тела и потребляемая энергия	260
2.75.	Как тратить свою энергию?	263
<i>Глава III. Реальные газы. Фазовые переходы</i>		<i>269</i>
3.1.	Сколько агрегатных состояний вещества бывает?	269
3.2.	Идеальный газ и реальность	271
3.3.	Закон Дальтона для реальных газов	276
3.4.	Пузырек на дне океана	277
3.5.	Газ и пар	278
3.6.	Критическое состояние	283
3.7.	Влажность воздуха	285
3.8.	Вес сухого и влажного воздуха	287
3.9.	Туман	289
3.10.	Промышленность и туман	291
3.11.	Облака	294
3.12.	«Падающие» облака	298
3.13.	Температура облаков	299
3.14.	Взрыв и облако	300
3.15.	Принцип холодной стены	301
3.16.	Парадокс с испарением	304
3.17.	Кипение	305
3.18.	Кипение по-новому	307
3.19.	Скорость нагревания воды	307
3.20.	Задумчивый чайник	308
3.21.	Звуки кипящей воды	309
3.22.	Капля на горячей поверхности	310
3.23.	Кипячение воды кипятком и снегом	312
3.24.	Гейзеры и геотермальная энергия	314
3.25.	Удары в трубах отопления	317
3.26.	О действии вентилятора	318
3.27.	Сауна и человек	320
3.28.	Как высушить баню	322
3.29.	Продукты и холодильник	323
3.30.	Странный ветер	324
3.31.	Снег	325
3.32.	Снег, Солнце и тепло	327
3.33.	Почему снег скрипит?	328
3.34.	Почему коньки скользят по льду?	330
3.35.	Лед под нагрузкой	332
3.36.	Снег и соль	333
3.37.	Пресная вода из морского льда	335
3.38.	Звуки льда	336
3.39.	Как сохранить лед?	337
3.40.	Вода и погреб	338

3.41.	Холодильник на скорую руку	339
3.42.	Быстрая горячая вода	341
3.43.	Замерзающий водоем	342
3.44.	Как быстро замерзает вода?	344
3.45.	Бутылка с водой, лед и пар	346
3.46.	Как охлаждать льдом напитки?	347
3.47.	Камни, «растущие» в поле	348
3.48.	Циклоны и антициклоны	349
3.49.	Предсказание погоды	351
3.50.	Предсказание заморозков	358
3.51.	Осторожно — холодное железо!	361
3.52.	Как лопаются трубы	362
3.53.	Когда лопаются трубы под землей?	363
3.54.	Сверхтекучий гелий	364
3.55.	Предельная высота гор	365
3.56.	Строение Земли	366
3.57.	Необычное свойство сплавов	368

Глава IV. Жидкости 370

4.1.	Путешествие внутрь воды	370
4.2.	Интересные факты о воде	373
4.3.	Вязкость жидкостей	374
4.4.	Статика и динамика жидкостей	376
4.5.	Жидкие кристаллы	378
4.6.	Тиксотропные (неньютоновские) жидкости	380
4.7.	О плавании тел в жидкостях	382
4.8.	О «плавании» поверхности Земли	384
4.9.	Уровень воды со льдом	385
4.10.	Лодка в бассейне	386
4.11.	Фокус с плаванием яйца в воде	387
4.12.	О тепловом расширении жидкостей	388
4.13.	О сжимаемости жидкостей	388
4.14.	Новое решение задачи о бассейне	390
4.15.	Водяные часы	394
4.16.	Водяной метроном	396
4.17.	Сифон	397
4.18.	Запуск сифона	399
4.19.	Автоматический сифон	400
4.20.	Сифон и унитаз	403
4.21.	Сосуд Тантала	404
4.22.	«Поющая птичка» Герона	405
4.23.	«Стерегающая птица» Филона	406
4.24.	Гидродинамический механизм	408
4.25.	Водяной насос таранного типа	409
4.26.	Домашний фонтан	411
4.27.	О поверхностном натяжении	413

4.28.	Смачивание жидкости	417
4.29.	Шарообразная форма жидкости	420
4.30.	Форма дождевой капли	421
4.31.	Капиллярные волны	423
4.32.	Неожиданное применение поверхностного натяжения	428
4.33.	Масса капли воды	429
4.34.	Выведение жирных пятен	430
4.35.	Поверхностное натяжение и космос	430
4.36.	Задача, приводящая к полезному выводу	431
4.37.	Загадка капиллярных явлений	432
4.38.	Как готовить мыльный раствор	434
4.39.	Превращения мыльного пузыря	435
4.40.	Еще о мыльной пленке	437
4.41.	Капиллярные явления между пластинками	438
4.42.	Самодельное перо	439
4.43.	Пластинка на дне сосуда с жидкостью	440
4.44.	Мерцание свечи	441
4.45.	«Бездонный» бокал	441
4.46.	Вода в решетке	443
4.47.	Дозатор воды	443
4.48.	Замечательный керосин	444
4.49.	Песок как жидкость	445
4.50.	Смачивание и зыбучие пески	446
4.51.	Смачивание для обогащения руд	447
4.52.	Удивительный осмос	448
4.53.	Фокус с осмосом	452
4.54.	Газ в жидкости	452
4.55.	Что может лимонад?	455
4.56.	Получение углекислого газа	455
4.57.	Не щелкайте суставами!	457
4.58.	Где больше кислорода?	457
<i>Глава V. Твердые тела</i>		458
5.1.	Строение твердых тел	458
5.2.	Механические свойства кристаллов	460
5.3.	Простейшая теория кристаллов	463
5.4.	Упругое столкновение твердых тел	467
5.5.	Как измеряют твердость тел	472
5.6.	Стекло и ножницы	473
5.7.	Самые легкие металлы	476
5.8.	Самые тяжелые вещества	477
5.9.	Диффузия в твердых телах	478
5.10.	Газы в металлах	481
5.11.	Газогидраты	483
5.12.	Отжиг и наклёп	484

5.13.	Наклёп с помощью кипения	486
5.14.	Тепловое расширение твердых тел	487
5.15.	Аномалии теплового расширения	489
5.16.	Бетон и тепловой домкрат	490
5.17.	Кран и горячая вода	492
5.18.	Отверстие в металле	492
5.19.	Длина железной дороги	494
5.20.	«Самобеглый шарик» и «Самокачалка»	495
5.21.	Искусство изготовления стеклянной посуды	497
5.22.	Выращивание кристаллов	498
5.23.	Как растут кристаллы	500
5.24.	Искусство выращивания кристаллов	502
5.25.	Такой разный лед	504
5.26.	Сушка белья зимой	508
5.27.	Сухой лед	509
5.28.	«Пение» сухого льда	510
5.29.	Что представляет собой бронза?	511
5.30.	Тайна булата	512
5.31.	Плавление и кристаллизация	514
5.32.	Стеклование	517
5.33.	Волшебный псевдосплав	519
5.34.	Тепловой аккумулятор	521
5.35.	Пуля и тепло	523
5.36.	Эффект сверхпластичности металлов	527
5.37.	«Оловянная чума»	527
5.38.	Сплавы с памятью	529
5.39.	Углерод, жизнь, фуллерен и графен	531
5.40.	Металлический водород	537
5.41.	Бутылка на дне океана	539
5.42.	Энергия деформации	541

Глава VI. Несерьезно о серьезном и серьезно о несерьезном . . . 545

6.1.	Экспериментаторы и теоретики	545
6.2.	Как делаются великие открытия	546
6.3.	Как рождается научный интерес	548
6.4.	Гарантия первенства	548
6.5.	Принципы для новых теорий	549
6.6.	Самоучитель по созданию новых теорий	553
6.7.	Доказательность теории без практики	555
6.8.	«И гений — парадоксов друг»	557
6.9.	Еще один парадокс	558
6.10.	Логика и вера	559
6.11.	Как доказать свою правоту	561
6.12.	О пользе ссылок на авторитеты	562
6.13.	История одной авантюры	563
6.14.	История одного опроса	566

6.15.	Суп Румфорда	567
6.16.	Компьютер и автомобиль	568
6.17.	Косность мышления и развитие техники	569
6.18.	Физики и математики	570
6.19.	Физика и жизнь	571
6.20.	Земля, природа, человек	571
6.21.	О термодинамике	573
6.22.	Варианты вопросов для экзамена по молекулярной физике	573
6.23.	Гимн физиков	573
6.24.	Физматовская печальная	574
6.25.	Руководство к выполнению лабораторных работ	575
6.26.	Эволюция студента	576
6.27.	Планирование научной деятельности	578
6.28.	Нестандартное мышление	578
6.29.	Кельвин, ученики и ослы	579
6.30.	Нернст и природа	579
6.31.	Менделеев и ... чемоданы	580
6.32.	Объяснение Бора	580
6.33.	Бор и сила воображения	581
6.34.	Об испарении оценок	583
6.35.	Легенда о редком металле	583
6.36.	О Ньюtone на квадрате	584
6.37.	Что такое окисление?	584
6.38.	Знаете ли вы, что...	585
<i>Использованные источники</i>		588
<i>Указатель опытов и наблюдений</i>		602
<i>Именной указатель</i>		606
<i>Предметный указатель</i>		610