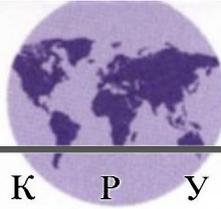




Т В О Й К Р У Г О З О Р

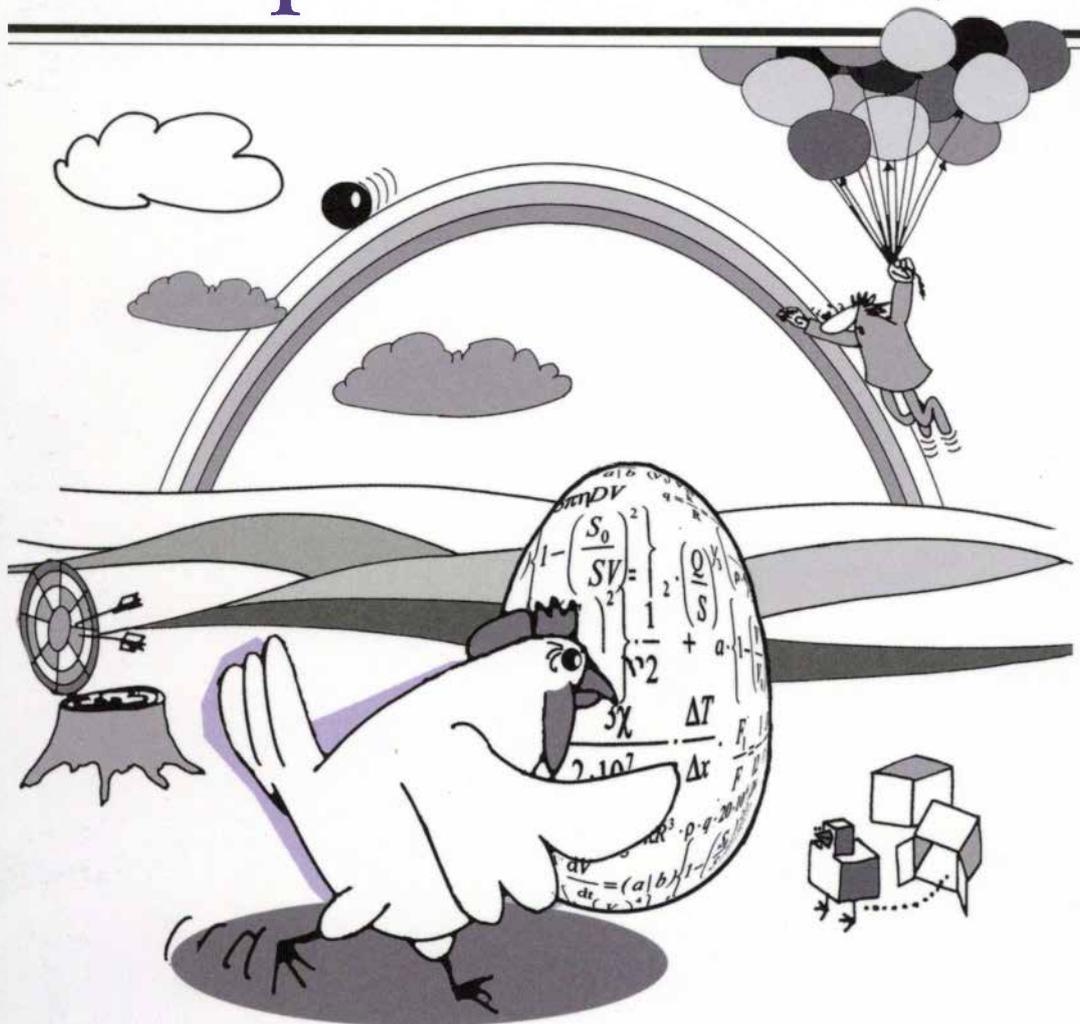


К. Ю. БОГДАНОВ

Не только о физике яйца

Не только о физике яйца

К. Ю. Богданов



ИЗДАТЕЛЬСТВО «ПРОСВЕЩЕНИЕ»



ПРОСВЕЩЕНИЕ
ИЗДАТЕЛЬСТВО



Т В О Й К Р У Г О З О Р

К. Ю. БОГДАНОВ

НЕ ТОЛЬКО
О ФИЗИКЕ ЯЙЦА

М О С К В А

« П Р О С В Е Щ Е Н И Е »

2 0 0 9

УДК 087.5:53
ББК 22.3я72
Б73

Серия «Твой кругозор» основана в 2007 г.

Богданов К. Ю.

Б73 Не только о физике яйца / К. Ю. Богданов. — М. : Просвещение, 2009. — 176 с. : ил. — (Твой кругозор). — ISBN 978-5-09-017170-0.

«Не только о физике яйца» — книга для чтения, открывающая законы физики в будничных фактах и явлениях. Она представляет собой выдержки из элективного курса «Наука и техника для любознательных», прочитанного автором учащимся лицея № 1586 Москвы.

Книга адресована учащимся старших классов, студентам и учителям, а также всем любознательным.

УДК 087.5:53
ББК 22.3я72

Научно-популярное издание

Серия «Твой кругозор»

Богданов Константин Юрьевич

НЕ ТОЛЬКО О ФИЗИКЕ ЯЙЦА

Зав. редакцией *В. И. Егудин*. Редактор *Т. П. Каткова*

Младший редактор *Т. И. Данилова*

Художественный редактор *Т. В. Глушкова*

Художники *В. С. Коноплянский, Т. В. Глушкова, Э. Н. Малания*

Технический редактор и верстальщик *Н. К. Румянцева*. Корректор *Н. А. Юсупова*

Налоговая льгота — Общероссийский классификатор продукции ОК 005-93—953000.

Изд. лиц. Серия ИД № 05824 от 12.09.01. Подписано в печать с оригинал-макета 10.10.08.

Формат 70×100 1/16. Бумага офсетная. Гарнитура NewtonС. Печать офсетная. Уч.-изд. л. 12,21.

Тираж 10 000 экз. Заказ № 157.

Открытое акционерное общество «Издательство «Просвещение». 127521, г. Москва, 3-й проезд Марьиной рощи, 41.

Отпечатано в ОАО «Тверской ордена Трудового Красного Знамени полиграфкомбинат детской литературы им. 50-летия СССР». 170040, г. Тверь, проспект 50 лет Октября, 46.



ISBN 978-5-09-017170-0

© Издательство «Просвещение», 2009
© Художественное оформление.
Издательство «Просвещение», 2009
Все права защищены

Оглавление

Предисловие	6
Глава 1. Отталкиваясь от атомов	7
Глава 2. С Архимедом и Ньютоном вверх и вниз через атмосферу	22
Глава 3. Почему кость прочнее гранита и полая внутри	31
Глава 4. Загадки одномерного бильярда	36
Глава 5. Как образуются и живут автомобильные пробки	46
Глава 6. Стирка и чистка под микроскопом	54
Глава 7. Любовь и ненависть в мире материалов	64
Глава 8. Немного о физике яйца	69
Глава 9. Каналы связи в океане безмолвия	73
Глава 10. Волна, дающая жизнь	78
Глава 11. Как заглянуть в глубь Земли (сейсмические волны)	88
Глава 12. Как плавать по законам физики	92
Глава 13. Реология – наука о том, что все течет	103
Глава 14. Как мороз притягивает морскую воду	108
Глава 15. Пар – вода, которая легче воздуха	112
Глава 16. Термодинамика вокруг и внутри нас	119
Глава 17. Игры с огнем	130
Глава 18. О лампочках – и не только	136
Глава 19. Пыль и электричество дома и в космосе	144
Глава 20. Молния, или Как заряжается Земля	148
Глава 21. Как искать братьев по разуму во Вселенной	157
Глава 22. Радуга – урок физики на свежем воздухе	160
Глава 23. Как рентгеновские лучи помогают увидеть невидимое	165
Глава 24. Законы преломления света и самая быстрая горка	171

*Светлой памяти
Танечки Богдановой (Глазовой)
посвящаю.*

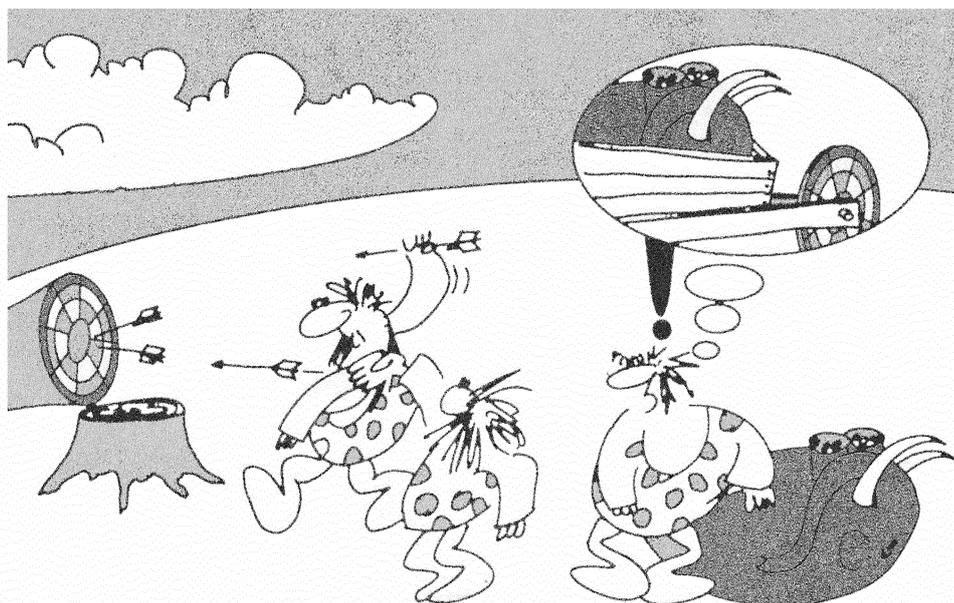
Предисловие

Физику изучают обычно по учебникам. Физические законы открывают перед нами правила, по которым живет природа, тайны устройств и механизмов. Знание этих законов и умение решать задачи дают возможность исследовать окружающий мир и объяснять то, что раньше считалось необъяснимым. Попробуем оглянуться вокруг. На все ли «почему?» и «как?» есть ответ? Наверняка, нет! Так попробуем найти эти ответы. После этого мы станем лучше чувствовать физику явлений. Ведь обучаться физике, как и всему другому, можно не только по учебникам, но и исследуя окружающий мир. Иностраный язык, например, можно выучить, просто поехав в ту страну, где на нем говорят. А нам повезло: ведь страна-физика всегда вокруг нас, и нам никуда не надо ехать. Так давайте учиться языку физики, наблюдая и объясняя все происходящее вокруг. Ведь слово «физика» в переводе с греческого означает «природа». Читая эту книгу и отвечая на простые и сложные вопросы, вы откроете для себя законы природы в будничных фактах и явлениях.

Физика — очень полезная наука. Правило рычага дает совет, как, не надорвавшись, поднимать тяжести, а закон Архимеда — как строить новые корабли. Законы Ньютона учат метко стрелять и запускать ракеты, а законы термодинамики — конструировать холодильники и автомобильные двигатели. И конечно же, без знания физики создание всех технических и электронных устройств, в том числе и компьютеров, было бы просто невозможным. Поэтому можно считать, что именно физика в течение тысячелетий толкала человечество по пути прогресса. Однако физика не только сделала нашу жизнь более комфортной, но и дала возможность узнать, как устроены мы сами, открыть причины многих заболеваний и найти методы их лечения. Большинство работ по биологии и медицине, удостоенных Нобелевских премий, было бы невозможно без участия физиков. Физические модели общества позволяют предсказать его будущее, а физические модели биржевых торгов — цены на акции завтра. Физика — это наука, соединяющая между собой многие отрасли знаний: астрономию, химию, биологию, социологию, экономику, географию, геологию и др. — в мощное оружие познания.

Глава 1

Отталкиваясь от атомов



Большие и маленькие на прогулке

Когда некуда спешить, мы идем пешком. Но вот мы чувствуем, что опаздываем, и переходим на бег. При ходьбе в любой момент времени хотя бы одна из ног обязательно соприкасается с землей. В отличие от ходьбы, при беге в короткий интервал времени человек не соприкасается с землей. Поэтому такой способ передвижения представляет собой последовательность прыжков. Максимальная скорость, с которой может идти взрослый человек, около 2,5 м/с. Бег позволяет значительно увеличить скорость передвижения, и у спортсменов она может достигать 10 м/с.

Знакомая картина: родители, спеша куда-то, ведут ребенка за руку, и он, не успевая за ними, вынужден бежать. Почему для достижения одной и той же скорости взрослые и дети пользуются различными способами передвижения?

Рассмотрим, как изменяется положение центра тяжести при ходьбе. На рисунке 1.1 схематически изображены положения человека и его центра тяжести в две последовательные фазы ходьбы. Если считать, что при соприкосновении с землей ноги находятся в выпрямленном состоянии, то очевидно, что центр тяжести будет располагаться ниже в положении, когда обе ноги касаются земли. Наивысшему положению центра тяжести будет соответствовать момент, когда с землей соприкасается одна нога. Таким образом, центр тяжести, располо-

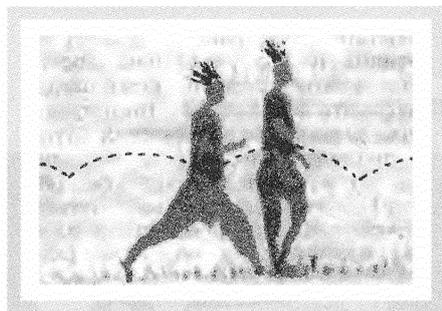


Рис. 1.1. Колебания высоты центра тяжести при ходьбе

женный в нижней части туловища, при ходьбе движется по дуге окружности, радиус которой можно считать равным длине ноги.

Известно, что тело, движущееся со скоростью v по окружности радиусом R , имеет ускорение, направленное к центру этой окружности. При ходьбе на человека действуют две силы — сила тяжести и реакция опоры. Результирующая этих двух сил и является искомой центростремительной силой. Очевидно, что она не может быть больше силы тяжести.

Поэтому при ходьбе должно соблюдаться неравенство $\frac{mv^2}{R} \leq mg$, где m — масса идущего человека. Из этого неравенства следует, что

$$v^2 \leq gR. \quad (1.1)$$

Длина ноги взрослого человека составляет около 0,9 м. Подставляя это значение для R в неравенство (1.1), получаем для максимальной скорости ходьбы человека значение около 3 м/с, что соответствует реальному ее значению. У детей ноги короче, чем у взрослых, и максимальная скорость ходьбы меньше. Поэтому для того, чтобы не отставать от взрослых, детям часто приходится переходить на бег, к которому неравенство (1.1) не имеет никакого отношения.

С поклажей на голове

Многие, путешествуя по Африке и Азии, бывают поражены, увидев женщин, несущих на голове грузы огромных размеров (рис. 1.2). Нередко вес такой поклажи составляет 70% веса человека. Естественно, что поднять себе на голову такую ношу без посторонней помощи женщина не может, и поэтому поднимают груз еле-еле двое, после чего женщина одна с легкостью его несет. Неужели действительно легче переносить грузы на голове?

Известно, что показателем энергетических затрат человека может служить скорость потребления им кислорода, при этом 1 л израсходованного кислорода соответствует энергии, равной 20,1 кДж. Ученые экспериментально установили, что при обычном способе ношения груза (за спиной) потребление кислорода растет пропорционально увеличению ноши так, что груз, равный 50% веса тела носильщика, увеличивает его энергетические затраты на 50%. Такая же зависимость имеет место и в том случае, когда груз переносят на голове.

Каково же было удивление ученых, когда они обнаружили, что у африканских женщин при переносе груза, равного 50% веса носильщика, на голове потребление кислорода увеличивается лишь на 30%! Почему это происходит?

Ответить на этот вопрос помогли наблюдения. Обычная для тех мест картина: женщина идет с наполненным до краев водой ведром на голо-



Рис. 1.2. Женщины с поклажей на голове



ве. Как это ни удивительно, но вода не расплескивается. А это значит, что при движении отсутствует (или почти отсутствует) вертикальная составляющая ускорения. Следовательно, и центр тяжести африканской женщины вместе с грузом не движется в вертикальном направлении.

Известно, что при обычной ходьбе высота центра тяжести претерпевает заметные колебания (см. рис. 1.1), периодически поднимаясь и опускаясь на несколько сантиметров. Естественно, что на такие никому не нужные колебания центра тяжести затрачивается значительная энергия. Поэтому такой способ ходьбы можно сравнить с ездой начинающего автолюбителя. Пытаясь сохранить постоянную среднюю скорость движения, он попеременно нажимает то на акселератор, то на тормоз, расходуя в результате гораздо больше топлива. В отличие от этого у многих жителей стран Азии и Африки выработалась походка, при которой они удерживают свой центр тяжести на постоянной высоте, что значительно уменьшает их энергетические затраты.

Для тех, кто ходит обычно, не заботясь о поддержании центра тяжести на постоянной высоте, ученые придумали специальное устройство, которое преобразует часть энергии вертикальных перемещений в электрическую энергию. Это устройство легко помещается в небольшой рюкзак и представляет собой электрогенератор, который начинает работать, когда его приводят в колебания с небольшой частотой (вверх — вниз — вверх — вниз). При обычной ходьбе мощность такого генератора составляет около 7 Вт, что достаточно, например, для подзарядки мобильных телефонов.

Что такое трение: друг или враг

С трением мы сталкиваемся на каждом шагу, но без трения не сделали бы и шага. Невозможно представить себе мир без сил трения. В отсутствие трения многие кратковременные движения продолжа-

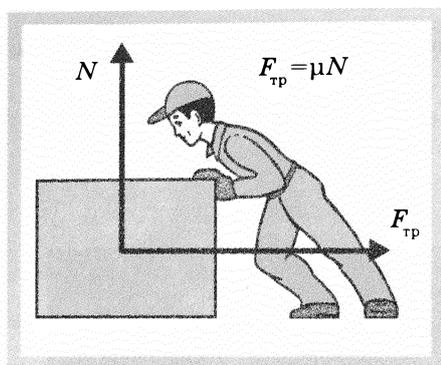


Рис. 1.3. К формулировке классического закона трения

лись бы бесконечно. Земля содрогалась бы от непрерывных землетрясений, так как тектонические плиты постоянно сталкивались бы между собой. Все ледники сразу же скатились бы с гор, а по поверхности земли носилась бы пыль от прошлогоднего ветра. Как хорошо, что все-таки есть сила трения! С другой стороны, трение между деталями машин приводит к их износу и дополнительным расходам. Приблизительные оценки показывают, что научные исследования в трибологии — науке о трении — могли бы сберечь примерно от 2 до 10% национального валового продукта.

Два самых главных изобретения человека — колесо и добывание огня — связаны с силой трения. Изобретение колеса позволило значительно уменьшить силу, препятствующую движению, а добывание огня поставило силу трения на службу человеку. Однако до сих пор ученые далеки от полного понимания физических основ силы трения. И вовсе не оттого, что людей с некоторых пор перестало интересовать это явление. Первая формулировка законов трения принадлежит великому Леонардо (1519). Он утверждал, что сила трения, возникающая при контакте тела с поверхностью другого тела, пропорциональна силе прижатия, направлена против направления движения и не зависит от площади контакта. Этот закон был заново открыт через 180 лет Г. Амонтоном, а затем уточнен в работах Ш. Кулона (1781). Амонтон и Кулон ввели понятие коэффициента трения как отношения силы трения к нагрузке, придав ему значение физической константы, полностью определяющей силу трения для любой пары контактирующих материалов. До сих пор эта формула

$$F_{\text{тр}} = \mu N, \quad (1.2)$$

где $F_{\text{тр}}$ — сила трения, N — составляющая силы прижатия, нормальная к поверхности контакта, а μ — коэффициент трения, является единственной формулой, которую можно найти в учебниках по физике (рис. 1.3).

В течение двух столетий экспериментально доказанный закон (1.2) никто не смог опровергнуть, и до сих пор он звучит так, как и 200 лет назад.

1. Сила трения прямо пропорциональна нормальной составляющей силы, сжимающей поверхности скользящих тел, и всегда действует в направлении, противоположном направлению движения.

2. Сила трения не зависит от площади поверхности соприкосновения.

3. Сила трения не зависит от скорости скольжения.

4. Максимальная сила трения покоя всегда больше силы трения скольжения.

5. Сила трения зависит только от двух материалов, которые скользят друг по другу.

Как трение помогает разогреться

Сила трения — одна из диссипативных сил. Другими словами, вся работа, расходуемая на ее преодоление, переходит в тепло. Значения μ , приводимые в инженерных справочниках, позволяют оценивать этот нагрев в проектируемых приборах и устройствах. Ну, а мы попробуем найти количество переданной теплоты, когда мы, разогреваясь, потираем руки или разогреваем с их помощью охлажденные участки тела.

Пусть мы сжимаем ладони с силой $0,5 \text{ Н}$, коэффициент трения μ кожи о кожу составляет $0,5$. Тогда сила трения, которую мы преодолеваем при скольжении одной ладони по поверхности другой, будет равна $0,25 \text{ Н}$. Если считать, что, разогреваясь, мы за время $t = 1 \text{ с}$ совершаем четыре перемещения ладони, каждое по $0,1 \text{ м}$, то мощность, расходуемая на преодоление силы трения, составляет $0,1 \text{ Вт}$. За время $t = 10 \text{ с}$ такого разогрева в области контакта ладоней выделится энергия, равная 1 Дж . Пусть все тепло идет на разогрев участка поверхности кожи площадью $0,025 \text{ м}^2$ и толщиной $0,001 \text{ м}$, который имеет массу около $25 \cdot 10^{-6} \text{ кг}$ и удельную теплоемкость, близкую к теплоемкости воды. Значит, наш участок нагреется на $10 \text{ }^\circ\text{C}$. Видно, что оценка нагрева получилась явно завышенной. Большая часть теплоты от разогрева, конечно, уходит в ткани, расположенные под кожей, и разносится по телу с кровотоком, но и оставшейся части оказывается достаточно, чтобы поднять температуру кожи на несколько градусов.

Как используют законы трения инспекторы ГИБДД

Два автомобиля столкнулись на перекрестке, повреждения получили небольшие, так как каждый водитель перед аварией успел почти полностью затормозить. Поэтому и виноватым себя никто не считал. Приехавший инспектор решил, что виноват тот водитель, у которого длина тормозного пути — черного следа от колес — больше (рис. 1.4). Почему?

Пусть автомобиль выезжал на перекресток со скоростью v , и его водитель, увидев другой автомобиль, стал тормозить, оставив на дороге след длиной L . Если считать, что к моменту столкновения вся ки-

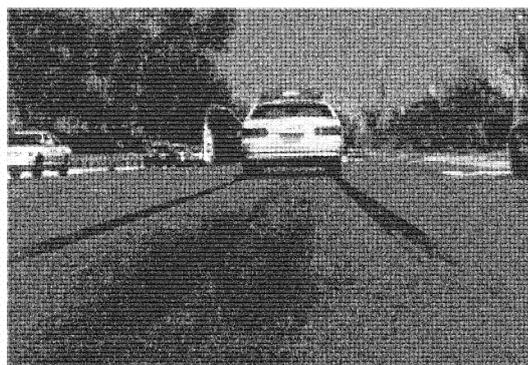


Рис. 1.4. Длина следа, оставленного колесами автомобиля после торможения, помогает оценить скорость автомобиля

нетическая энергия автомобиля перешла в работу по преодолению силы трения (в тепло), то

$$\frac{mv^2}{2} = \mu mgL,$$

где m — масса автомобиля, g — ускорение свободного падения. Откуда следует, что длина тормозного пути пропорциональна квадрату скорости автомобиля. Значит, тот из водителей, кто подъезжал к перекрестку с большей скоростью, имеет и большую длину тормозного пути. Так, например, для $\mu = 0,7$ длина тормозного пути 30 м соответствует скорости движения 73 км/ч, что на 13 км/ч больше разрешенной скорости движения по улицам города.

Почему все шины черные

Все изготовители шин используют один и тот же процесс — вулканизацию жидкой резины, при котором одной из добавок служит угольная пудра. В результате длинные молекулы жидкой резины сшиваются между собой атомами углерода, что превращает ее в эластичный и прочный материал. Так как частички угля черные и их относительно много (около 25% веса), то и резина становится черной. Чем больше добавлять в процессе вулканизации угольной пудры, состоящей практически из одного углерода, тем более жесткой, прочной и менее прилипчивой будет резина.

Как нажимать на газ и тормоз

Некоторые водители, увидев, что на светофоре зажегся зеленый свет, вдавливают педаль газа до конца, пытаясь как можно быстрее набрать максимальную скорость. Свидетели такого старта слышат свист проскальзывающих относительно дороги шин. Со стороны это выглядит действительно впечатляюще. Но как на самом деле? Неужели для того, чтобы машина приобрела наибольшее ускорение, надо заставлять колеса скользить по дорожному покрытию? Конечно, нет.

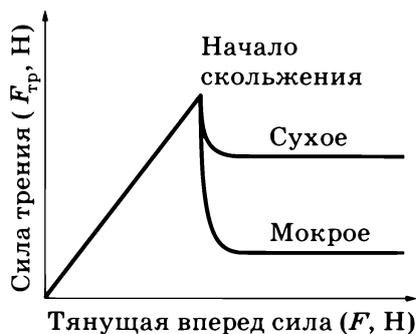


Рис. 1.5. Зависимость силы трения, действующей на тело, от силы, которая может привести или приводит к движению тела для сухого и мокрого дорожного покрытия

Известно, что движущей силой автомобиля служит сила трения колес о дорожное покрытие. Если резко нажать на педаль газа, вызвав проскальзывание шин относительно асфальта, то максимальное ускорение будет пропорционально силе трения скольжения, которая всегда меньше максимальной силы трения покоя (рис. 1.5). Поэтому быстрее ускоряются не те, кто сжигает резину покрышек, а те, кто использует силу трения покоя (т. е. не допускает скольжения) в том диапазоне, где она превышает силу трения скольжения.

Резкое торможение, как и ускорение, может привести к скольжению колес по дорожному покрытию, а значит, к уменьшению силы, тормозящей автомобиль. Ведь тормозящей силой тоже является сила трения. Поэтому, нажав очень резко на педаль газа и допустив проскальзывание, мы увеличиваем тормозной путь.

Чтобы минимизировать тормозной путь, в современных автомобилях устанавливают систему ABS (Antilock Brake System), которая, препятствуя скольжению колес по дорожному покрытию, трансформирует резкое нажатие на тормоз в последовательность нескольких торможений. Эффективность ABS-торможения особенно высока на мокрых дорогах, когда максимальная сила трения покоя может в несколько раз превышать силу трения скольжения.

Для чего нужны канавки на шинах автомобиля

Если автомобиль въезжает в лужу, а вода не успевает выскочить из-под колеса, то сцепление с дорогой теряется, и колесо может вращаться вокруг оси, не испытывая трения. В этом случае автомобиль теряет движущую силу и становится неуправляемым. Вот почему на покрышках автомобильных шин делают канавки для отвода воды из-под колеса, что помогает резине шин быстро находить контакт с покрытием дороги (рис. 1.6). Зимой водители используют зимнюю резину. Если зимой ездить на летних покрышках, то узкие канавки быстро забьются снегом, а он, превратившись в лед, сделает из автомобиля прекрасное средство для неуправляемого скольжения по дорогам. Поэтому покрышки, приспособленные для езды по заснеженным и обледенелым дорогам, имеют широкие канавки и гораздо большую поверхность контакта с дорожным покрытием. Ну, а если предстоит езда по бездорожью, то покрышки должны быть глубоко рифленными, так как грязь, имеющая большую вязкость, не пролезет через узкие канавки, когда будет двигаться под весом наезжающего колеса.

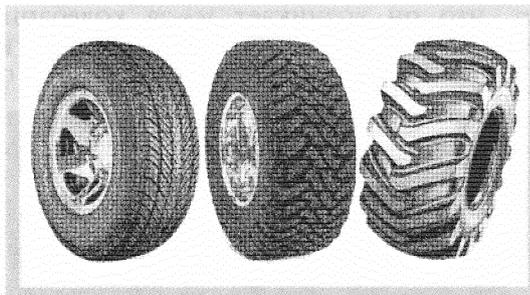


Рис. 1.6. Покрышки автомобильных шин, предназначенные для летних (слева), зимних (середина) дорог и бездорожья (справа)

Какими должны быть шины у гоночных автомобилей

Каждый пилот гоночного болида хочет иметь хорошее сцепление с дорогой, чтобы обеспечить быстрый старт. Это значит, что шины автомобиля должны хорошо прилипнуть к дорожному покрытию. Ведь только тогда максимальная сила трения покоя будет велика. Но такая прилипчивая шина всегда будет оставлять на дороге след из частичек, навсегда прилипших к дорожному покрытию. Другими словами, износ шин с высоким сцеплением тоже высок. Поэтому на гонках «Формулы-1» средний ресурс шины около 200 км, в то время как у обычных шин он может составлять несколько десятков тысяч километров.

Известно, что автомобильные гонки проходят на «лысой» резине или шинах с несколькими очень неглубокими канавками (рис. 1.7). Канавки в шинах гоночных автомобилей не нужны, так как они увеличивают сцепление с дорогой только тогда, когда она мокрая. А при мокрой дороге гонки не проводят.

Для производства шин гоночных автомобилей используется специальная липкая резина. Сила трения этих шин на сухой дороге растет с увеличением площади контакта, таким образом вступая в противоречие с классическим законом, справедливым для трения твердых и неэластичных поверхностей. Чтобы обеспечить максимальную силу трения, шины колес гоночных автомобилей делают очень широкими (до 0,38 м), что также позволяет лучше рассеивать тепло, образующееся при трении о дорожное покрытие.

Чистая резина прилипает к дороге лучше, чем грязная. Поэтому перед самым стартом покрышки с помощью специальных устройств и процедур нагревают до 80 °С, очищая их поверхность и обеспечивая хорошее прилипание к дорожному покрытию. Кстати, шины гоночных автомобилей иногда надувают чистым азотом, так как влага, содержащаяся в обычном воздухе, при нагревании шин испаряется и увеличивает давление в колесах, что создает дополнительные трудности в управлении.

О чем поют колеса

Шум, издаваемый колесами автомобилей — одна из основных проблем больших городов. Огромные средства тратятся ежегодно на борьбу с этим шумом, так как стоимость одного километра звукопоглощающего барьера, устанавливаемого вдоль шоссе, очень высока. Есть несколько теорий возникновения этого шума. Одна из них утверждает, что он возникает из-за колебаний деформированных участков внешней части покрышки, после того как они распрямляются. Другая теория связывает появление шума с отлипанием резины от дороги.

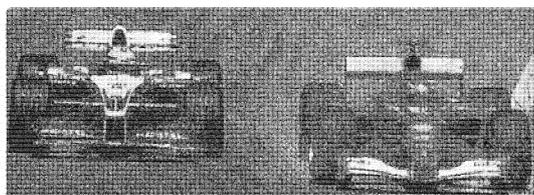


Рис. 1.7. Шины гоночных болидов «Формулы-1» очень широкие и совсем «лысые»

Ну, а самая романтичная гипотеза объясняет шум тем, что причиной всему является воздух, движущийся по канавкам автомобильных покрышек, как по трубам органа, и поэтому поющий.

Всегда ли справедлив классический закон трения

Уже в XIX в. стало ясно, что закон Амонтона — Кулона (1.2) не всегда правильно описывает силу трения, а коэффициент трения отнюдь не является универсальной характеристикой. Прежде всего было отмечено, что коэффициент трения зависит не только от того, какие материалы контактируют, но и от того, насколько гладко обработаны контактирующие поверхности. Выяснилось, например, что сила трения в вакууме всегда больше, чем при нормальных условиях.

Материалы	Коэффициент трения покоя, μ	
	в вакууме	на воздухе
Сталь — сталь	0,8	0,3
Медь — медь	1,2	0,8

Лауреат Нобелевской премии по физике Р. Фейнман (1965) в своих лекциях отмечает: «...Таблицы, в которых перечислены коэффициенты трения «стали по стали», «меди по меди» и прочее, — все это сплошное надувательство, ибо в них этими мелочами пренебрегают, а ведь они-то и определяют значение μ . Трение «меди о медь» и т. д. — это на самом деле трение «о загрязнения, приставшие к меди».

Можно, конечно, пойти по другому пути и, изучая трение «меди по меди», измерять силы при движении идеально отполированных и дегазированных поверхностей в вакууме. Но тогда два куска меди просто слипнутся, и коэффициент трения покоя увеличится со временем, которое прошло с начала контакта поверхностей. По тем же причинам коэффициент трения скольжения будет зависеть от скорости, т. е. увеличиваться с ее уменьшением. Значит, точно определить силу трения для чистых металлов тоже невозможно.

Тем не менее для сухих стандартных поверхностей классический закон трения почти точен, хотя причина такого вида закона до самого последнего времени оставалась непонятной. Ведь теоретически оценить коэффициент трения между двумя поверхностями никто так и не смог.

Как атомы трутся друг о друга

Сложность изучения трения заключается в том, что место, где этот процесс происходит, скрыто от исследователя. Несмотря на это, ученые уже давно пришли к заключению, что сила трения связана с тем, что на микроскопическом уровне (т. е. если посмотреть в микроскоп) соприкасающиеся поверхности шероховаты даже в том случае, когда они хорошо отполированы. Поэтому скольжение двух поверхностей друг по другу может напоминать фантастический случай, когда перевернутые Кавказские горы трутся, например, о Гималаи (рис. 1.8).

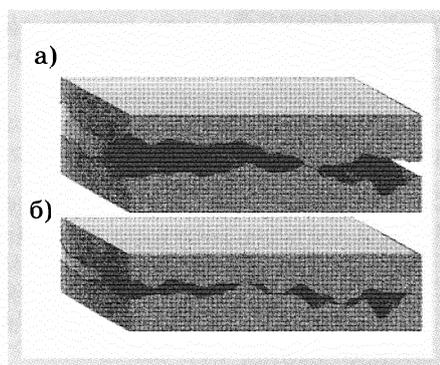


Рис. 1.8. Схематическое изображение места контакта скользящих поверхностей при малой (а) и большой (б) сжимающей их силе

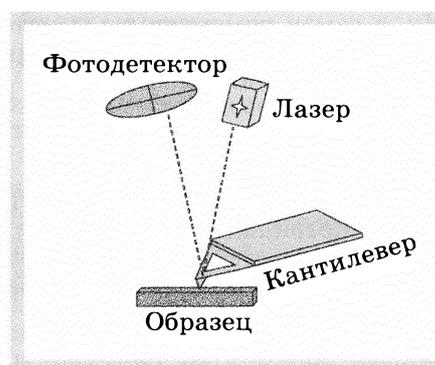


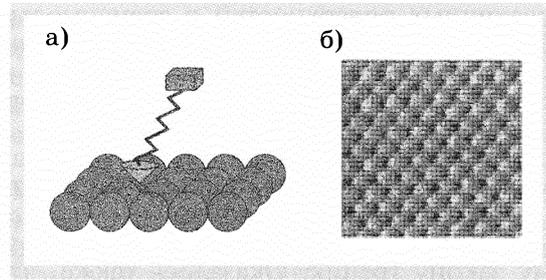
Рис. 1.9. Принцип работы атомно-силового микроскопа. Штриховой линией показан ход луча лазера

Прежде думали, что механизм трения несложен: поверхность покрыта неровностями, и трение есть результат следующих друг за другом циклов «подъем — спуск» скользящих частей. Но это неправильно: ведь тогда не было бы потерь энергии, а при трении энергия расходуется. Поэтому более правильной можно считать следующую модель трения. При скольжении трущихся поверхностей микронеровности задевают друг за друга, и в точках соприкосновения противостоящие друг другу атомы сцепляются. При дальнейшем относительном движении тел эти сцепки рвутся и возникают колебания атомов, подобные тем, какие происходят при отпуске растянутой пружины. Со временем эти колебания затухают, а их энергия превращается в тепло, растекающееся по обоим телам. В случае скольжения мягких тел возможно также разрушение микронеровностей, так называемое «пропахивание», в этом случае механическая энергия расходуется на разрушение атомарных связей.

Таким образом, если мы хотим изучать трение, нам надо ухитриться двигать песчинку, состоящую из нескольких атомов, вдоль поверхности на очень маленьком расстоянии от нее, измеряя при этом силы, действующие на эту песчинку со стороны поверхности. Это стало возможным после изобретения атомно-силовой микроскопии Г. Биннигом и Г. Рорером, которым в 1986 г. была присуждена Нобелевская премия по физике. Создание атомно-силового микроскопа (АСМ), способного чувствовать силы притяжения и отталкивания, возникающие между отдельными атомами, дало возможность, наконец, «пощупать», что такое силы трения, открыв новую область науки о трении — нанотрибологию.

Основой АСМ (рис. 1.9) служит микрозонд, обычно изготовленный из кремния и представляющий собой тонкую пластинку-консоль (ее называют кантилевером, от англ. cantilever — консоль, балка). На конце кантилевера (длина 500 мкм, ширина 50 мкм, толщина 1 мкм) расположен очень острый шип (высота 10 мкм, радиус закругления от 1 до 10 нм), оканчивающийся группой из одного или нескольких ато-

Рис. 1.10. Схематическое изображение микрозонда атомно-силового микроскопа, скользящего над атомами поверхности на постоянной высоте (а), и изображение поверхности NaF (2×2 нм), полученное с помощью этого микроскопа (б)



мов. При перемещении микрозонда вдоль поверхности образца острие шипа приподнимается и опускается, очерчивая микрорельеф поверхности подобно тому, как скользит по грампластинке патефонная игла. На выступающем конце кантилевера (над шипом) расположена зеркальная площадка, на которую падает и от которой отражается луч лазера. Когда шип опускается и поднимается на неровностях поверхности, отраженный луч отклоняется, и это отклонение регистрируется фотодетектором. Данные фотодетектора используются в системе обратной связи, которая может обеспечивать либо постоянное удаление шипа от поверхности образца, либо постоянную силу давления острия на образец.

В первом случае пьезоэлектрический преобразователь может регистрировать движение кантилевера, прыгающего от одного атома исследуемой поверхности к другому, строя таким образом объемный рельеф поверхности образца в режиме реального времени. Разрешающая способность метода составляет примерно $0,1-1$ нм по горизонтали и $0,01$ нм по вертикали. Смещая зонд по горизонтали, можно получить серию рельефов и с помощью компьютера построить трехмерное изображение (рис. 1.10).

С помощью АСМ с начала 1990-х гг. проводятся систематические исследования силы трения микрозондов при их скольжении вдоль

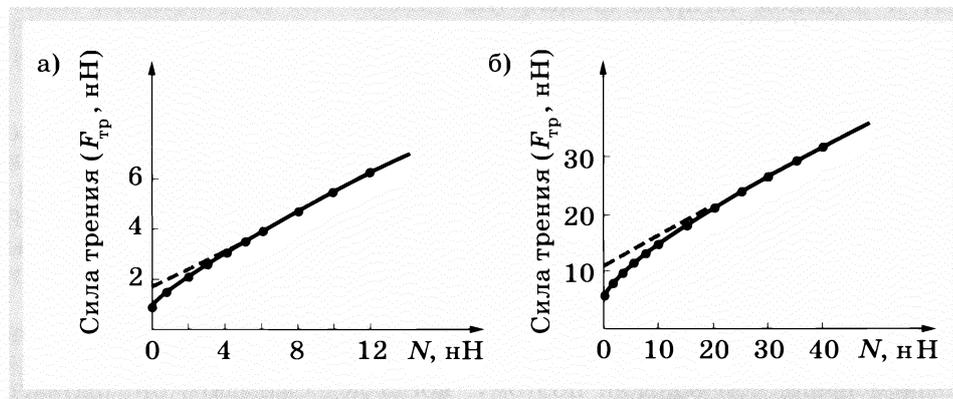


Рис. 1.11. Зависимость силы трения скольжения микрозонда от внешней силы N , прижимающей его к графитовой поверхности: а) радиус кривизны зонда 17 нм; б) радиус кривизны зонда 58 нм. При малых N зависимость криволинейная, а при больших она приближается к прямой, обозначенной штриховой линией

различных поверхностей и зависимости этих сил от силы прижатия. Оказалось, что для используемых обычно зондов, сделанных из кремния, микроскопическая сила трения скольжения составляет около 60—80% от прижимающей силы, которая составляет не более 10 нН (рис. 1.11, *а*). Как и следовало ожидать, сила трения скольжения увеличивается с размером микрозонда, так как число атомов, одновременно его притягивающих, увеличивается (рис. 1.11, *б*).

Таким образом, сила трения скольжения микрозонда зависит от площади его контакта с поверхностью, что противоречит классическому закону трения. Оказалось также, что сила трения скольжения не становится равной нулю при отсутствии силы, прижимающей микрозонд к поверхности. Да это и понятно, так как окружающие микрозонд атомы поверхности так близко расположены к нему, что притягивают его даже в отсутствие внешней силы сжатия. Поэтому и основное предположение классического закона — о прямой пропорциональной зависимости силы трения от силы сжатия — в нанотрибологии тоже не соблюдается.

Однако все эти расхождения между основным законом и данными нанотрибологии, полученными с помощью АСМ, легко устраняются. При увеличении силы, прижимающей скользящее тело, увеличивается число микроконтактов, а значит, увеличивается и суммарная сила трения скольжения. Поэтому никаких противоречий между полученными данными ученых и старым законом нет.

Долгое время было принято считать, что, принуждая одно тело скользить по другому, мы ломаем малые неоднородности одного тела, которые цепляются за неоднородности поверхности другого. Для этого и нужна сила трения. Поэтому по старым представлениям возникновение силы трения часто связывают с повреждением микровыступов трущихся поверхностей, с их так называемым износом. Нанотрибологические исследования с использованием АСМ и других современных методик показали, что сила трения между поверхностями может быть даже в тех случаях, когда они не повреждаются. Причиной такой силы трения служат постоянно возникающие и рвущиеся связи между трущимися атомами.

Почему лед скользкий

Узнать, почему можно скользить по льду, удалось ученым только сейчас. А началось все давным-давно, когда в 1849 г. братья Джеймс и Уильям Томсон (второму впоследствии за большие заслуги был присвоен титул лорда Кельвина) выдвинули гипотезу, согласно которой лед под нами плавится оттого, что мы на него давим. Поэтому мы скользим уже не по льду, а по образовавшейся на его поверхности пленке воды.

Действительно, если увеличить давление, то температура плавления льда понизится. Происходит это вот почему. Известно, что плотность льда меньше, чем воды, и поэтому, когда лед сжимают, он, пытаясь уменьшить деформацию, вызванную увеличением давления, понижает температуру плавления. Это одно из проявлений так называемого принципа Ле Шателье: «внешнее воздействие, выводящее систему из термодинамического равновесия, вызывает в ней процессы, стремящиеся ослабить результаты этого воздействия».

Как показали расчеты и эксперименты, чтобы понизить температуру плавления льда на один градус, необходимо давление увеличить до 121 атм. (12,2 МПа). Попробуем посчитать, какое давление оказывает спортсмен на лед, когда скользит по нему на одном коньке с длиной лезвия 20 см и толщиной 0,3 см. Если считать, что масса спортсмена 75 кг, то его давление на лед составит около 12 атм. Таким образом, стоя на коньках, мы едва ли сможем понизить температуру плавления льда больше, чем на 0,1 °С. Значит, объяснить скольжение по льду на коньках, и тем более в обычной обуви, опираясь на принцип Ле Шателье, невозможно, если за окном, например, –10 °С.

В 1939 г., когда стало ясно, что понижением температуры плавления скользкость льда не объяснить, Ф. Бауден и Т. Хьюз предположили, что теплоту, необходимую для плавления льда под коньком, дает сила трения. Однако эта теория не могла объяснить, почему тяжело стоять на льду, даже не двигаясь. С начала 1950-х гг. ученые стали считать, что лед скользкий из-за тонкой пленки воды, образовавшейся на его поверхности в силу каких-то неизвестных причин. Только в конце 1990-х гг. изучение того, как лед рассеивает рентгеновские лучи, действительно показало, что поверхность льда не является упорядоченной кристаллической структурой, а скорее похожа на жидкость (рис. 1.12).

Ученые объяснили это тем, что расположенные на поверхности льда молекулы воды оказываются в особых условиях. Силы, заставляющие их находиться в узлах гексагональной решетки, действуют на них только снизу. Поэтому поверхностным молекулам ничего не стоит «уклониться от советов» молекул, находящихся в решетке, и если это происходит, то к такому же решению «приходят» сразу несколько поверхностных слоев молекул воды. В результате на поверхности льда образуется пленка жидкости, служащая хорошей смазкой при скольжении. Кстати, тонкие пленки жидкости образуются не только на поверхности льда, но и на поверхности многих других кристаллов.

Толщина жидкой пленки увеличивается с ростом температуры. Чем выше температура, тем больше внутренняя энергия молекул, и тем больше поверхностных слоев вырывается из гексагональных решеток. Наличие примесей (молекул, отличных от воды) тоже мешает поверх-

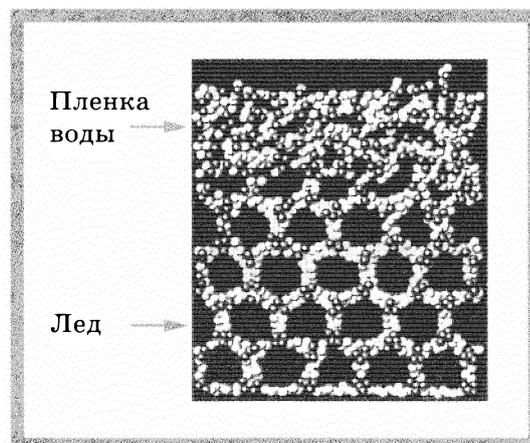


Рис. 1.12. Схематическое изображение поперечного среза льда. Беспорядочное расположение молекул воды на поверхности соответствует пленке жидкости, а гексагональная структура в толще — льду. Темные кружки — атомы кислорода, светлые — атомы водорода

ностным слоям образовывать кристаллические решетки. Поэтому увеличить толщину жидкой пленки можно, растворив в ней какие-либо примеси, например обычную соль. Этим и пользуются коммунальные службы, когда борются зимой с обледенением дорог и тротуаров.

Что такое трение качения

В идеальном случае, когда колесо, изготовленное из несжимаемого материала, по инерции катится по гладкой недеформируемой поверхности, никакие силы трения на это колесо не действуют (рис. 1.13).

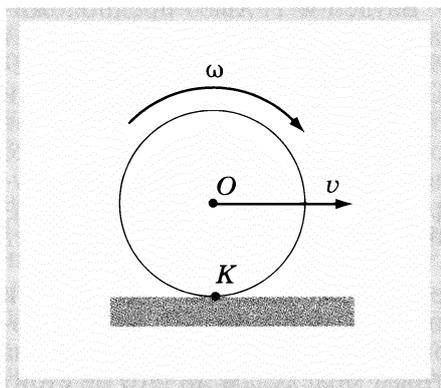


Рис. 1.13. Качение несжимаемого диска радиусом R по несжимаемой поверхности. K — точка касания и мгновенный центр вращения диска с угловой скоростью ω , результатом которого является движение центра диска O со скоростью $v = \omega R$

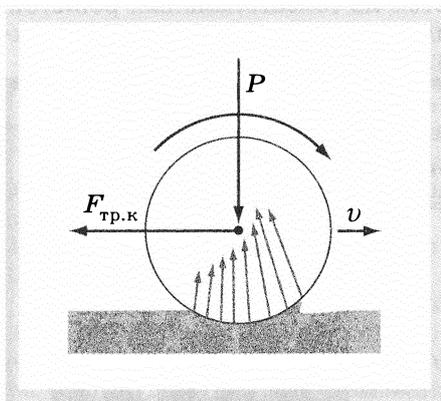


Рис. 1.14. Возникновение силы трения при качении твердого диска по мягкой дороге

Колесо, касаясь поверхности в одной точке, вращается вокруг этой точки, потом точкой касания и центром вращения становится другая точка и т. д. Так как точка касания не движется относительно поверхности, то и сила трения скольжения отсутствует.

Однако в реальных условиях дорожное покрытие и материал, из которого сделан диск колеса, не являются абсолютно жесткими. Рассмотрим сначала случай на рисунке 1.14. Если поставить колесо на мягкую поверхность, надавить сверху силой P и попытаться, вращая его, продвинуть вперед со скоростью v , то мы столкнемся с силой сопротивления качения $F_{тр.к}$. Колесо деформирует поверхность под собой так, что впереди появляется бугорок, который все время приходится преодолевать. Горизонтальная составляющая сил реакции этого бугорка и представляет собой силу трения качения $F_{тр.к}$. Вертикальные составляющие сил сопротивления бугорка компенсируются силой тяжести автомобиля. Так как высота бугорка пропорциональна весу автомобиля, то и сила трения качения $F_{тр.к}$ тоже пропорциональна весу автомобиля и силе реакции со стороны дороги N : $F_{тр.к} = \mu N$.

Рассмотрим случай на рисунке 1.15. При качении мягкого колеса по твердой дороге на переднюю часть соприкасающейся с дорогой поверхности колеса (окрашена светлым) все время «наезжают». Поэтому

му она сжимается больше, чем задняя, и сила реакции от передней части колеса, направленная противоположно движению, тоже больше. Сила трения качения равна разности горизонтальных составляющих сил реакции от передней и задней частей колеса. Так как сжатие колеса пропорционально весу автомобиля (или силе реакции опоры), то $F_{\text{тр.к}} = \mu N$.

Силы трения качения определяются жесткостью материалов колеса и дорожного покрытия. Чем больше жесткость, тем меньше сила трения качения. Поэтому для того, чтобы сократить расходы на топливо, необходимо как можно сильнее накачивать автомобильные колеса, делая их более жесткими. Достаточно пощупать колеса грузовика, чтобы убедиться в этом. У пассажирского автомобиля давление в колесах гораздо меньше, так как с жесткими колесами пассажиры будут ощущать все неровности дороги. В результате его шины больше деформируются и соответственно растет сила трения качения.

Для очень дальних перевозок построили железные дороги, где железное колесо катится по железному рельсу с очень малым коэффициентом трения качения (табл. 1.1). Тормозят поезда медленно, но эксплуатация их очень выгодна.

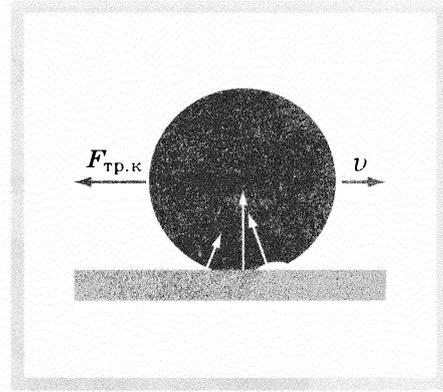


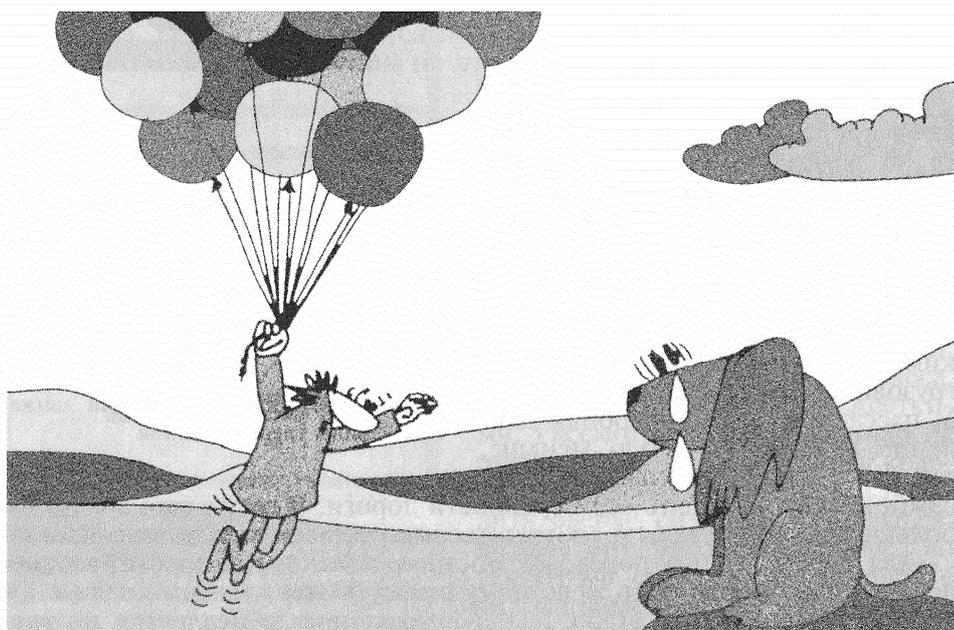
Рис. 1.15. Возникновение силы трения качения мягкого колеса по жесткой дороге. При качении мягкого колеса деформация его передних участков (выделено светлым) больше, чем задних, это приводит к появлению горизонтальной составляющей силы, действующей со стороны дороги, и тормозящей движение — силы трения качения

Таблица 1.1

Поверхность	Коэффициент трения качения, μ	Коэффициент трения скольжения, μ
Колесо пассажирского автомобиля на асфальте	0,015	0,8
Колесо грузовика на асфальте	0,006—0,01	0,8
Железнодорожное колесо на рельсе	0,001	0,1

Глава 2

С Архимедом и Ньютоном вверх и вниз через атмосферу



Можно ли улететь в космос на воздушном шаре

В течение многих лет К. Э. Циолковский пытался обосновать сначала возможность, а потом невозможность таких полетов. И только в 1903 г. великий ученый дал ответ на этот вопрос в ставшей классической работе «Исследование мировых пространств реактивными приборами».

Рассчитывая необходимые размеры шара массой 1 кг, наполненного водородом, который мог бы поднять полезный груз массой 1 кг на высоту 27 км, Циолковский пришел к заключению, что «...даже папиросная бумага будет в 5 раз тяжелее той материи, которая должна быть употреблена на наш аэростат. Такая материя, в применении к аэростату, невозможна, потому что оболочка, сделанная из нее, будет рваться и сильно пропускать газ». И далее: «Что же сказать о поднятии приборов на большую высоту? Размеры аэростатов должны быть еще значительно больше, но не надо при этом забывать, что с увеличением размеров воздушного шара разрывающие оболочку силы все более и более берут перевес над сопротивлением материала. **За пределы атмосферы поднятие приборов с помощью воздушного шара, разумеется, совсем немислимо...**» Таким образом, по мнению

Циолковского, только по причине отсутствия материалов для аэростатов, которые были бы достаточно тонкими и прочными, полет аэростатов в космос невозможен.

Прошло более ста лет, и сейчас создано довольно много материалов, о которых Циолковский не мог и мечтать. Использование полиэтиленовой пленки толщиной 3,4 мкм дало возможность ученым из японского института космических исследований изготовить стратостат ВU60-1 объемом 60 000 м³ (диаметр 50 м), масса которого составила всего 35 кг. В мае 2002 г. этот стратостат установил рекорд, поднявшись на высоту 53 км с полезным грузом массой около 5 кг, состоящим из двух ТВ-камер и прибора GPS для определения высоты (рис. 2.1).

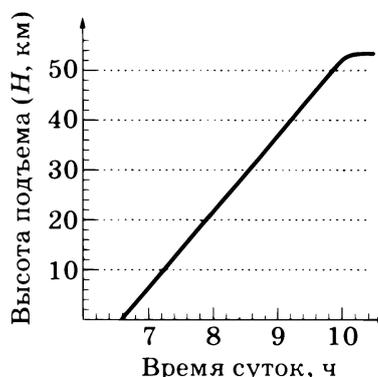


Рис. 2.1. График рекордного подъема стратостата ВU60-1, полученный с помощью GPS 23 мая 2002 г.

Оказалось, что пророчество Циолковского не совсем верно. Ведь можно считать, что с помощью воздушных шаров приборы за пределы атмосферы все-таки подняли. Так, может быть, вообще не существует верхнего предела для высоты, на которую может подняться стратостат?

Оцениваем энергию опускающегося атмосферного столба

Аэростат движется вверх, так как снизу на него действует выталкивающая сила Архимеда. Поднимаясь, аэростат освобождает место под собой, которое занимает воздух, вытесненный аэростатом сверху. Этот движущийся сверху вниз воздух уменьшает свою потенциальную энергию, и часть этой энергии переходит в механическую энергию стратостата. Таким образом, если $M_{\text{атм}}$ — масса столба атмосферы над стратостатом, а H — характерная высота стратостата, то максимальная энергия W_{max} , которая может быть передана стратостату от опускающегося столба атмосферы, равна

$$W_{\text{max}} = M_{\text{атм}} g H. \quad (2.1)$$

Из справочника можно узнать, что плотность ρ воздуха в атмосфере уменьшается с высотой h экспоненциально (рис. 2.2):

$$\rho = \rho_0 \cdot e^{-bh}, \quad (2.2)$$

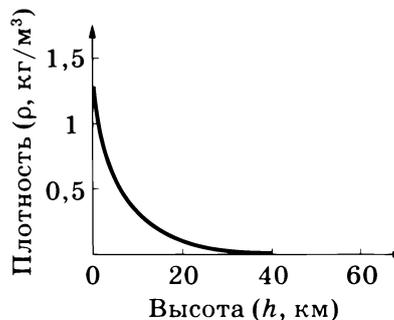


Рис. 2.2. Изменение плотности воздуха атмосферы с высотой

где $\rho_0 = 1,23 \text{ кг/м}^3$ — плотность воздуха на уровне моря, $b = 0,00013 \text{ м}^{-1}$. Если максимальная площадь поперечного сечения стратостата в горизонтальной плоскости равна S , то, интегрируя формулу (2.2), можно получить, что

$$M_{\text{атм}} = \frac{\rho_0}{b} \cdot S. \quad (2.3)$$

Подставляя формулу (2.3) в формулу (2.1), получаем

$$W_{\text{max}} = \frac{\rho_0 \cdot g}{b} SH \approx \frac{\rho_0 \cdot g}{b} V, \quad (2.4)$$

где V — объем стратостата. Величина $\left(\frac{\rho_0 \cdot g}{b}\right)$ равна атмосферному давлению у самой земли: $P_{\text{атм}} \approx 101 \text{ кПа}$.

Можно ли навсегда покинуть Землю на стратостате?

Сравним энергию опускающегося столба атмосферы W_{max} с энергией W_2 , которую необходимо передать телу массой m , чтобы оно навсегда покинуло Землю, придав ему вторую космическую скорость (11,2 км/с). Можно показать, что

$$W_2 = mgR_3, \quad (2.5)$$

где R_3 — радиус Земли. Если считать, что вся энергия опускающегося столба атмосферы переходит в кинетическую энергию поднимающегося тела, то, как следует из формул (2.4) и (2.5), это тело, поднимаясь, может достичь второй космической скорости, если

$$\frac{m}{V} \leq \frac{\rho_0}{b \cdot R_3} \approx 1,5 \cdot 10^{-3} \text{ кг/м}^3. \quad (2.6)$$

Уравнение (2.6) доказывает, что далеко улететь в космос, затратив только энергию атмосферы, тело сможет тогда, когда мы научимся «заполнять» почти невесомые и очень прочные стратостаты вакуумом. Например, если изготовить заполненный вакуумом стратостат массой 1 кг и объемом 1000 м³, то такой гипотетический стратостат в принципе мог бы улететь навсегда в космос, если не будет сопротивления атмосферы его движению. Конечно, сегодня все это можно считать фантастикой, но сколько таких фантастических проектов человечество сделало реальностью!

Кончаем фантазировать и оцениваем максимальную высоту подъема стратостата

Оболочку стратостата на земле заполняют лишь частично. Если до конца надуть стратостат гелием еще у земли, то, поднявшись высоко, он может лопнуть, не выдержав разности давлений. Поэтому отрывающийся от земли стратостат похож на длинный сморщенный чулок,

слегка расширяющийся кверху. Поднимаясь в разреженные слои атмосферы, стратостат постепенно расширяется и принимает форму, близкую к шарообразной. Оценим максимальный подъем таких стратостатов.

Стратостат перестанет двигаться вверх и достигнет максимальной высоты h_{\max} , когда сила Архимеда станет равной силе тяжести. К тому времени стратостат раздуется полностью до объема V_{\max} , а сила Архимеда F_A станет равна

$$F_A = \rho_0 \cdot e^{-bh_{\max}} \cdot V_{\max} \cdot g. \quad (2.7)$$

Пусть масса оболочки стратостата и оборудования равна M , а объем гелия, которым был заполнен стратостат на земле при температуре 293 °К и нормальном атмосферном давлении, составляет V_{\min} . Тогда масса m_{He} , заполняющего стратостат, равна $\rho_{\text{He}} V_{\min}$. Таким образом, сила тяжести F_T , действующая на стратостат, равна

$$F_T = (M + m_{\text{He}}) g = Mg + \rho_{\text{He}} \cdot V_{\min} \cdot g. \quad (2.8)$$

Приравняв правые части уравнений (2.7) и (2.8), получаем выражение для максимальной высоты подъема h_{\max} гелиевого стратостата:

$$h_{\max} = \frac{1}{b} \cdot \ln \left(\frac{\rho_0 \cdot V_{\max}}{M + \rho_{\text{He}} \cdot V_{\min}} \right). \quad (2.9)$$

Из уравнения (2.9) следует, что чем меньше объем V_{\min} , тем выше стратостат поднимется. Однако уменьшать объем V_{\min} мы можем только до тех пределов, которые позволяют стратостату оторваться от земли. Как легко показать,

$$\frac{V_{\min}}{M} > \frac{1}{\rho_0 - \rho_{\text{He}}}. \quad (2.10)$$

Величина в правой части неравенства (2.10) очень близка к значению 1 м³/кг. Таким образом, стратостат массой (без газа) 40 кг достаточно заполнить гелием объемом 40 м³, и он медленно пойдет вверх. Но на самом деле объем V_{\min} должен быть на порядок больше, чем представленный неравенством (2.10). Заполняя стратостат, мы должны его расправить, иначе, поднимаясь вверх, незаполненный шлейф стратостата может запутаться. Другими словами, гелий объемом V_{\min} должен оказаться в верхней части стратостата, для чего и сооружают специальную платформу, на которой заполняют стратостат. Будем считать, например, что $V_{\min} = V_{\max}/100$. Подставляя в уравнение (2.9) $M = 40$ кг, $V_{\max} = 60\,000$ м³, $V_{\min} = 600$ м³, $\left(\frac{V_{\min}}{M} = 15 \text{ м}^3/\text{кг}\right)$, получаем, что $h_{\max} \approx 48,2$ км. Итак, наша оценка почти совпала с рекордной высотой подъема ВУ60-1.

Можно ли, заполнив тот же стратостат меньшим объемом гелия, добиться существенно большей высоты поднятия? Подставив, например, $V_{\min} = 400$ м³ $\left(\frac{V_{\min}}{M} = 10 \text{ м}^3/\text{кг}\right)$ в уравнение (2.9), получаем $h_{\max} \approx 50,3$ км, что всего на 2 км выше.

Как следует из уравнения (2.9), чтобы поднять стратостат еще выше, мы можем не только уменьшать V_{\min} , но и увеличивать V_{\max} . Определим зависимость высоты h_{\max} от объема V_{\max} , считая, что $\frac{V_{\min}}{M} = 10 \text{ м}^3/\text{кг}$ и стратостат не поднимает никакого полезного груза.

Пусть полностью наполненный стратостат имеет форму шара радиусом R_{\max} . Тогда поверхность этого шара равна $4\pi (R_{\max})^2$, а масса оболочки стратостата $M_{\text{об}} = \rho_{\text{об}} \cdot d \cdot 4\pi (R_{\max})^2$, где $\rho_{\text{об}}$ — плотность материала оболочки, а d — ее толщина. Таким образом, для такого стратостата отношение $\left(\frac{V_{\max}}{M}\right) = \frac{R_{\max}}{3\rho_{\text{об}} \cdot d}$, и, разделив числитель и знаменатель

дроби, от которой берется логарифм в уравнении (2.9), на M , получаем

$$h_{\max} = \frac{\ln\left(\frac{\rho_0 \cdot \frac{V_{\max}}{M}}{1 + \rho_{\text{He}} \cdot \frac{V_{\min}}{M}}\right)}{b} = \frac{\ln\left(\frac{\rho_0 \cdot \frac{R_{\max}}{3\rho_{\text{об}} \cdot d}}{1 + \rho_{\text{He}} \cdot \frac{V_{\min}}{M}}\right)}{b}. \quad (2.11)$$

Зависимость (2.11) высоты h_{\max} от объема V_{\max} показана на рисунке 2.3 для стратостата, сделанного из полиэтиленовой пленки ($\rho_{\text{об}} = 1000 \text{ кг/м}^3$) толщиной $d = 3,4 \text{ мкм}$ (сплошная линия) при условии, что $\frac{V_{\min}}{M} = 10 \text{ м}^3/\text{кг}$. Видно, что с увеличением объема стратостата увеличивается и высота h_{\max} его подъема, но в диапазоне от 60 000 до 120 000 м^3 лишь на 1 км. В то же время использование более тонкой пленки, например, толщиной 2 мкм (штриховая линия), дает увеличение высоты подъема почти на 5 км для стратостатов любых размеров.

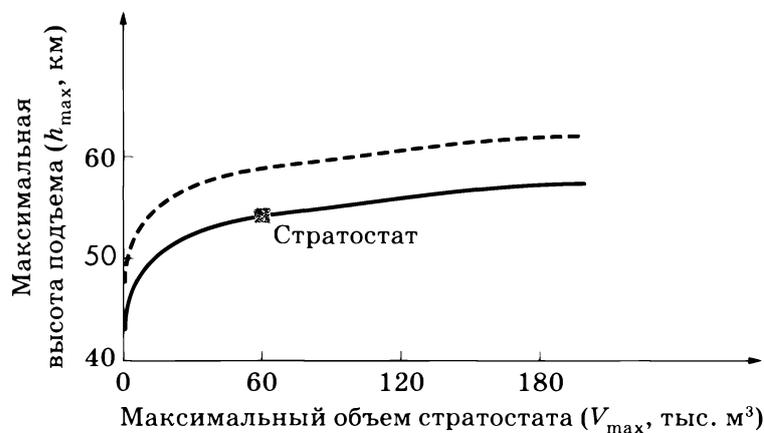


Рис. 2.3

Оценим скорость подъема стратостата

Стратостат является незаменимым устройством для послынного изучения атмосферы, так как он поднимается вверх довольно медленно. Так, например, стратостат ВУ60-1 до своей рекордной высоты поднимался более трех часов практически равномерно со скоростью около 260 м/мин (см. рис. 2.1). От каких параметров зависит скорость и время подъема стратостата, и можно ли их оценить теоретически?

На стратостат действуют три силы: сила Архимеда, сила сопротивления воздуха и сила тяжести. Сила Архимеда F_A , толкающая вверх стратостат объемом V , находящийся на высоте h , равна

$$F_A = \rho_0 \cdot e^{-bh} \cdot V \cdot g. \quad (2.12)$$

Формула для силы тяжести F_T стратостата, заполненного гелием, была выведена ранее [см. формулу (2.8)].

При равномерном подъеме стратостата со скоростью v на него действует сила F_c^1 , равная

$$F_c = c_v \cdot S \cdot \left(\frac{\rho v^2}{2} \right), \quad (2.13)$$

где S — площадь поперечного сечения стратостата, а c_v — безразмерный коэффициент, который для шарообразной формы стратостата составляет 0,24. При ускоренном движении стратостат придает ускорение некоторой массе воздуха, находящейся перед ним, которую называют присоединенной массой M_n . Присоединенная масса M_n воздуха при ускоренном подъеме шарообразного стратостата равна половине объема воздуха, занимаемого стратостатом.

Итак, все силы, действующие на стратостат, описаны, но перед тем, как оценить скорость подъема, нам необходимо описать изменения формы и объема стратостата при подъеме. Пусть верхняя часть стратостата всегда имеет форму полусферы радиусом r , равным радиусу поперечного сечения стратостата, а нижняя его часть представляет собой половину эллипсоида вращения с полуосями r , r_{\max} и L (рис. 2.4).

При подъеме вверх, когда давление воздуха снаружи падает, объем стратостата увеличивается, площадь его поперечного сечения (πr^2) увеличивается, а вертикальный размер L уменьшается, приближаясь к r_{\max} . В конце концов стратостат принимает шарообразную форму радиусом r_{\max} . Чтобы описать все промежуточные формы стратостата, можно считать, что для них справедливо следующее равенство:

$$r + L = 2r_{\max}. \quad (2.14)$$

Можно показать, что объем стратостата, для которого справедливо равенство (2.14), равен

$$V = (4/3) \pi r^2 r_{\max} = (4/3) S r_{\max}. \quad (2.15)$$

¹ Сила сопротивления воздуха F_c включает в себя две составляющие (подробнее см.: Стасенко А. Л. Физические основы полета. — (Библиотечка «Квант»). — Вып. 91. Бюро Квантум. — М., 2005).

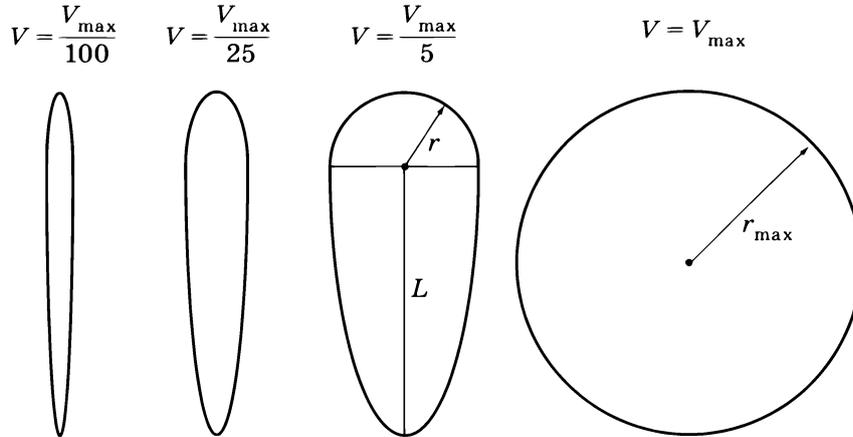


Рис. 2.4. Изменение формы и объема V «модельного» стратостата при подъеме

Пока оболочка стратостата не натянута, его объем можно вычислять по уравнению Менделеева — Клапейрона, считая, что давление и температура гелия равны соответствующим параметрам воздуха снаружи. При этом сила Архимеда при подъеме остается неизменной и равной

$$F_A = \frac{p_{\text{атм}} V_{\text{мин}}}{RT_{\text{атм}}} M_{\text{возд}} \cdot g. \quad (2.16)$$

При этом объем стратостата достигает своего максимального объема V_{max} на высоте h :

$$h = \frac{1}{b} \ln \left(\frac{M_{\text{He}} \cdot \rho_0 V_{\text{max}}}{M_{\text{возд}} \cdot m_{\text{He}}} \right) = \frac{1}{b} \ln \left(\frac{M_{\text{He}}}{M_{\text{возд}}} \cdot \frac{\rho_0 V_{\text{max}}}{\rho_{\text{He}} V_{\text{мин}}} \right). \quad (2.17)$$

Для стратостата ВУ60-1 объемом $V_{\text{мин}} = 300 \text{ м}^3$ высота h , вычисленная по формуле (2.17), равна 40,9 км. Таким образом, первые 40 км стратостат поднимался под действием постоянной силы Архимеда, затем эта сила стала уменьшаться, так как объем стратостата уже не мог увеличиваться, а еще через 13 км сила Архимеда стала равна силе тяжести, и стратостат остановился. Определим скорость движения стратостата на участке подъема с постоянной силой Архимеда.

С одной стороны, как следует из формулы (2.13), сила сопротивления воздуха F_c зависит от произведения $S\rho$. С другой стороны, стратостат изменяет свою форму и объем в соответствии с формулой (2.15), откуда получаем, что

$$S = \left(3/4 \frac{V}{r_{\text{max}}} \right).$$

Подставляя это выражение для S в формулу (2.13), получаем

$$\begin{aligned} F_c &= c_v \cdot S \left(\frac{\rho v^2}{2} \right) = \frac{3c_v}{8r_{\max}} \cdot \frac{\rho V}{RT} \cdot M_{\text{возд}} \cdot v^2 = \\ &= \frac{3c_v}{8r_{\max}} \cdot \frac{p_{\text{атм}} V_{\min}}{RT_{\text{атм}}} \cdot M_{\text{возд}} \cdot v^2, \end{aligned} \quad (2.18)$$

откуда следует, что коэффициент при v^2 в формуле (2.18) изменяется с высотой так, как изменяется c_v . Сначала аэростат имеет каплевидную форму ($c_v \approx 0,04$), а в конце приобретает шарообразную форму ($c_v \approx 0,24$). Еще раз облегчим задачу, считая, что в среднем $c_v \approx 0,14$. Попробуем сначала пренебречь присоединенной массой. Тогда $F_A = F_c + (M + m_{\text{He}})g$, и, используя уравнения (2.16) и (2.18), можно получить следующее выражение для скорости v подъема стратостата:

$$v = \sqrt{r_{\max} \cdot \frac{8 \cdot g}{3c_v} \left(1 - \frac{M + m_{\text{He}}}{M_{\text{выт}}} \right)}, \quad (2.19)$$

где $M_{\text{выт}}$ — масса вытесненного стратостатом воздуха на земле, равная коэффициенту при g в формуле (2.16).

Для стратостата ВU60-1 с $r_{\max} = 25$ м и $c_v = 0,14$, $M = 40$ кг, $m_{\text{He}} = 68$ кг ($V_{\min} = 400$ м³), $M_{\text{выт}} = 492$ кг формула (2.19) дает $v = 30,3$ м/с = 1818 м/мин, что в 7 раз больше реальной скорости, которую можно вычислить из данных, показанных на рисунке 2.1. Значит, надо считать правильно, т. е. учитывать присоединенную массу.

Считаем скорость подъема стратостата, учитывая присоединенную массу

Учесть эффект присоединенной массы M_n довольно легко, если знать, чему она равна. Достаточно в формулу (2.19) для вычисления v вставить $(M + M_n)$ вместо M :

$$v = \sqrt{r_{\max} \cdot \frac{8 \cdot g}{3c_v} \left(1 - \frac{M + M_n + m_{\text{He}}}{M_{\text{выт}}} \right)}. \quad (2.20)$$

Основную трудность представляет подбор формулы для вычисления присоединенной массы. Оказалось, что значение скорости подъема стратостата, получаемое с помощью формулы (2.20), ближе всего соответствует данным рисунка 2.1, если считать, что присоединенная масса равна 0,77 массы воздуха, вытесняемого стратостатом. Это значение не вызывает удивления, так как для шара оно должно быть равно 0,5, а для цилиндра, движущегося перпендикулярно своей оси, 1,0.

Таким образом, на примере стратостата мы доказали, что рассматривать движение тел малой плотности в средах большой плотности можно, учитывая эффект присоединенной массы. С такой же проблемой мы столкнулись бы, если бы стали рассматривать движение пузырька воздуха, всплывающего в жидкости. Летящий в воздухе камень тоже вовлекает в движение некоторую массу воздуха перед собой.

Однако плотность воздуха в тысячи раз меньше плотности камня, и поэтому эффект присоединенной массы в этом случае будет не таким значительным.

А если прыгнуть из стратосферы на Землю

Именно так сделал американец Дж. Киттенджер 16 августа 1960 г., спрыгнув со стратостата, поднявшегося на высоту 31 км. В течение первых 13 с он летел в свободном падении, потом раскрыл маленький стабилизирующий парашют диаметром 1,8 м, который лишь слегка замедлил его свободное падение, но предотвратил смертельно опасное закручивание. Так он летел еще 4,5 мин, опустившись до высоты 5,3 км, на которой уже раскрыл обычный парашют диаметром 8,5 м.

Когда свободное падение парашютиста происходит в высоких слоях атмосферы, где воздух очень разрежен, его скорость может достигать очень больших значений. В этом полете скорость Киттенджера вплотную приблизилась к скорости звука и составила более 900 км/ч. Поэтому вход парашютиста в более плотные слои воздуха можно было рассматривать как столкновение со всеми вытекающими последствиями. Так, Киттенджер, «ударившись» о плотные слои воздуха на высоте 23 000 м, чувствовал перегрузки около 1,2g. Этот прыжок до сих пор является неофициальным рекордом по высоте свободного падения. Однако прыжок был совершен при помощи стабилизирующего парашюта, поэтому он не был зарегистрирован как рекорд.

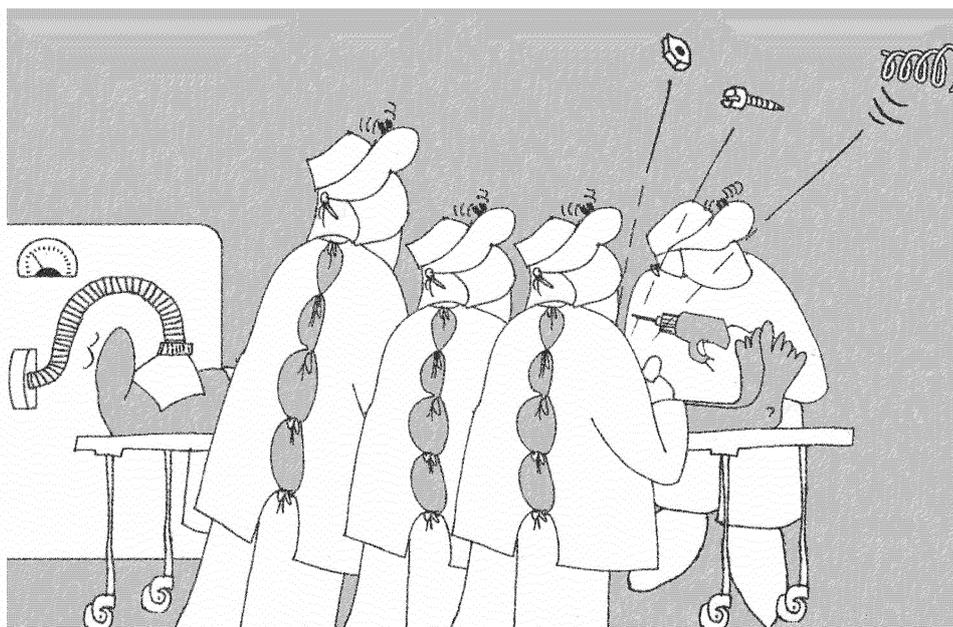
Можно оценить максимальную скорость падения Киттенджера, если считать, что стабилизирующий парашют на высоте $h = 30\,000$ м сделал его полет равномерным, т. е. сила тяжести была полностью скомпенсирована силой сопротивления воздуха [см. формулу (2.13)] на этой высоте. Тогда формула зависимости его скорости от высоты будет следующей:

$$v = \sqrt{\frac{2 M_K g}{c_v S_K \rho_0} e^{bh}}, \quad (2.21)$$

где M_K — масса Киттенджера вместе с парашютами, составлявшая около 200 кг, S_K — площадь поперечного сечения стабилизирующего парашюта диаметром 1,8 м, а c_v — коэффициент аэродинамического сопротивления парашюта, равный 1. Если подставить все эти данные в формулу (2.21), то мы получим $v = 250$ м/с = 900 км/ч, что очень близко к реальным значениям скорости рекордного прыжка. Таким образом, при полете Киттенджера, как мы и предполагали, присоединенная масса не оказывает существенного влияния, так как «плотность» Киттенджера в десятки тысяч раз больше плотности высотных слоев атмосферы.

Глава 3

Почему кость прочнее гранита и полая внутри



Все мы плоды эволюции. Природа миллионы лет экспериментировала, прежде чем сделать нас такими, какие мы есть сейчас. Если бы перед инженером-механиком поставили задачу сконструировать кость человека, то он наверняка сразу же спросил бы, для чего она нужна, так как форма, размеры и внутренняя структура кости должны определяться ее функцией в скелете. Как же работают наши кости? Как и любые строительные элементы, кости нашего скелета работают в основном на сжатие, растяжение или изгиб. Эти режимы работы предъявляют к костям, как к элементам скелета, далеко не одинаковые требования. Каждому ясно, что спичку или соломинку довольно трудно разорвать, растягивая их вдоль оси, и очень легко сломать, изогнув их.

В инженерных конструкциях, как и в скелетах животных, желательное сочетание прочности с легкостью. Как добиться максимальной прочности конструкции при ее заданной массе и известной прочности материала? Эта задача довольно проста, если элемент конструкции должен работать либо на продольное растяжение, либо только на сжатие. Пусть, например, надо подвесить некоторый груз на тросе определенной длины. Прочность троса будет равна прочности его самого тонкого участка, поэтому его вес будет наименьшим при одинаковой площади сечения по всей длине.

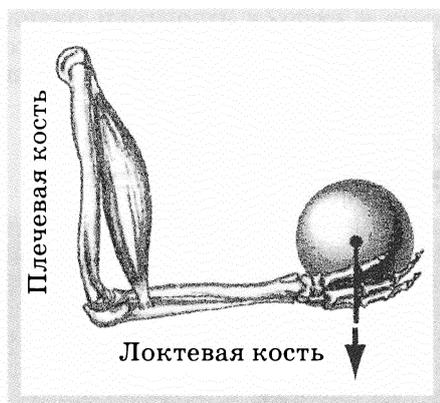


Рис. 3.1. Локтевая кость работает на изгиб, а плечевая — на растяжение, когда мы удерживаем груз согнутой в локте рукой

слоев при изгибе локтевой кости не изменяется. Поэтому материал, находящийся в этих слоях, не работает (т. е. не деформируется), а лишь утяжеляет кость. Значит, для ее прочности часть материала вдоль оси кости можно удалить без большого ущерба. Таким образом, оптимальной будет кость с частично отсутствующей «сердцевинкой», так как цилиндрический слой около оси кости не претерпевает существенных деформаций при изгибе и только увеличивает ее массу.

Естественно, что природа в процессе эволюции использовала такой способ уменьшения массы человека и животных при сохранении прочности их скелета. Наиболее отчетливо это проявилось у птиц, которые больше других животных заинтересованы в уменьшении своей массы. Например, у фрегата — птицы, имеющей размах крыльев около 2 м — скелет имеет массу всего 110 г. Однако и у бескрылых животных кости внутри тоже полые. Измерения показывают, например, что для самой крупной трубчатой кости скелета, бедренной, отношение внутреннего диаметра поперечного сечения к внешнему у человека и

других млекопитающих составляет около 0,6, что дает возможность приблизительно на 25% уменьшить массу скелета при сохранении той же прочности.

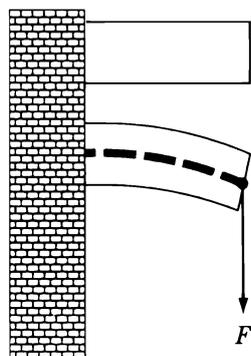


Рис. 3.2. Схематическое изображение локтевой кости (горизонтальный стержень) в ненагруженном состоянии (верх) и при деформации, вызванной действием силы F , приложенной к его свободному концу (низ). Штриховая линия обозначает положение недеформируемого слоя

Почему кость внутри полая

Если элемент конструкции работает на изгиб, например, когда мы удерживаем груз рукой, согнутой в локте (рис. 3.1), то задача поиска максимальной прочности при заданной массе становится более сложной. Чтобы оценить, как деформируется локтевая кость при такой нагрузке, упростим задачу и заменим кость горизонтальным стержнем, один конец которого неподвижно закреплен (рис. 3.2, верх). Очевидно, что при действии вертикальной силы на свободный конец такого стержня нижние его слои сжимаются, а верхние растягиваются (рис. 3.2, низ). При этом длина срединных

Почему кость прочнее гранита

Прежде чем хвалить природу за ее осведомленность в вопросах сопротивления материалов, посмотрим, достаточно ли прочны наши кости.

Значения критических напряжений (отношение силы к площади поперечного сечения образца), при которых нарушается целостность различных материалов, испытанных на сжатие и растяжение, а также их модули Юнга

Таблица 3.1

Материал	Прочность на сжатие, Н/мм ²	Прочность на растяжение, Н/мм ²	Модуль Юнга, 100 Н/мм ²
Сталь	552	827	2070
Кость	170	120	179
Гранит	145	5	517
Фарфор	250	55	—
Дуб	59	117	110
Бетон	21	2	165

Как следует из таблицы 3.1, кость по своей прочности уступает только стали и оказывается гораздо прочнее ставших образцами прочности гранита и бетона. Чем же объясняется такая высокая прочность костного материала?

Кость — композиционный материал и состоит из двух совершенно различных компонентов:

- эластичного коллагена (из него в основном состоят все наши сухожилия);
- кристаллов гидроксилпатита кальция, $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot \text{Ca}(\text{OH})_2$ — 60% массы.

Известным примером композиционного материала служит стеклопластик, представляющий собой смесь стеклянных волокон и смолы. Причиной высокой прочности кости является соединение эластичности и твердости. Многие обычные (некомпозиционные) материалы, обладая большой твердостью, очень хрупки. Каждый видел, как бьется стекло. От места, где по стеклу ударили, разбегаются трещины, которые и раскалывают его. Если трещины не успевают образоваться, как это происходит при ударе пули, то стекло остается целым, за исключением области, куда был нанесен удар.

Таким образом, прочность многих материалов была бы гораздо выше, если бы их структура препятствовала распространению трещин. Наличие в кости сетки из коллагена, обладающего высокой эластичностью, служит преградой для распространения в ней трещин. В то же время твердость кости обеспечивается кристаллами гидроксилпатита кальция, отложившимися на поверхности коллагеновых нитей. На композиционную природу кости указывает ее низкое значение модуля Юнга по сравнению с однородными материалами такой же прочности.

Какой же запас прочности у наших костей

Средняя часть плечевой кости человека имеет площадь поперечного сечения около $3,3 \text{ см}^2$. Используя данные, приведенные в таблице 3.1, можно утверждать, что максимальный вес груза, который удерживает кость, находясь в вертикальном положении и работая на сжатие, близок к $60\,000 \text{ Н}$. В то же время максимальная сила, которую может выдержать та же кость, работая на изгиб, если эта сила приложена к ее свободному концу, перпендикулярно оси, будет близка к 5500 Н .

Механика карате

Прекрасной иллюстрацией прочности костей человека может служить популярный вид спортивных упражнений — карате. Тем, кто впервые видит каратиста, разбивающего крепкие бруски дерева или бетона, часто кажется, что это мистификация (рис. 3.3). Как можно рукой разбивать такие прочные предметы, как дубовые или бетонные бруски, не сломав ее? Сначала попробуем оценить энергию W_p , необходимую для разрывания бруска. Используя закон Гука для деформации бруска и формулу для потенциальной энергии, запасенной в сжатой пружине, можно получить выражение

$$W_p = \frac{VT^2}{2E}, \quad (3.1)$$

где V — объем бруска, T — максимальное напряжение, которое выдерживает материал бруска, E — модуль Юнга. Формула (3.1) подтверждает интуитивные соображения, что чем больше брусок, тем труднее его разорвать. Из той же формулы следует, что чем эластичнее материал бруска, тем труднее его разорвать, так как на его растяжение затрачивается большая энергия.

Как правило, в своих показательных выступлениях каратисты используют бетонные кирпичи размером $0,4 \times 0,2 \times 0,05 \text{ м}$. Принимая во внимание данные таблицы 3.1 и формулу (3.1), можно получить, что для таких брусков $W_p \approx 0,55 \text{ Дж}$. Скорость движущейся руки каратиста составляет приблизительно 12 м/с , а ее масса $0,7 \text{ кг}$. Поэтому энергия, которую передает рука в момент удара, близка к 50 Дж . Таким образом, рука каратиста обладает достаточным запасом энергии, чтобы разрушить брусок из бетона.

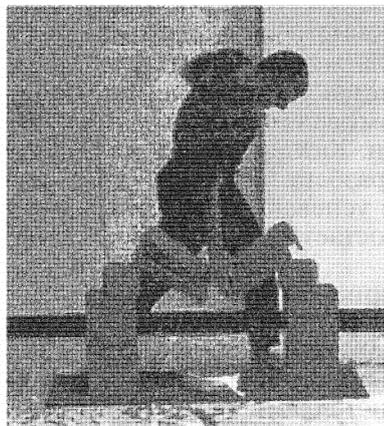


Рис. 3.3. Каратист, разбивающий голый рукой бетонный брусок

То, что рука каратиста не ломается при ударе о бетонный брусок, частично объясняется гораздо большей прочностью кости по сравнению с бетоном. Высокоскоростная киносъемка кулака каратиста в момент удара показала, что его замедление при соприкосновении с бруском составляет примерно -4000 м/с^2 . Поэтому сила, действующая

шая со стороны бруска на кулак, масса которого 0,7 кг, должна быть равна 2800 Н.

Если кулак в момент удара заменить костью длиной 6 см и диаметром 2 см, фиксированной в двух крайних точках, а удар о брусок моделировать силой, действующей на ее середину, то в таких условиях кость может выдержать 25 000 Н. Это приблизительно в 8 раз больше, чем сила, действующая на кулак каратиста при разламывании бетонных брусков.

Итак, ссылаясь на хрупкость наших костей, оправдывая свою нерешительность, мы не в праве. Они не подведут.

А сухожилия зачем?

Многие из тех движений, которые мы совершаем, бывают периодическими. Во время этих движений различные части тела движутся неравномерно. Например, при беге или ходьбе каждая из ног попеременно уменьшает свою скорость до нуля, соприкасаясь с землей и тормозя при этом перемещение тела. В последующем та же нога, отталкиваясь от земли, ускоряет это перемещение. Для того, чтобы заставить автомобиль двигаться подобным образом, нам нужно было бы с частотой около 1 Гц нажимать то на педаль газа, то на тормоз. Естественно, что расход горючего при таком импульсном характере движения резко возрастает, так как часть кинетической энергии автомобиля при торможении переходит в теплоту. Неужели бег человека и животных так же неэкономичен, как движение этого гипотетического автомобиля?

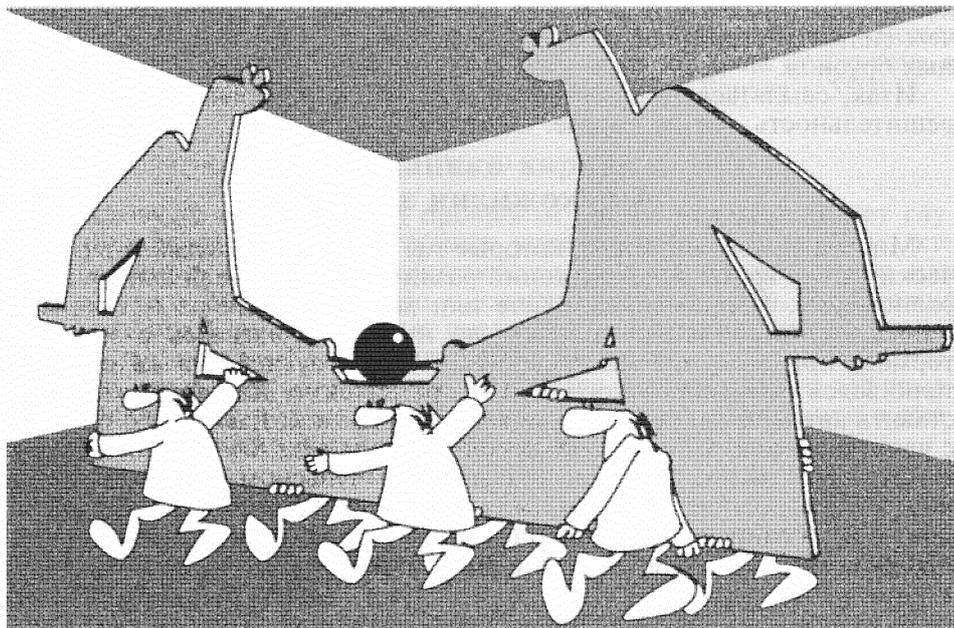
Конечно, нет. Исследования ученых показали, что при беге часть кинетической энергии в фазе торможения хранится в сухожилиях ног в виде потенциальной энергии их деформации, которая переходит опять в кинетическую энергию подобно тому, как это происходит при отскакивании резинового мяча от стены. Таким образом, сухожилия являются запасниками механической энергии во время бега и других циклических движений.

Свойства сухожилий более или менее одинаковы у всех животных, однако конечности копытных, например, овец и лошадей, наиболее приспособлены для хранения механической энергии. Некоторые мышцы в нижних частях ног этих животных состоят практически из одних сухожилий, как, например, у верблюда. В ноге человека самым мощным является ахиллово сухожилие, на которое при беге может действовать растягивающая сила до 4000 Н.

Каждый может сам убедиться в том, что механическая энергия действительно запасается в наших ногах, как в пружинах. Для этого попробуйте присесть, сильно сгибая колени. Вы сразу заметите, что подниматься гораздо легче, если выпрямлять ноги сразу, а не задерживаться на секунду и более в положении с согнутыми ногами. Это можно объяснить тем, что при сгибании коленей сухожилия сначала растягиваются, и если, не давая им укоротиться, начать разгибать колени, то запасенная в сухожилиях потенциальная энергия перейдет в кинетическую. Если же позволить им укоротиться еще до подъема, то эта энергия перейдет во внутреннюю энергию.

Глава 4

Загадки одномерного бильярда



Существует более десятка разновидностей бильярда: русская пирамида, американка, пул, снукер и др. В карамболе, одной из игр в бильярд, нет даже луз для шаров. А мы попробуем пойти еще дальше и предложим играть в бильярд без луз на очень узком столе шириной, равной диаметру одного шара. По такому бильярдному столу шары смогут двигаться только по прямой. Поэтому назовем придуманный нами бильярд одномерным (рис. 4.1).

При игре в обычный двумерный бильярд никто не следит, с какой частотой сталкиваются шары с торцами стола. Всех волнует результат — сколько шаров оказалось в лузах. В одномерном бильярде луз нет, и единственное, что можно считать — столкновения шаров между собой и с торцевыми бортами стола. Для простоты предположим, что трение между шарами и столом отсутствует, а удары между шарами и торцами стола абсолютно упругие. В таких условиях начавшееся движение шаров никогда не прекратится и станет постоянным источником своеобразной чечетки — периодического постукивания шаров о торцевые стенки одномерного бильярда.

Пусть в одномерный бильярд, закрытый сверху непрозрачной крышкой, играют два игрока. С помощью кия или другого специального устройства приведем шары в движение и попросим игроков разгадать следующие загадки одномерного бильярда:

1. От чего зависит средняя частота столкновения крайних шаров о торцы бильярда?

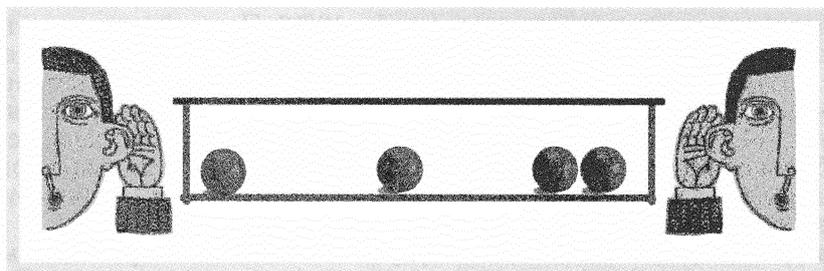


Рис. 4.1. Одномерный бильярд

2. Как можно определить, сколько шаров внутри одномерного бильярда?

3. Если шары разной массы, то во сколько раз различаются массы крайних шаров?

4. Что общего между одномерным бильярдом и пружиной?

Кто первым разгадает эти загадки, тот и выиграет. При ответе на вопросы можно пользоваться компьютером и измерять интервалы между последовательными столкновениями крайних шаров с торцами бильярда с помощью любых прослушивающих устройств.

Определим физические характеристики стола и шаров для игры в одномерный бильярд. Чтобы стол было легко приподнять и встряхнуть находящиеся на нем шары, пусть его длина равна $L = 1$ м. Шары для бильярда сначала делали из слоновой кости плотностью 1900 кг/м^3 , а потом из других материалов с такой же плотностью и такими же механическими свойствами. Обычные шары имеют диаметр $50\text{--}60$ мм и массу $150\text{--}200$ г. Чтобы облегчить себе игру, возьмем шары диаметром $D = 30$ мм и массой $m = 25$ г. Будем считать также, что в начале игры специальное устройство передает одному, нескольким или всем шарам энергию, всегда постоянную и равную $E_0 = 2$ мДж. Если эта энергия передается только одному шару массой 25 г, то он начинает двигаться со скоростью $0,4$ м/с. Итак, начинаем играть в одномерный бильярд.

Когда одному все, а другим ничего

Пусть N шаров в одномерном бильярде имеют одинаковую массу, и мы приводим их в движение, например, с помощью кия, ударив только по одному из них (битку) и сообщив ему начальную скорость v_0 . В этом случае при каждом столкновении шаров энергия движущегося шара будет целиком передаваться покоящемуся, в результате чего ранее движущийся шар остановится, передав эстафету следующему. В таких условиях постукивание крайних шаров по торцам стола будет ритмичным, с интервалом T , равным

$$T = \frac{2L - 2ND}{v_0}. \quad (4.1)$$

Однако абсолютно одинаковые по массе шары сделать невозможно, и поэтому правила разрешают играть в бильярд комплектом шаров, если их масса различается не более чем на 10%. Интересно, как изменится формула (4.1), если в одномерный бильярд играть шарами, мас-

са которых варьируется в пределах 5–10%? Первый ответ, который приходит в голову: интервалы T между ударами крайних шаров с торцами стола при не совсем одинаковых массах будут слегка изменяться во времени, но все же среднее значение T можно будет вычислять по формуле (4.1). Чтобы ответить на этот вопрос точно, смоделируем игру в бильярд на компьютере. Положим в одномерный бильярд три шара, массы которых равны 25, 23 и 27 г, и ударим средний шар (биток), придав ему энергию 2 мДж ($v_0 = 0,417$ м/с).

На рисунке 4.2 показано, как будут изменяться интервалы T между соударениями правого шара со стенкой (интервалограмма). Видно, что значения T изменяются в довольно широком диапазоне, гораздо большем, чем 10%. Таким образом, наши ощущения нас обманули. Приблизительно такая же картина имеет место, когда разброс по массе шаров еще меньше — 25, 24 и 26 г.

Судить о том, как изменяется среднее значение T со временем, по интервалограмме, изображенной на рисунке 4.2, очень трудно. Поэтому на том же рисунке изображена кривая, показывающая, как изменяется среднее значение T при усреднении восьми соседних интервалов. Видно, что в самом начале средний интервал составлял около 4,5 с, что очень близко к значению, даваемому формулой (4.1). Однако со временем среднее значение T постепенно уменьшается, испытывая заметные колебания, достигая значений, близких к 2,5 с (штриховая линия на рис. 4.2). То же происходит и с другим числом шаров. При этом, чем больше число шаров, тем быстрее среднее значение T оказывается меньше того, которое можно вычислить с помощью формулы (4.1).

На рисунке 4.3 показано, каких значений достигает T для различного числа шаров (черные точки) через 10–15 мин игры. Для сравне-

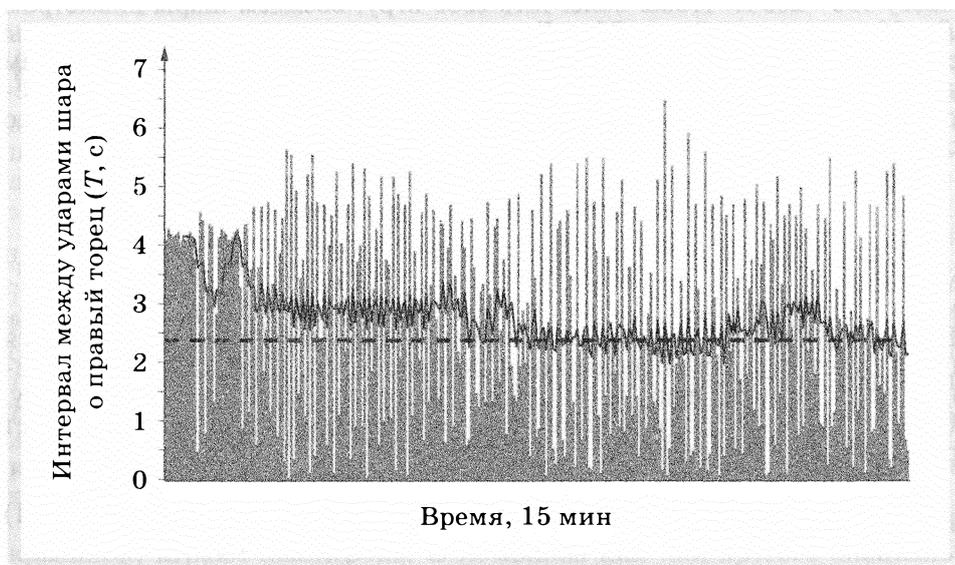


Рис. 4.2. Интервалограмма ударов правого мяча по торцу одномерного бильярда при небольшом неравенстве находящихся в нем трех мячей. Обратите внимание на постепенное учащение ударов. Темная кривая — усредненные значения по соседним восьми точкам

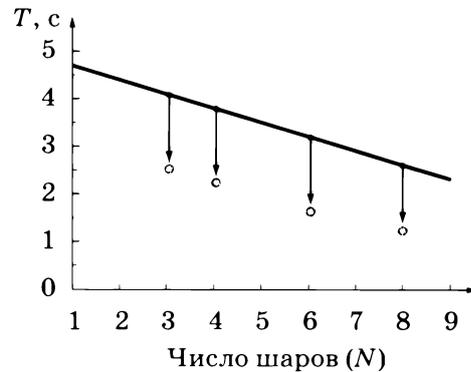


Рис. 4.3. Среднее значение интервала T между соударениями крайних шаров со стенкой (точки) в реальных условиях, когда массы шаров слегка различаются. Прямая линия — зависимость, даваемая формулой (4.1)

ния на том же рисунке показана прямая, соответствующая формуле (4.1). Итак, формула (4.1) может давать оценку среднего значения T при незначительной вариации масс шаров только в самом начале игры. Чтобы выяснить, почему формула (4.1) не работает уже через несколько минут, рассмотрим, как передается энергия от шара к шару при неравенстве их масс.

Если массы сталкивающихся шаров разные, то движущийся шар никогда не сможет передать всю свою энергию покоящемуся, и после столкновения оба этих шара будут обладать энергией. Таким образом, неравенство масс сталкивающихся шаров всегда приводит к тому, что энергия «размазывается» между шарами. Поэтому после достаточного числа столкновений шаров, обладающих разной массой, средняя энергия каждого из них становится близкой к $\frac{E_0}{N}$, где E_0 — первоначальная энергия битка, а N — число шаров.

Дележ энергии и стук по торцам

Мы доказали, что формула (4.1) справедлива только в идеальных случаях — когда массы шаров абсолютно одинаковы. А такого никогда не бывает, и сталкивающиеся шары со временем делят энергию между собой поровну. Но остается непонятным, почему этот дележ энергии всегда сопровождается уменьшением среднего интервала постукивания крайних шаров по торцам. А верно ли это для всяких вариантов перераспределения энергии между шарами? Может быть, зависимость среднего интервала постукивания от «дележа» гораздо более сложная?

Чтобы ответить на эти вопросы, опять обратимся за помощью к компьютеру и поиграем в одномерный бильярд с двумя шарами абсолютно одинаковой массы, разделяя с самого начала энергию между ними так, как нам захочется. Так как каждое столкновение шаров с одинаковой массой приводит к обмену энергией, то со временем распределение энергии не изменится. Поэтому на такой системе можно выяснить, как зависит средний интервал T постукивания по торцам от отношения энергии шаров.

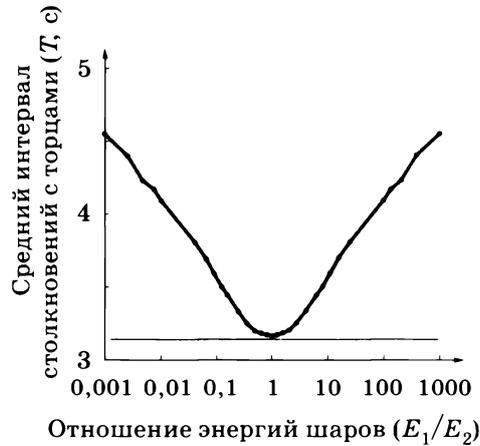


Рис. 4.4. Зависимость среднего интервала столкновений с торцами от отношений энергий шаров для одномерного бильярда с двумя шарами одинаковой массы

На рисунке 4.4 показаны результаты компьютерного моделирования игры в одномерный бильярд с двумя шарами одинаковой массы при различных отношениях их энергии $\left(\frac{E_1}{E_2}\right)$ и условии, что $E_1 + E_2 = 2$ мДж. При увеличении отношения $\frac{E_1}{E_2}$ от 0,001 до 1000 средний интервал T столкновений шара с торцами бильярда сначала монотонно уменьшается, достигая минимума при $\frac{E_1}{E_2} = 1$, а потом так же монотонно увеличивается. Как следует из результатов моделирования, при абсолютно несправедливом распределении энергии $\left(\frac{E_1}{E_2} = 0 \text{ и } \frac{E_1}{E_2} = \infty\right)$ средний интервал $T = 4,55$ с, что соответствует формуле (4.1). Однако при переходе к справедливому распределению $\left(\frac{E_1}{E_2} = 1\right)$ энергии средний интервал T уменьшается до 3,16 с.

Вычислить средний интервал T при $\frac{E_1}{E_2} = 1$ можно и без помощи компьютера. Так как энергия шаров поделилась поровну, то скорость каждого из них будет равна $\frac{v_0}{\sqrt{2}}$, где v_0 равно той же скорости, что и в формуле (4.1). Предположим теперь, что оба шара одновременно начинают движение от торцов одномерного бильярда к середине. Очевидно, что встретившись в середине стола, они оттолкнутся друг от друга и с той же скоростью продолжат движение обратно к торцам. В таком случае интервал T между их соударениями с бортом составит

$$T = \frac{L - 4D}{\frac{v_0}{\sqrt{2}}}. \quad (4.2)$$

Подставляя в формулу (4.2) $L = 1$ м, $D = 0,03$ м, $v_0 = 0,4$ м/с, получаем $T = 3,11$ с, что довольно близко к результату компьютерного моделирования ($T = 3,16$ с). Сравнивая формулу (4.1) для $N = 2$ с формулой (4.2), замечаем, что уменьшение интервала T произошло из-за того, что путь, проходимый шарами между столкновениями с торцами, уменьшился в 2 раза, а скорость шаров лишь в $\sqrt{2}$. В результате интервал столкновений с торцами для самого справедливого распределения энергий уменьшился в $\sqrt{2}$. При менее справедливом распределении ($0 < \frac{E_1}{E_2} < 1$) происходит то же самое — путь между столкновениями со стенкой уменьшается быстрее, чем скорость шаров. Однако найти аналитическое выражение, описывающее зависимость, изображенную на рисунке 4.4, автору не удалось. Пытливый читатель может попробовать здесь свои силы.

Делим энергию поровну и разгадываем вторую загадку

Итак, при любом начале игры в одномерный бильярд через несколько минут у реальных шаров энергия поделится между собой так, что средняя энергия каждого из них будет равна $\frac{E_0}{N}$, где E_0 — суммарная энергия всех шаров, а N — число шаров. Теперь мы можем разгадать вторую загадку одномерного бильярда — узнать, сколько шаров внутри. С помощью компьютера сыграем в бильярд различным числом шаров — от 2 до 9 — и через каждые 15 мин измерим средний интервал T между постукиваниями шаров о торцы стола (рис. 4.5).

На рисунке 4.5 показаны результаты компьютерного моделирования при изначально справедливом распределении энергии между шарами равной массы. Видно, что при этих условиях средний интервал между постукиваниями уменьшается гораздо быстрее с увеличением числа шаров, чем это выражается формулой (4.1). Кривая, изображенная на

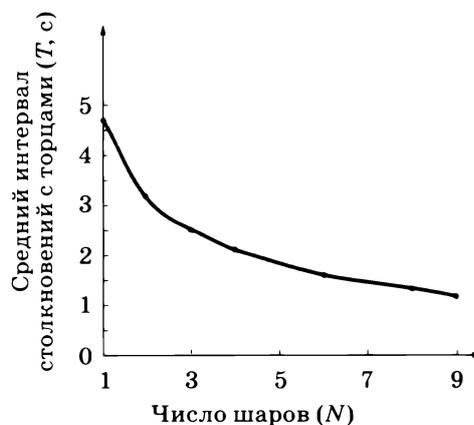


Рис. 4.5. Зависимость среднего интервала постукивания $T_{\text{ср}}$ от числа шаров N в одномерном бильярде

рисунке 4.5, дает возможность отгадать вторую загадку одномерного бильярда: надо лишь измерить среднее значение T , а потом по этой кривой найти соответствующее число N . При этом, однако, имейте в виду, что полученная зависимость справедлива только для выбранных параметров бильярда ($L = 1$ м, $D = 0,03$ м, $E_0 = 2$ мДж). Очевидно, что для $E_0 > 2$ мДж эта кривая пройдет ниже, так как средняя скорость движения шаров будет больше, и наоборот, при меньшем диаметре шаров ($D < 0,03$ м) кривая сдвинется вверх, так как увеличится путь, проходимый шарами между столкновениями. Конечно, хотелось бы вывести аналитическое выражение, связывающее T , L , D и E_0 , но нам пока это не по силам. Да и вообще, мы опять забыли о массе шаров.

Золотой шар в одномерном бильярде

Пусть кто-то из богатых шутников вместо одного из трех обычных шаров положил на бильярдный стол золотой шар, закрыл стол крышкой и запустил движение шаров, придав им суммарную энергию E_0 . Можно ли определить, где находится этот золотой шар — сбоку или посередине — прослушивая чечетку столкновений крайних шаров с торцами бильярда?

Так как плотность золота в 10 раз больше плотности слоновой кости, то золотой шар диаметром 3 см должен иметь массу 250 г. Поставим золотой шар между обычными шарами и с помощью компьютера поиграем в такой одномерный бильярд, распределив поровну энергию между шарами. Интервалограммы левого и правого обычных шаров показаны на рисунке 4.6.

Как следует из интервалограмм, средние значения T для левого и правого шаров колеблются около 2,5 с, что соответствует интервалу T для трех одинаковых шаров (см. рис. 4.5). Таким образом, если золотой шар находится между обычными, то, прислушиваясь к постукиваниям крайних шаров, обнаружить его не удастся.

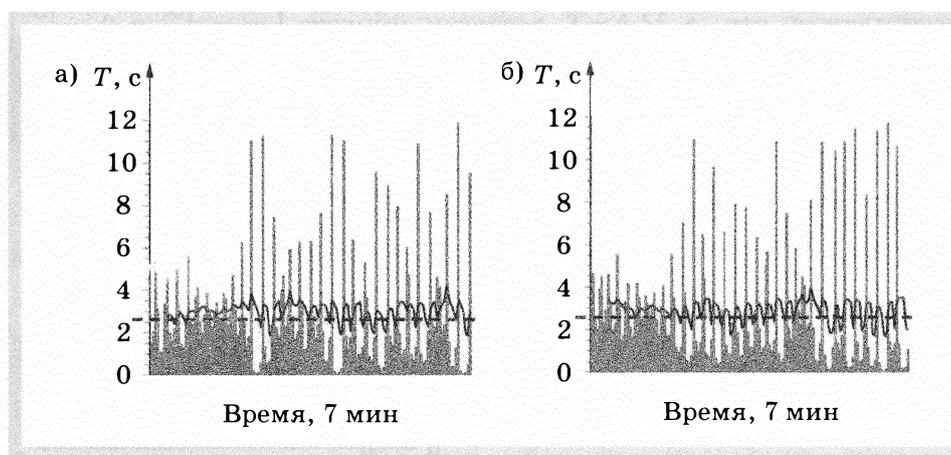


Рис. 4.6. Интервалограммы левого (а) и правого (б) шаров одномерного бильярда, между которыми находится золотой шар. Видно, что наличие между ними тяжелого шара не влияет на средний интервал столкновений

Золотой шар — крайний

Если положить золотой шар не между обычными шарами, а с краю, и повторить компьютерную игру в одномерный бильярд с тремя шарами, то окажется, что частота постукивания золотого шара о торцы стола будет гораздо меньше, чем частота постукивания обычного шара, находящегося с другой стороны (рис. 4.7). Видно, что средний интервал постукивания левого (обычного) шара опять варьируется около $T = 2,5$ с. Однако правый (золотой) шар ударяется о торцы гораздо реже — в среднем один раз в 8,7 с. Таким образом, если известно, что золотой шар находится с краю, то, сравнивая постукивания крайних шаров, можно найти, с какой он стороны (там, где удары реже). Вот мы и начали разгадывать третью загадку одномерного бильярда. Оказывается, что если крайние шары разной массы, то, чем меньше масса шара, тем чаще он стучит о торцы. Но верно ли это для любого числа шаров?

Масса крайнего шара и средняя частота ударов о торцы

Чтобы выяснить зависимость средней частоты ударов крайних шаров от их массы, проведем несколько компьютерных экспериментов, в которых будем изменять массу правого крайнего шара, оставляя неизменной массу левого крайнего шара. Пусть число шаров опять будет равно трем, чтобы пригодился полученный результат с золотым шаром. На рисунке 4.8 показано, как увеличивается средний интервал постукивания правого шара с увеличением его массы $m_{\text{пр}}$. Штриховой линией показана аппроксимация этой зависимости функцией $T = 2,9 \sqrt{\frac{m_{\text{пр}}}{m_{\text{лев}}}}$. Таким образом, из результатов моделирования следует, что период

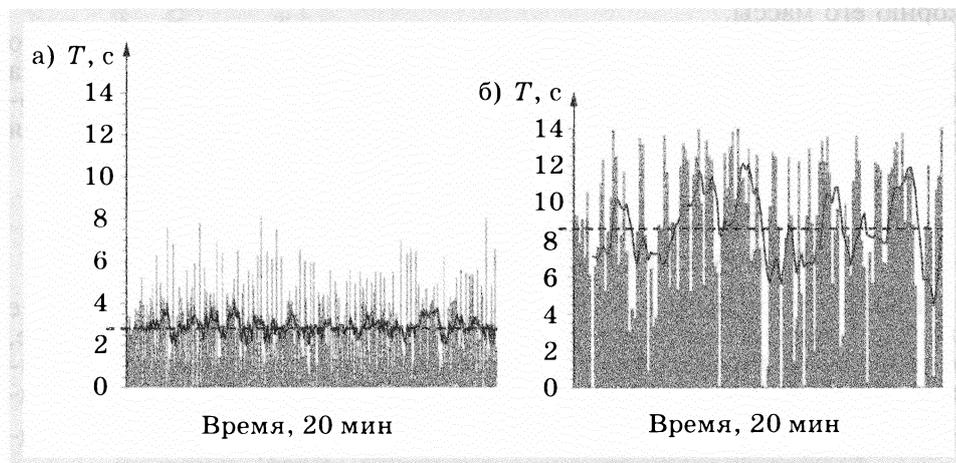


Рис. 4.7. Интервалограмма столкновений левого (обычного) шара (а) и правого (золотого, б) при игре в одномерный бильярд в три шара. Видно, что золотой шар сталкивается с торцом гораздо реже, чем обычный

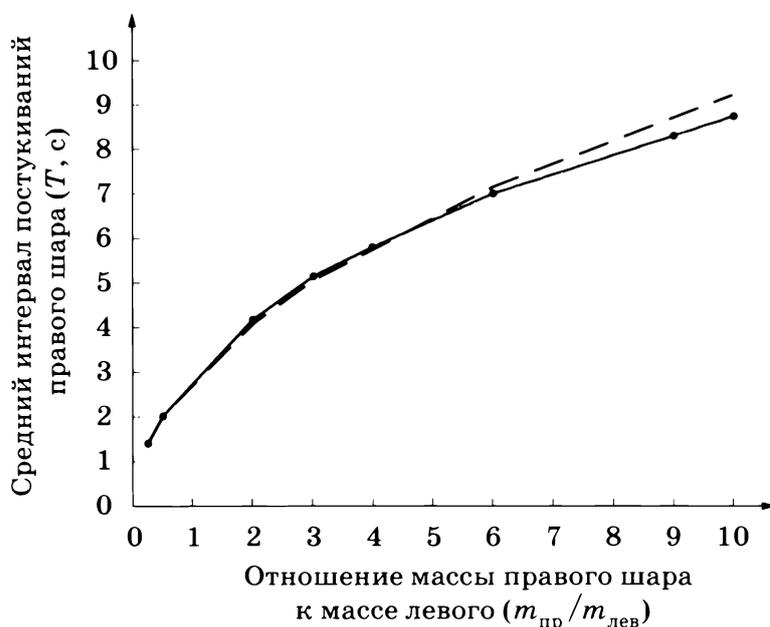


Рис. 4.8. Зависимость среднего интервала постукивания правого шара от отношения его массы $m_{\text{пр}}$ к массе левого $m_{\text{лев}}$. Компьютерное моделирование одномерного бильярда с тремя шарами

соударений правого шара должен быть пропорционален квадратному корню его массы.

Аналогичные эксперименты были поставлены автором для другого числа шаров N — от четырех до девяти, и везде была обнаружена квадратичная зависимость. Попробуем найти причину этой зависимости и наконец вывести формулу, по которой можно вычислять T , зная N , m и E_0 .

Формула для периода колебаний «пружины одномерного бильярда»

Как мы уже убедились, у реальных шаров в одномерном бильярде энергия разделится поровну. Очевидно, что и среднее расстояние, которое проходит каждый из N шаров между соударениями, тоже является только N -й долей длины бильярда. Другими словами, средняя длина свободного пробега каждого шара составляет $\frac{L-ND}{N}$. Поэтому средний интервал T между соударениями крайнего шара с торцом равен:

$$T = 2 \frac{L-ND}{Nv_{\text{ср}}}, \quad (4.3)$$

где v_{cp} — средняя скорость движения данного шара. Если суммарная энергия всех шаров бильярда равна E_0 и она разделена поровну между ними, то очевидно, что

$$v_{\text{cp}} = \sqrt{\frac{2E_0}{Nm}}, \quad (4.4)$$

где m — масса данного шара. Подставляя формулу (4.4) в (4.3), получаем долгожданную формулу

$$T = (L - ND) \sqrt{\frac{2m}{NE_0}}. \quad (4.5)$$

На рисунке 4.9 кривая, построенная по формуле (4.5), наложена на экспериментальные данные, полученные при моделировании. Видно, что формула (4.5) довольно точно описывает чечетку одномерного бильярда. Так как формула (4.5) своей зависимостью от T напоминает формулу для периода колебаний пружинного маятника, преобразуем ее следующим образом:

$$T = (L - ND) \sqrt{\frac{2m}{NE_0}} = 2\pi \sqrt{\frac{m}{4\pi^2 NE_0 / 2(L - ND)^2}} = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k_{\text{об}}}}, \quad (4.6)$$

где $k_{\text{об}}$ — эквивалентная жесткость одномерного бильярда.

Как следует из формулы (4.6), крайний шар воспринимает остальную часть бильярда как пружину жесткостью $k_{\text{об}}$. При этом чем больше суммарная энергия шаров и их число, тем больше жесткость такой «бильярдной пружины».

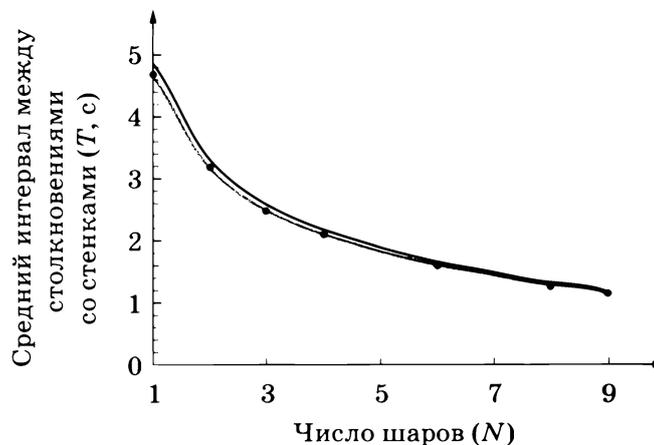
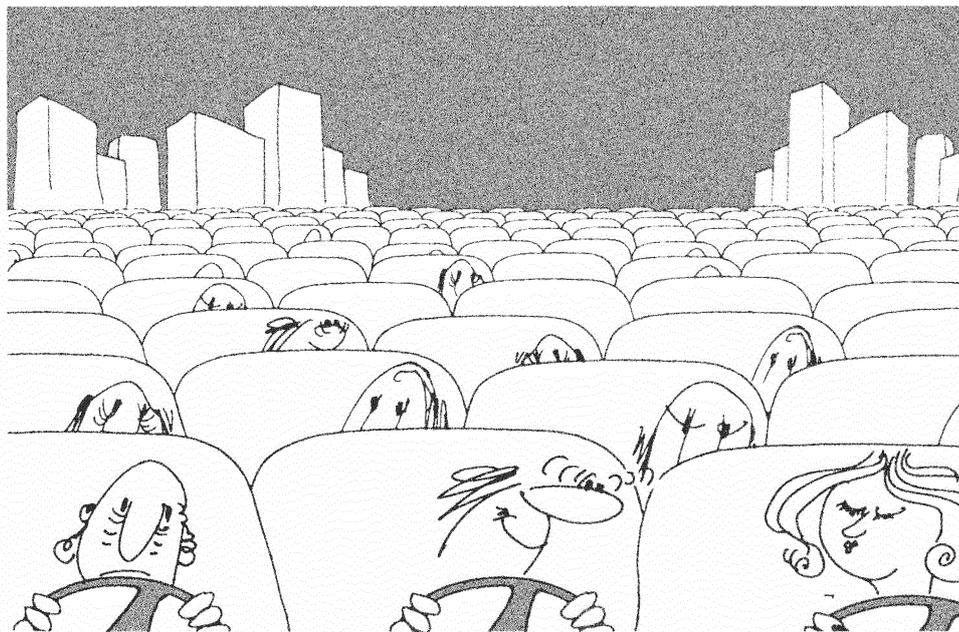


Рис. 4.9. Теоретическая зависимость среднего интервала столкновений со стенками бильярда (верхняя кривая), построенная по формуле (4.5), и результаты компьютерного моделирования (нижняя кривая)

Глава 5

Как образуются и живут автомобильные пробки



Но homo sapiens — человек разумный. Так мы себя называем без тени ложной скромности по отношению к остальным представителям животного мира. Да и, конечно, человеческому разуму есть чем гордиться. Наши предки на протяжении многих тысячелетий пытались сделать жизнь людей более удобной. И когда стало ясно, что удобнее жить и работать вместе, возникли города, а потом дороги между ними и, наконец, средства передвижения по ним — автомобили. Ну, а когда в городах стало очень много людей, а на улицах — очень много машин, начали возникать автомобильные пробки. Поэтому автомобильные пробки можно считать побочным продуктом цивилизации, как и загрязнение окружающей среды. Однако, в отличие от экологических последствий цивилизации, часто причина автомобильных пробок кроется в психологии людей, и такие пробки могут быть устранены, если люди будут вести себя разумно.

Наши планы

Сначала попробуем математически описать поведение среднестатистического водителя за рулем, а именно — как он изменяет скорость своего автомобиля в зависимости от расстояния до впереди идущего автомобиля и его скорости. Потом напишем программу для компью-

тера, с помощью которой посадим несколько тысяч водителей в одинаковые автомобили и пустим гонять их друг за другом по однополосной модели кольцевой автомобильной дороги (МКАД) длиной 100 км, что, как известно, соответствует длине Московской кольцевой автомобильной дороги. Однако, в отличие от реальных условий, на нашей МКАД водителям запрещено обгонять друг друга. Когда МКАД работает, постараемся выяснить, как зависит средняя скорость на МКАД от числа автомобилей на ней. Потом спровоцируем возникновение автомобильной пробки на МКАД, остановив один из автомобилей на одну минуту, и посмотрим, как эта автомобильная пробка будет влиять на движение транспорта в зависимости от числа автомобилей на дороге и поведения водителей.

Кинематический портрет среднестатистического водителя

Человек садится за руль для того, чтобы быстрее преодолеть путь из точки *A* в точку *B*. Поэтому, когда перед ним на дороге нет никаких препятствий, водитель ускоряет свое авто до той скорости v_0 , которую считает разумной в данных условиях. Очевидно, что скорость v_0 на городских улицах (60—80 км/ч) должна быть меньше, чем скорость v_0 на скоростных автомагистралях (100—120 км/ч). Однако алгоритм поведения водителя сразу меняется, когда впереди себя он видит автомобиль, следующий в том же направлении. Теперь водитель должен не только использовать скоростные качества своего автомобиля, но и держаться от впереди идущего автомобиля на некотором безопасном расстоянии, не меньше, чем s_0 . Если спросить любого водителя, как можно математически записать закон, по которому он ускоряется или тормозит, то вероятность точного ответа относительно мала. Однако читателям повезло, и они наткнулись на водителя, знакомого с азами кинематики. Вот что он им ответил.

Сначала водитель разгоняет автомобиль до скорости v_0 , если впереди не видно других автомобилей. Допустим, что максимальное ускорение a водителя, которое еще не вдавливают его в кресло, составляет около 2 м/с^2 . Тогда формулу разгона можно было бы записать, например, так:

$$\frac{dv}{dt} = a \left\{ 1 - \left(\frac{v}{v_0} \right)^4 \right\}, \quad (5.1)$$

где v — скорость автомобиля в момент времени t . Видно, что формула (5.1) обеспечивает достижение желанной скорости v_0 и ее поддержание в дальнейшем. Как нетрудно догадаться, показатель степени $\left(\frac{v}{v_0} \right)$

определяет скорость реакции системы автомобиль — водитель, а также желание достичь скорости v_0 , и может быть очень высоким у водителей, разъезжающих на мощных автомобилях. Четвертая степень в формуле (5.1) выбрана просто для примера. Да и вообще, формула разгона могла бы иметь совсем иной вид и содержать, например, экспоненту или какие-нибудь другие функции. И все же формулу (5.1) можно, наверное, считать самой простой, что очень важно для экономии времени при последующих вычислениях на компьютере.

Интуитивно ясно, что водитель из соображений безопасности должен держаться на некотором расстоянии, превышающем s_0 , от впереди идущего автомобиля, и s_0 должно увеличиваться с увеличением скорости v . Об этом даже говорится в правилах дорожного движения некоторых стран, где от водителя требуется увеличивать s_0 на длину автомобиля при увеличении скорости на 5 м/с (18 км/ч). Ну, а так как длина среднего автомобиля 5 м, то зависимость s_0 от v можно записать в виде

$$s_0 = \tau v + s_{\min}, \quad (5.2)$$

где τ — постоянная времени, равная 1 с, а s_{\min} — минимальное расстояние между автомобилями, когда они стоят в пробке. Чтобы автомобили не царапали друг другу бамперы, пусть $s_{\min} = 2$ м. Формулу (5.2) можно прочесть и по-другому: так как тормозной путь увеличивается пропорционально начальной скорости, то и дистанция между автомобилями должна быть больше соответствующего тормозного пути, а τ — это допустимое время торможения при обычной езде.

Однако формула (5.2) справедлива только для того случая, когда впереди идущий автомобиль имеет такую же скорость, т. е. v . Представим себе, что впереди идущий автомобиль зажег красный сигнал тормоза и уменьшил свою скорость на Δv . Очевидно, что водитель сразу же нажмет на тормоз, чтобы на столько же снизить свою скорость. Пусть наш водитель не будет очень резко нажимать на тормоз, и отрицательное ускорение машины b составит не более 2 м/с². Таким образом, на процесс равнозамедленного торможения будет затрачено время $\frac{\Delta v}{b}$ с, которое мы должны прибавить к τ в формуле (5.2), чтобы сделать безопасным движение даже в том случае, когда впереди идущий автомобиль затормозил. Очевидно, что в случае внезапного ускорения впереди идущего автомобиля все будет наоборот, и τ в формуле (5.2) можно уменьшить на $\frac{\Delta v}{a}$, где a — комфортное ускорение 2 м/с². Таким образом, улучшенная формула для s_0 , справедливая в случае ускоренного или замедленного движения впереди идущего автомобиля, будет иметь вид

$$s_0 = \tau v + s_{\min} + v \frac{\Delta v}{a|b}, \quad (5.3)$$

где $a|b$ означает, что в случае ускорения или торможения берут величины a или b соответственно; Δv — разность между скоростями данного и впереди идущего автомобилей.

Теперь запишем математически алгоритм поведения водителя, когда оказывается, что расстояние s между ним и впереди идущим автомобилем отличается от s_0 . Очевидно, что если $s > s_0$, то водитель будет ускоряться, стараясь приблизиться к впереди идущему автомобилю, и наоборот. Поэтому формулу, описывающую стратегию регуляции s , можно записать в виде

$$\frac{dv}{dt} = (a|b) \left\{ 1 - \left(\frac{s_0}{s} \right)^2 \right\}, \quad (5.4)$$

где $a|b$ имеет такой же смысл, как и в формуле (5.3). Выбор второй степени в формуле (5.4) был сделан по тем же соображениям, что и выбор четвертой степени в формуле (5.1), т. е. довольно произвольно.

Если средний водитель, соблюдая дистанцию, все-таки хочет ехать как можно быстрее, то его стратегия, очевидно, описывается комбинацией правых частей формул (5.1) и (5.4). Поэтому вполне возможно, что стратегией водителя может быть среднеарифметическая стратегия, описываемая полусуммой формул (5.1) и (5.4):

$$\frac{dv}{dt} = (a|b) \left\{ 1 - \left(\frac{s_0}{s} \right)^2 \right\} \cdot \frac{1}{2} + a \left\{ 1 - \left(\frac{v}{v_0} \right)^4 \right\} \cdot \frac{1}{2}. \quad (5.5)$$

Можно считать, что формулы (5.3) и (5.5) и являются кинематическим портретом водителя; глядя на них, можно предсказать, как он будет вести себя (нажимать на педаль тормоза или газа) в самых различных ситуациях на дороге.

По машинам!

После того, как мы узнали, что можно ожидать от водителя, напишем программу для компьютера, которая бы имитировала взаимодействие, например, 3000 таких водителей, едущих, не обгоняя, по кольцевой дороге длиной 100 км друг за другом. Пусть до начала жизни МКАД все ее 3000 автомобилей неподвижны и равномерно распределены по всей длине дороги. В момент времени $t = 0$ все водители одновременно начинают движение, выраженное формулами (5.3) и (5.5), где $v_0 = 120$ км/ч. Все автомобили перенумерованы так, что в начале движения на отметке «0 км» стоит автомобиль 1, а водитель через ветровое стекло видит перед собой автомобиль 2, а тот, в свою очередь, автомобиль 3 и т. д. Если N — число автомобилей на дороге, то около отметки «100 км» стоит автомобиль N , перед которым уже стоит автомобиль 1, и МКАД замыкается. Ну, а дальше посмотрим, как живет наша МКАД.

На рисунках 5.1 и 5.2 показаны данные моделирования на компьютере. На них видно, как автомобили ускоряются и приблизительно че-

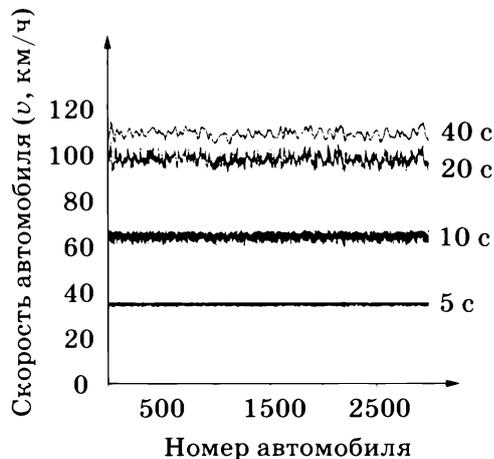


Рис. 5.1. Скорости автомобилей в зависимости от их порядкового номера. Результаты моделирования начала движения 3000 автомобилей по МКАД. Снизу вверх — через 5, 10, 20 и 40 с после начала разгона

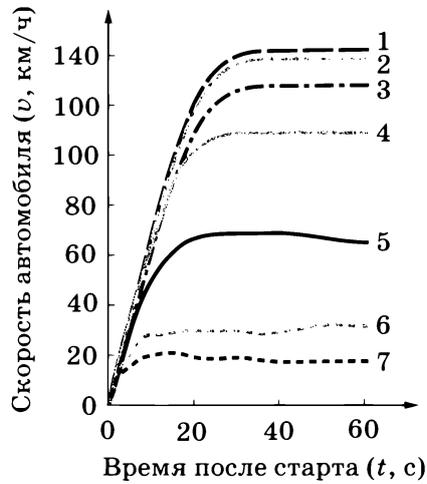


Рис. 5.2. Скорость автомобиля 300 в зависимости от времени, прошедшего после начала движения, для МКАД с различным числом автомобилей ($N = 500, 1000, 2000, 3000, 5000, 8000, 10\,000$ для кривых 1, 2, ..., 7 соответственно)

рез 30 с достигают своей оптимальной скорости, которая, как и следовало ожидать, сильно зависит от того, сколько автомобилей на МКАД (рис. 5.3). На рисунке 5.1 виден небольшой разброс (около 5%) в значениях скорости, достигнутой через 40 с. Это говорит о том, что система поддержания скорости автомобилей на МКАД, охваченная многими обратными связями, довольно стабильна. Ну, а рисунки 5.2 и 5.3 демонстрируют всем известную истину: чем меньше машин на дороге, тем до большей скорости можно на ней разогнаться.

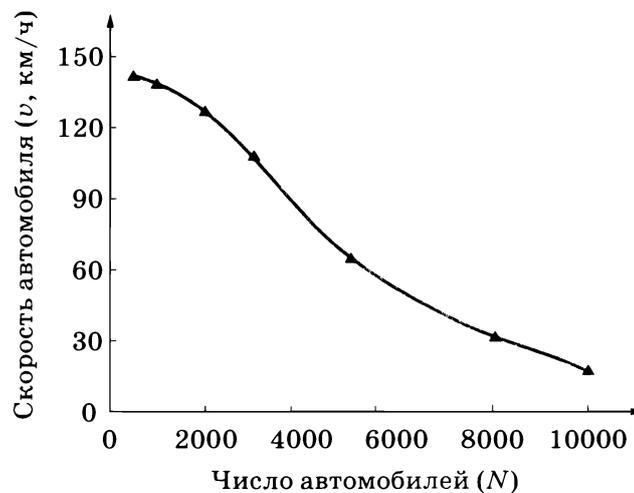


Рис. 5.3. Средняя скорость автомобилей в зависимости от их числа на МКАД

Одноминутная авария

После того как автомобили на МКАД разогнались и достигли своей оптимальной скорости, спровоцируем возникновение автомобильной пробки на дороге. Для этого остановим на одну минуту автомобиль под номером 500, «сломав» его мотор, а потом попросим его водителя начать движение и догнать уехавшие вперед автомобили. На рисунке 5.4 показано, как возникает и живет автомобильная пробка, когда на МКАД находится 3000 автомобилей, т. е. в среднем 30 авто на 1 км.

Результаты моделирования показали, что в конце одномоментной остановки автомобиля 500 около 50 автомобилей, следовавших за ним, тоже остановились, и таким образом пробка продвинулась почти на полкилометра в сторону, противоположную движению. Даже после того, как автомобиль 500, первичная причина автомобильной пробки, продолжил свое движение, догоняя ушедший вперед транспорт, оставившиеся за ним бампер к бамперу автомобили, ставшие вторичной причиной пробки, продолжали задерживать нормальное движение. Как следствие этого, автомобильная пробка продолжала перемещаться по МКАД в сторону, противоположную движению транспорта. Так, через 5 мин после починки мотора, когда автомобиль 500 уже проехал около 12 км и догнал уехавших вперед, созданная им пробка продвинулась почти на 2,5 км от места аварии в сторону, противоположную движению транспорта (см. кривую 3 на рис. 5.4). Автомобильная пробка продолжала двигаться навстречу движению даже тогда, когда она начала рассасываться и все автомобили на дороге стали двигаться

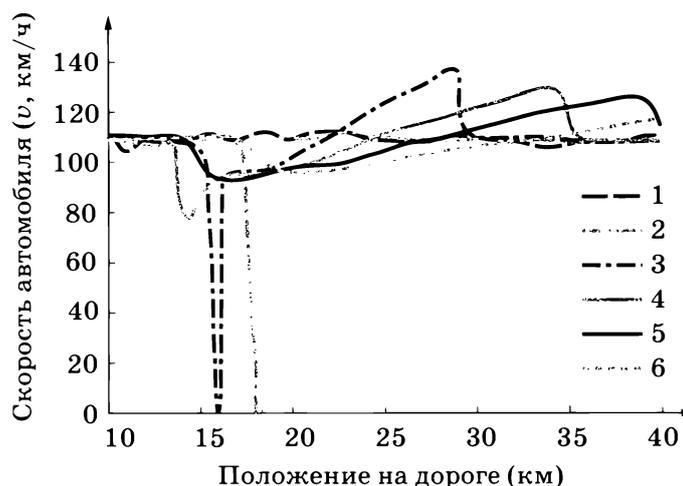


Рис. 5.4. Скорости автомобилей в зависимости от их положения на участке МКАД между 10-м и 40-м километрами в различные моменты времени, когда на дороге находятся 3000 автомобилей: 1 — до остановки автомобиля 500, 2 — в конце его одномоментной остановки, 3 — через 5 мин, 4 — через 9 мин, 5 — через 13 мин, 6 — через 20 мин после восстановления движения

(см. кривую 4). Как показало моделирование, скорость встречного движения пробки составляет около 500 м/мин. Через 2–3 мин после того, как началось движение транспорта, пробка изменяет направление своего перемещения на попутное движение (см. кривые 5 и 6).

Если считать временем жизни автомобильной пробки интервал, когда минимальная скорость на МКАД снижена на 30%, то пробка, показанная на рисунке 5.4, длилась не больше 10 мин. Известно, что последствия аварий на дороге становятся гораздо более серьезными, если они происходят в часы пик, когда плотность транспорта на дороге увеличена. Продемонстрируем это на нашей модели.

Осторожно, час пик!

На рисунке 5.5 показано, какие последствия может иметь одномоментная авария на движение по МКАД в часы пик, когда плотность автомобилей возрастает до 40 на километр. Очевидно, что такая авария приведет к остановке большого числа автомобилей, следующих за неисправным под номером 500. Через одну минуту их уже более 60, и все они становятся вторичными источниками возникшей пробки, когда автомобиль 500 догоняет оторвавшийся вперед транспорт. В результате пробка начинает двигаться навстречу движению транспорта со скоростью около 500 м/мин. В отличие от предыдущего случая, в часы пик пробка может не рассасываться в течение очень долгого времени или даже быть постоянной, как это показано на рисунке 5.5.

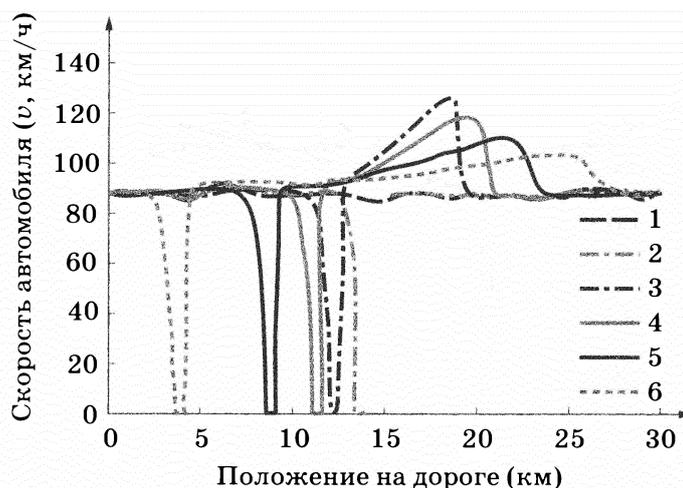


Рис. 5.5. Скорости автомобилей в зависимости от их положения на участке МКАД между нулевым и 30-м километрами, когда на дороге находятся 4000 автомобилей, а желаемая скорость v_0 составляет 120 км/ч: 1 — до остановки автомобиля 500, 2 — в конце его одномоментной остановки, 3 — через 3 мин, 4 — через 5 мин, 5 — через 10 мин, 6 — через 20 мин после восстановления движения

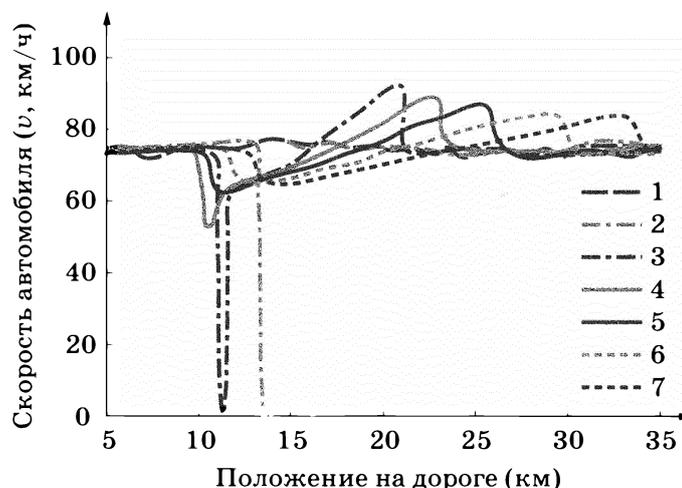


Рис. 5.6. Скорости автомобилей в зависимости от их положения на участке МКАД между 5-м и 35-м километрами в различные моменты времени, когда желаемая скорость v_0 уменьшается до 80 км/ч (на МКАД 4000 автомобилей): 1 — до остановки автомобиля 500, 2 — в конце его одномоментной остановки, 3 — через 5 мин, 4 — через 7 мин, 5 — через 10 мин, 6 — через 15 мин, 7 — через 20 мин после восстановления движения

Причиной «вечной» пробки служит динамическое равновесие между числом автомобилей, останавливаемых этой пробкой, и числом счастливых, вырывающихся из ее плена.

Возможным «лекарством» от автомобильных пробок в часы пик может быть уменьшение плотности стоящих в пробке автомобилей. К сожалению, как только впереди стоящий автомобиль останавливается, мы стараемся приблизиться к нему как можно ближе, считая, что этим мы приближаем для себя момент выхода из автомобильной пробки. Очевидно, что такая стратегия ошибочна. Приближаясь очень близко к бамперу впереди стоящего автомобиля, мы ограничиваем ускорение будущего разгона [см. формулу (5.5)], а значит, и число автомобилей, освобождающихся из плена в единицу времени.

Чтобы не создавать «вечных» автомобильных пробок, достаточно снизить свою желанную скорость v_0 [см. формулу (5.1)] до той скорости, которая оптимальна для данной плотности автомобилей на МКАД (см. рисунок 5.3). Например, v_0 для МКАД с 4000 автомобилей могла бы быть 80 км/ч. Какой была бы ситуация на МКАД в этом случае при одномоментной аварии, показано на рисунке 5.6. Видно, что образование и рассасывание пробки очень похоже на то, что происходит с 3000 автомобилями на МКАД при желанной скорости 120 км/ч. Отметим, что продолжительность такой пробки, состоящей из действительно разумных водителей, составляет всего 8 мин.

Итак, повторяем: не старайтесь подобраться поближе к бамперу впереди идущего автомобиля!

Глава 6

Стирка и чистка под микроскопом



Что такое вымыть руки

Если бы все, что нас окружает, растворялось в воде (как, например, поваренная соль), то вымыть руки было бы очень легко — опустить их в воду и чуть-чуть подождать. К сожалению, большая часть веществ, к которым мы прикасаемся, нерастворимы в воде, и поэтому если они прилипают к рукам или одежде, то одна вода не позволяет нам избавиться от этой грязи и пятен. Однако можно заставить любое вещество, хотя бы на короткое время (несколько секунд), раствориться в воде, образовав эмульсию — взвесь (суспензию) мельчайших частичек вещества в воде. Этого времени часто бывает достаточно для того, чтобы поток чистой воды смыл эмульгированную грязь, сделав руки чистыми. Мыло и служит прекрасным эмульгатором — химическим соединением, облегчающим получение водных эмульсий частичек самых различных веществ.

Как родилось мыло и как его делают сейчас

При раскопках древнего Вавилона были найдены глиняные сосуды, наполненные веществом, похожим на мыло. Надписи на этих сосудах гласили, что содержимое сделано при кипячении жира с пеплом. Поэтому считают, что варить мыло умели еще в 2800-х гг. до н. э. Записи на папирусах, оставленные древними египтянами за 1500 лет до н. э.,

тоже сохранили рецепты мыловарения из смеси животных и растительных масел и пепла. Древние греки не знали мыла, а когда мылись, то сначала терли себя глиной, песком, пемзой и пеплом, потом наносили на тело растительное масло и соскребали его вместе с грязью. Одежду свою они мыли в проточной воде без всякого мыла.

Английское слово «soap» (мыло) произошло от названия горы Sapo в Италии, на вершине которой, согласно легенде, приносили в жертву животных, убивая и сжигая их. Дождь смывал вниз, к протекающей неподалеку реке Тибр, смесь расплавленного жира и древесного пепла. Поэтому глина вдоль Тибра хорошо мылилась, что быстро оценили женщины, стирающие белье на его берегах.

До Второй мировой войны мыло варили кипячением в воде жирных масел со щелочами. Жиры — это соединения глицерина и органических кислот, известных как жирные кислоты. Во время кипячения жиров со щелочами образуются глицерин и соли жирных кислот, т. е. мыла. Использование мыла после Второй мировой войны пошло на убыль, и его постепенно вытеснили синтетические моющие средства. Главная причина спада потребления мыла состояла в том, что в жесткой воде образовывались нерастворимые соли жирных кислот, выпадающие в осадок (кольцевое пятно в ванне или серый оттенок белья). Синтетические моющие средства (детергенты) имеют такой состав, что этой реакции не происходит.

Что такое мыло

Мыло — это натриевая или калиевая соль одной из жирных кислот. Натриевое мыло более густое и, как правило, твердое; калиевое мыло более мягкое или жидкое. Молекула мыла (рис. 6.1, верх) представляет собой длинную цепочку (хвост), состоящую из десятка и более звеньев —CH₂—, соединенных друг с другом, к одному концу которой (голове) прикреплена часть карбоксильной группы (—COO⁻). Простейшим мылом, например, является стеарат натрия, который можно представить формулой C₁₇H₃₅COONa, где 17 атомов углерода с присоединенными к ним атомами водорода вытянуты в извилистую цепочку. Асимметрия молекулы мыла — ее важнейшее свойство. Когда мыльная молекула

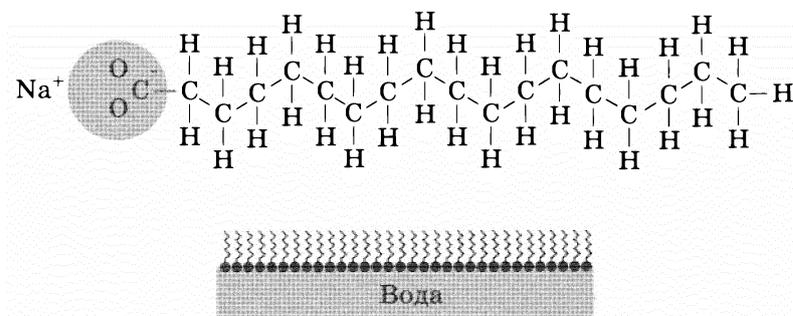


Рис. 6.1. Схематическое изображение мыльной молекулы — стеарата Na (верх). Расположение мыльных молекул на поверхности пленки воды (низ)

стеарата натрия попадает в воду, она диссоциирует на положительно заряженный ион Na^+ и отрицательно заряженный ион $\text{C}_{17}\text{H}_{35}\text{COO}^-$ жирной кислоты. Это основание притягивается к положительным полюсам диполей молекул воды, или, как говорят, испытывает сродство с водой. Другой конец молекулы мыла электрически нейтрален и поэтому инертен по отношению к воде.

Отрицательные ионы мыльных молекул выстраиваются так, чтобы с водой соприкасались лишь их головы, которые испытывают с ней сродство (см. рис. 6.1, низ). Таким образом на поверхности воды образуется двумерный «частокол» мыльных молекул, головы которых погружены в воду, а хвосты торчат наружу.

Как мыло понижает поверхностное натяжение

Молекулы на поверхности жидкостей или твердых тел обладают избыточной потенциальной энергией по отношению к таким же молекулам, находящимся внутри. Эта потенциальная энергия равна работе, необходимой для того, чтобы выйти на поверхность, преодолевая силы притяжения соседних молекул. Очевидно, что эта поверхностная потенциальная энергия U пропорциональна площади поверхности S , что может быть записано как $U = \sigma S$, где σ — коэффициент пропорциональности, который имеет размерность Дж/м² (или Н/м) и называется коэффициентом поверхностного натяжения. Коэффициент поверхностного натяжения определяется свойствами соприкасающихся жидкости и газа или жидкости и твердого тела, а также температурой окружающей среды. Как следует из таблицы 6.1, коэффициент поверхностного натяжения может изменяться в довольно широких пределах, увеличиваясь в десятки раз от спирта до ртути.

Так как с площадью поверхности жидкости связана потенциальная энергия сил поверхностного натяжения, то жидкость, стремясь к минимуму потенциальной энергии, всегда старается сделать эту поверхность меньше. Известно, что поверхность шара обладает минимальной площадью для всех фигур такого же объема. Поэтому если на каплю жидкости не действуют никакие внешние силы, то она принимает форму шара, как это происходит, например, в условиях невесомости. И чем больше коэффициент поверхностного натяжения жидкости, тем с боль-

Таблица 6.1

Жидкости	Поверхностное натяжение, мН/м
Спирт этиловый	23
Ацетон	24
Бензин	29
Оливковое масло	32
Глицерин	63
Вода	73
Ртуть	440

шей силой она будет стремиться минимизировать свою поверхность, при прочих равных условиях.

Измерения показывают, что молекулы мыла на поверхности воды понижают ее поверхностное натяжение почти в 2,5 раза (до 30 мН/м). Происходит это из-за того, что, находясь на поверхности воды головой вниз, молекулы мыла, во-первых, не стремятся внутрь и, во-вторых, отталкиваются друг от друга, а не притягиваются, как молекулы воды. Таким образом, увеличивать поверхность воды, если в ней растворено мыло, легче. А это значит, что жидкость может проникать между нитями ткани (рис. 6.2). Другими словами, мыло делает воду более «мокрой».

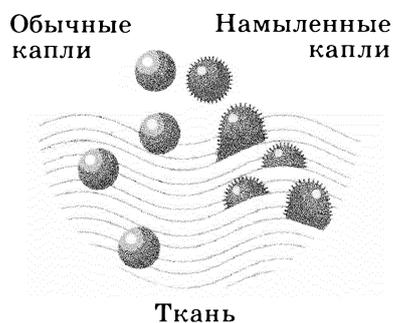


Рис. 6.2. «Намыленные» капли воды легче проникают в промежутки между нитями ткани

Как работает мыло

Мыльный раствор обволакивает частицы грязи, приводя к образованию эмульсий различных загрязняющих веществ, и удерживает нерастворимые частицы в состоянии суспензии в мыльной пене и воде, которые потом удаляются от очищаемой поверхности проточной водой. Для моющего действия важно то, что углеводородная часть (хвост) отрицательного иона мыльной молекулы нерастворима в воде, но растворима в жирах и маслах. Поэтому, как показано на рисунке 6.3, водорастворимая отрицательно заряженная голова остается в воде, тогда как хвост мыльной молекулы погружается в жир. Анионы мыльных молекул со всех сторон окружают капельки жира, образуя мицеллы (шарики), и вытаскивают их в воду, в результате чего образуется взвесь капелек жира в воде. Так как каждая из мельчайших капелек несет на себе отрицательный заряд, то они отталкиваются друг от друга, а не сливаются в более крупные капли. Этим объясняется диспергирующий и эмульгирующий эффект мыльных растворов.

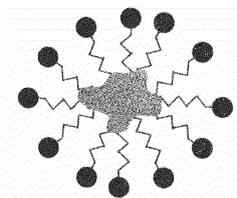


Рис. 6.3. Образование мицеллы из мыльных молекул вокруг частички жира или грязи

Почему горячая вода моет лучше

При нагревании средняя кинетическая энергия молекул воды увеличивается, а это значит, что каждой из них, чтобы выйти на поверхность, требуется меньше дополнительной энергии. Поэтому поверхностное натяжение воды при нагревании уменьшается (рис. 6.4), и она

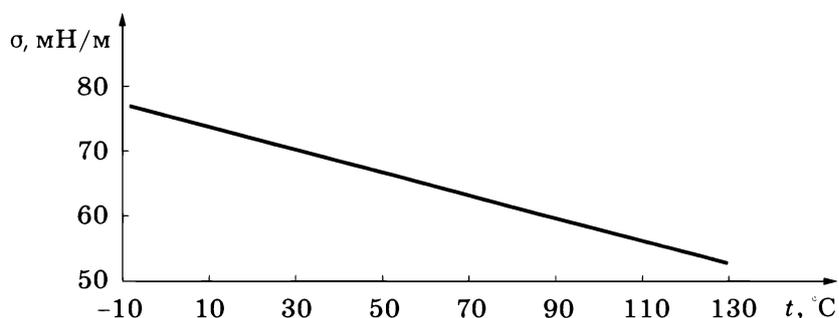


Рис. 6.4. Зависимость поверхностного натяжения воды от температуры

может проникать в самые мелкие поры и дырочки. Вот почему надо мыть руки горячей водой. Мыло и детергенты еще больше уменьшают поверхностное натяжение горячей воды.

Почему мыло плохо стирает в морской воде

Морская вода характеризуется высоким содержанием двухвалентных катионов — Ca^{2+} и Mg^{2+} . Эти катионы связываются с отрицательно заряженными головками мыльных молекул, мешая им образовывать мицеллы вокруг частичек грязи и жира. Поэтому поверхностное натяжение мыльного раствора в морской воде увеличивается, что снижает качество стирки. То же происходит, когда в водопроводной воде высока концентрация двухвалентных ионов, например, железа. Такую воду называют жесткой, и в ней мыло плохо стирает.

Почему полоскать надо в холодной воде

Цель полоскания — убрать остатки мыла из выстиранной ткани. При стирке мы нагреваем воду, чтобы понизить поверхностное натяжение воды, и поэтому мыльный раствор хорошо проникает между волокнами ткани. Чтобы раствор оттуда удалить, необходимо увеличить поверхностное натяжение, и тогда каждая из сплюснутых капелек опять станет шарообразной, и они выскочат из узких промежутков между нитями. Поэтому полоскать ткань после стирки следует в холодной воде, когда ее поверхностное натяжение велико.

Что такое отбеливатель

В моющих средствах для стирки белья, помимо собственно детергента (мыла), используют еще и отбеливатель. Отбеливатели не удаляют грязь, а лишь обесцвечивают ее. Одни из них окисляют и тем самым разрушают некоторые виды загрязнителей и красящих веществ. Классическим окислителем служит хлор. В современных стиральных порошках используют более избирательные отбеливатели, основанные на броне. Другие отбеливатели, называемые усилителями белизны,

делают выстиранное белье буквально белее белого. Для этого в стиральные порошки добавляют флюоресцирующий «бесцветный краситель», который обеспечивает не только полное отражение видимого света, но и частичное превращение ультрафиолетового света в белый или голубоватый. В результате ткань становится ослепительно белой.

Ультразвук — механическое мыло

Размельчить грязь и превратить ее в эмульсию можно не только химически, как это делает мыло, но и механически. Каждый знает, что если потереть испачканное место, а потом ополоснуть его водой, то пятно станет менее заметным. Поэтому энергия звуковых волн при стирке может служить альтернативой обычному мылу. Для этого достаточно, чтобы скорости движения частиц воды и грязи в звуковой волне различались. Тогда частички воды будут сталкиваться с частичками грязи, разрушать (диспергировать) их и перемешиваться, образуя эмульсию.

Известно, что в распространяющейся со скоростью c звуковой волне мгновенные значения давления p и скорости v перемещения частицы среды связаны следующим соотношением:

$$v = \frac{p}{\rho c}, \quad (6.1)$$

где ρ — плотность среды. Произведение ρc , называемое акустическим импедансом, для жира на 10% меньше, чем для воды, поэтому при одном и том же звуковом давлении скорость движения частиц воды и грязи будет различна. Очевидно, что чем чаще звуковая волна встряхивает грязь, тем лучше для чистки и стирки. Поэтому для достижения максимального диспергирующего и эмульгирующего эффекта используют ультразвук (УЗ) с частотой до нескольких сот килогерц.

Как получают ультразвук

Ультразвуковые волны в жидкостях обычно возбуждают магнито-стрикционными и пьезоэлектрическими преобразователями (генераторами). Пьезоэлектрические генераторы УЗ (рис. 6.5) преобразуют

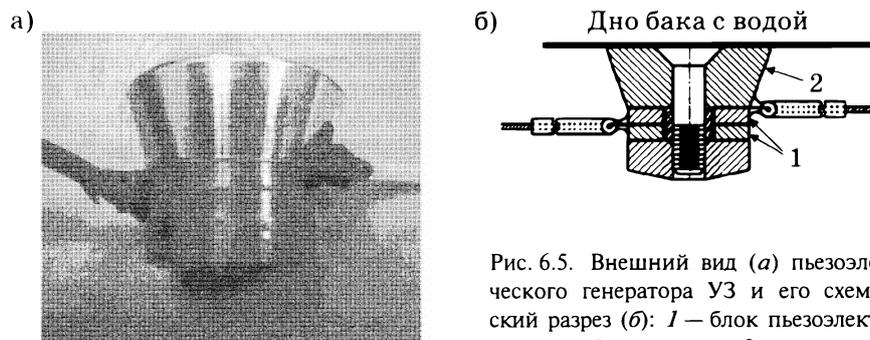


Рис. 6.5. Внешний вид (а) пьезоэлектрического генератора УЗ и его схематический разрез (б): 1 — блок пьезоэлектрических преобразователей; 2 — металлическое соединение с дном контейнера с водой

электрическую энергию в энергию ультразвуковых колебаний, используя обратный пьезоэлектрический эффект — деформацию некоторых монокристаллов (например, кварца и сегнетовой соли), а также некоторых керамических материалов (например, титаната бария) в переменном электрическом поле. При этом в окружающей среде возникают механические колебания, распространяющиеся в виде УЗ. Пьезоэлектрические генераторы могут быть мощными источниками УЗ с частотой до 1000 МГц. Используя пьезокерамику, поверхность ультразвукового излучателя часто делают сферической, что позволяет фокусировать излучение на малой площади, получая очень большую интенсивность УЗ. Такая фокусировка в литотрипсии — дроблении камней в почках и мочевом пузыре — позволяет направлять мощный УЗ только на камни, не затрагивая окружающих тканей.

Магнитострикционные генераторы УЗ (рис. 6.6) преобразуют сначала энергию электрического тока в энергию магнитного поля, а потом — энергию магнитного поля в механическую (звуковую или ультразвуковую) энергию. Их действие основано на том, что некоторые металлы (например, никель) и их сплавы деформируются в магнитном поле. Если стержень из такого металла расположить вдоль линий переменного магнитного поля, то стержень станет попеременно сокращаться и удлиняться, возбуждая в окружающей среде ультразвуковые волны той же частоты. Магнитострикционные преобразователи из тонкого листового металла работают лучше всего в низкочастотном ультразвуковом диапазоне (от 20 до 50 кГц), но на более высоких частотах их коэффициент полезного действия становится очень низким.

Пьезоэлектрические генераторы предпочтительнее, так как их можно использовать в более широком диапазоне частот. Кроме того, при одной и той же выходной акустической мощности пьезоэлектрические генераторы УЗ потребляют меньше электрической энергии. Что касается акустической мощности, необходимой для стирки, то установлено, что 50—100 Вт вполне достаточно для стирки в 4 л воды. Если рассчитывать необходимую акустическую мощность на единицу поверхности ультразвукового излучателя, то она составит 45—60 Вт/дм².

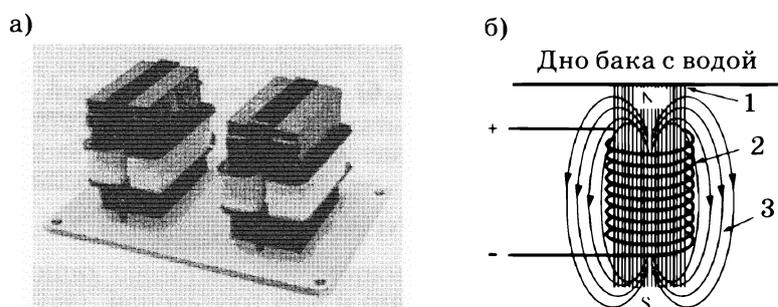


Рис. 6.6. Внешний вид (а) магнитострикционного генератора УЗ и его схематический разрез (б): 1 — спаянное соединение металлических пластин и дна контейнера, 2 — катушка из проволоки, 3 — линии магнитного поля

Что такое кавитация

Объяснить эмульгирующее действие УЗ только формулой (6.1) очень трудно. Так, например, УЗ перестает образовывать эмульсии несмешиваемых жидкостей, если обе эти жидкости не содержат газа. Это говорит о том, что существенную роль в получении эмульсий играет кавитация — образование в жидкости полостей, заполненных газом, паром или их смесью (так называемых кавитационных пузырьков, или каверн). Кавитация возникает в результате локального уменьшения давления ниже критического значения $p_{кр}$ (оно приблизительно равно давлению насыщенного пара этой жидкости). Если понижение давления происходит вследствие локального повышения скорости в потоке жидкости (вспомним уравнение Бернулли), то кавитацию называют гидродинамической; в случае же прохождения в жидкости акустических волн — акустической.

В обычной жидкости всегда присутствуют мельчайшие пузырьки газа или пара, и, оказавшись в области, где давление меньше $p_{кр}$, они начинают расти. После перехода в зону повышенного давления рост пузырька прекращается, и он начинает сокращаться. Если пузырек содержит достаточно много газа, то по достижении им минимального радиуса он восстанавливается и совершает нескольких циклов затухающих колебаний, а если газа мало, то пузырек полностью захлопывается, и вблизи обтекаемого тела создается кавитационная зона, заполненная движущимися пузырьками (рис. 6.7).

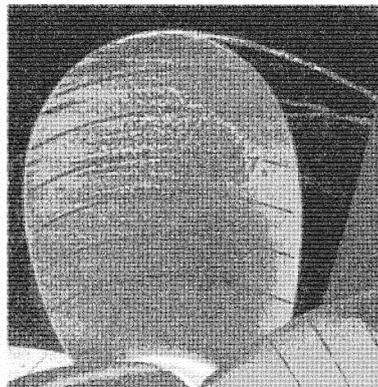


Рис. 6.7. Возникновение кавитационных пузырьков вблизи поверхности лопасти вращающегося гребного винта

Акустическая кавитация

Если звуковое давление во время полупериодов разрежения уменьшается ниже давления насыщенного пара, то в жидкости возникают кавитационные пузырьки, зародышами которых чаще всего являются мельчайшие газовые пузырьки, содержащиеся в жидкости. Сокращение кавитационного пузырька происходит с большой скоростью. Если это быстрое движение внезапно прекратится вследствие полного смыкания полости, то сконцентрированная в ничтожно малом объеме кинетическая энергия освободится и перейдет частично во внутреннюю энергию и в энергию сжатия. При этом из центра сомкнувшейся полости распространится кратковременный (порядка 10^{-6} с) импульс давления (до 10^9 Па и более), способный разрушить даже весьма прочные материалы. Кстати, для литотрипсии используются ультразвуковые колебания с акустическим давлением менее 10^8 Па.

Чтобы проверить, есть кавитация или нет, в жидкость можно опустить тонкую алюминиевую фольгу. Если УЗ вызывает кавитацию, то, вытащив кусочек фольги из жидкости, мы увидим в нем маленькие дырочки — следы кавитационных ударных волн.

Чем меньше газа содержит пузырек, тем сильнее будет кавитационная ударная волна. Высокие концентрации растворенных газов замедляют смыкание кавитационных пузырьков, подавляя одновременно и эмульгирование. Поэтому процессу стирки обычно предшествует дегазирование жидкости с помощью УЗ. Это происходит из-за того, что уже имеющиеся в жидкости маленькие пузырьки газа под действием УЗ соединяются в более крупные и всплывают. Кроме того, и сама кавитация приводит к дегазации жидкости. Интенсивные колебания газонаполненных пузырьков вблизи поверхности твердых тел создают микротоки жидкости, делающие ультразвуковую стирку и чистку более эффективной.

Как гидростатическое давление влияет на кавитацию

В вакууме жидкость лишена микропузырьков, поэтому УЗ не вызывает в ней ни кавитации, ни эмульгирования. Понижение внешнего давления ниже атмосферного (< 20 кПа) мешает смыканию возникающих кавитационных пузырьков, уменьшая мощность кавитационных ударных волн. Очень высокое давление ($> 10\,000$ кПа) уничтожает микропузырьки, являющиеся зародышами кавитации, и препятствует ее возникновению. Однако увеличение гидростатического давления до 200 кПа помогает до конца схлопываться большинству кавитационных пузырьков. Поэтому подводники замечают, что кавитация, измеряемая по интенсивности шума гребных винтов, резко увеличивается при погружении на 10—20 м, а потом идет на убыль.

Ультразвуковая очистка

С помощью УЗ можно не только стирать, но и очищать поверхности металла или стекла от мельчайших посторонних частиц, жировой пленки и других видов загрязнения. Для этого предмет, подлежащий очистке, помещают в жидкость с источником УЗ, и схлопывающиеся кавитационные пузырьки срывают с обрабатываемой поверхности нежелательные частицы. В промышленности используется ультразвуковое оборудование для очистки поверхности кварцевых кристаллов для механизма часов, оптического стекла и ювелирных украшений. УЗ также помогает сделать детали шарикоподшипников абсолютно гладкими и снять заусенцы с малогабаритных деталей.

Ультразвук какой частоты лучше чистит

Чем выше частота УЗ, тем большее звуковое давление требуется для появления кавитации. Это происходит из-за того, что образование каждого кавитационного пузырька требует определенного времени, которое зависит от размеров зародышей кавитации и степени разрежения. Например, в обычной воде кавитация возникает при звуковом давлении 100 кПа, если частота звука 15 кГц, и при звуковом давлении 400 кПа, если частота звука 175 кГц. Инерция колебаний кавитационных пузырьков делает зависимым их диаметр от частоты звука: при 15 кГц — 200 мкм, при 175 кГц — 20 мкм.

Очевидно, что чем больше кавитационный пузырек, тем больше энергия ударной волны, образующейся при его схлопывании. Поэтому частоты ниже 80 кГц используются, как правило, для технических целей, где требуется удалить большие загрязнения, а иногда и слои грязи или ржавчины. Однако крупным пузырькам тяжело проникнуть в щели, чтобы извлечь оттуда грязь, а значит, нужны и мелкие пузырьки. Поэтому для хорошей чистки и стирки необходим генератор УЗ с плавающей частотой. Такой генератор также будет препятствовать возникновению стоячих волн, в пучностях которых может происходить разрушение материалов.

Как ультразвук борется с бактериями

Самым эффективным способом дезинфекции является кипячение. Однако когда инструмент (например, эндоскопический зонд), подлежащий дезинфекции, сделан из пластмассы, то кипячение может испортить его. Выходом из положения в таких случаях является ультразвуковая дезинфекция. Импульсы давления, возникающие в кавитационных пузырьках, приводят к гибели бактерий и микроорганизмов, находящихся в водной среде, подвергаемой воздействию УЗ.

Прошлое и настоящее ультразвуковых стиральных машин

Первый раз в мыльном растворе с помощью УЗ выстирали хлопчатобумажные простыни, испачканные жирной сажой, в 1949 г. Для этого понадобился 1 ч и пятикратная смена воды. Обычная стирка в таком же растворе заняла 3 ч и потребовала пятнадцатикратной смены воды. Прошло более 50 лет, но до сих пор ультразвуковая стирка не находит широкого применения в быту. Миниатюрные ультразвуковые стиральные машины, потребляющие очень мало мощности (5–15 Вт), с излучателем размером 5–10 см, стирают лишь несколько слоев ткани, соприкасающихся с поверхностью излучателя. Таким образом можно убирать пятна на ткани перед обычной стиркой. Однако УЗ в таких машинах, как утверждают изготовители, делает более эффективным лишь действие детергента, доставляя его к местам загрязнения. В то же время некоторые компании уже несколько лет выпускают ультразвуковые стиральные машины, рассчитанные на 5–8 кг белья и не требующие для стирки стирального порошка. При стирке через воду пропускают ток, и происходит гидролиз воды, а получающиеся продукты гидролиза — активный кислород, озон и перекись водорода — являются тем коктейлем, который вполне заменяет стиральный порошок. Так как в воде всегда содержится хлор, то при гидролизе еще образуется гипохлорная кислота HClO , которая является хорошим отбеливателем и дезинфицирующим препаратом. Очевидно, что дальнейшее внедрение ультразвуковых стиральных машин позволит уменьшить энергетические затраты на стирку, а также количество используемых детергентов, делая этот процесс экологически более чистым.

Глава 7

Любовь и ненависть в мире материалов



Различные вещества и материалы могут по-разному взаимодействовать друг с другом. Особенно это относится к взаимодействию жидкости и поверхности твердого тела. Капли воды, например, «любят» ветровое стекло автомобиля и, скатываясь с него, оставляют на нем длинные мокрые полосы. А вот на поверхности листа лотоса или капусты оставить след им не удастся. Не равнодушны друг к другу и твердые материалы, и это определяет, как их можно спаять, сварить, склеить или покрасить. Оказалось, что взаимодействие материалов зависит от смачивания и адгезии — физических явлений, с которыми мы сталкиваемся на каждом шагу.

Все дело в смачивании

Смачивание — явление, возникающее при соприкосновении жидкости с поверхностью твердого тела или другой жидкости в результате межмолекулярного взаимодействия в зоне этого контакта. Оно выражается, в частности, в растекании жидкости по твердой поверхности, находящейся в контакте с газом или другой жидкостью, пропитывании пористых тел и порошков, искривлении поверхности жидкости у поверхности твердого тела. Смачивание определяет форму капли на

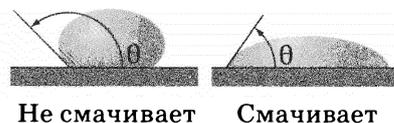


Рис. 7.1. Краевой угол θ , когда капля жидкости смачивает или не смачивает поверхность твердого тела

твердой поверхности, а мерой смачивания служит краевой угол θ между смачиваемой поверхностью и поверхностью жидкости на периметре смачивания (рис. 7.1). Когда $\theta < 90^\circ$, говорят, что жидкость смачивает поверхность, а когда $\theta > 90^\circ$ — не смачивает.

Краевой угол зависит от соотношения сил сцепления молекул жидкости с молекулами или атомами смачиваемого тела (адгезия) и сил сцепления молекул жидкости между собой (когезия). Если молекулы жидкости притягиваются друг к другу сильнее, чем к молекулам твердого тела, жидкость стремится собраться в каплю. Если же, наоборот, молекулы жидкости притягиваются друг к другу слабее, чем к молекулам твердого тела, жидкость прижимается к поверхности, расплывается по ней. Поверхность, на которой жидкость растекается, называют лиофильной (греч. «любящая растворение») по отношению к данной жидкости. В тех же случаях, когда растекания не происходит, поверхность называют лиофобной (греч. «боящаяся растворения»). Измеряя угол θ , оценивают лиофильность и лиофобность поверхностей по отношению к различным жидкостям.

Значение смачиваемости во многих технологических процессах, явлениях живой и неживой природы и в быту трудно переоценить. Учитывать смачивание необходимо при стирке, крашении, склеивании, пайке, создании гидроизоляционных материалов и др. На явлении смачивания основана флотация — один из основных методов обогащения минеральных руд, а также многие другие технологические процессы. Эффективными регуляторами смачивания являются поверхностно-активные вещества.

Смачиваемость зависит от поверхностного натяжения

Так как от площади поверхности жидкости зависит потенциальная энергия сил поверхностного натяжения, то жидкость, стремясь к минимуму потенциальной энергии, старается уменьшить свою поверхность. Известно, что поверхность шара обладает минимальной площадью из всех фигур такого же объема. Поэтому если на каплю жидкости не действуют никакие внешние силы, то она принимает форму шара, как это происходит, например, в невесомости. И чем больше коэффициент поверхностного натяжения жидкости, тем с большей силой она будет стремиться минимизировать свою поверхность при прочих равных условиях.

Потенциальной энергией поверхностного натяжения обладают не только молекулы жидкости, находящиеся на границе жидкость — газ, но и молекулы твердого тела на границе тело — жидкость и те-

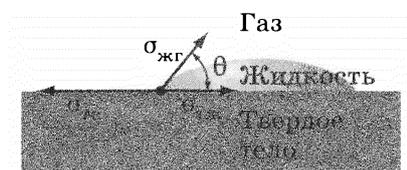


Рис. 7.2. К вычислению краевого угла смачивания θ по балансу сил поверхностного натяжения

ло — газ. Поэтому когда капля жидкости попадает на поверхность твердого тела, то задачу о минимизации потенциальной энергии приходится решать им троим: твердому телу (т), жидкости (ж) и газу (г). Если адгезия жидкости и поверхности твердого тела так высока, что для них (капли и поверхности твердого тела) становится энергетически выгодным смачивать поверхность, даже увеличивая потенциальную энергию сил поверхностного натяжения на границе жидкость — газ, то капля расплывается вдоль поверхности твердого тела. Это продолжается до тех пор, пока дальнейшее расплывание капли становится уже энергетически невыгодным. При наступившем равновесии соблюдается баланс горизонтальных сил, растягивающих и сжимающих поверхность капли (рис. 7.2), который позволяет вычислить краевой угол θ по известным значениям коэффициентов поверхностного натяжения $\sigma_{жг}$, $\sigma_{тж}$, и $\sigma_{тг}$:

$$\sigma_{тг} = \sigma_{тж} + \sigma_{жг} \cdot \cos \theta.$$

Паять — значит смачивать

Пайка возможна только в том случае, если припой смачивает соединяемые детали. Это происходит, если силы притяжения между атомами припоя и металла больше, чем между атомами внутри самого припоя. Если капля припоя не смачивает поверхность, то она не способна затекать в узкие зазоры между соединяемыми материалами. При наличии загрязнений соединяемых поверхностей адгезия припоя ухудшается, и возможно образование несмачиваемых зон, что снижает качество пайки. Для устранения пленки окислов с поверхностей металлов и уменьшения сил поверхностного натяжения расплавленного припоя на границе металл — припой служат специальные материалы — флюсы. При электрическом монтаже наиболее широко применяются флюсы на основе канифоли.

Как силы поверхностного натяжения обогащают руды

Большую роль играют силы поверхностного натяжения во флотации — широко распространенном способе обогащения различных руд. Метод флотации основан на смачивании водой минералов, содержащихся в руде. Для этого изготавливают пульпу — смесь измельченной руды и воды. В пульпу добавляют специальное химическое соединение, которое, взаимодействуя с искомым минералом, делает его по-

верхность лиофобной по отношению к воде (гидрофобной). После этого через пульпу начинают пропускать пузырьки воздуха. Так как вода не смачивает минерал, подлежащий изъятию из руды, то он выталкивается из жидкости, прилипает к пузырькам пропускаемого через пульпу воздуха и всплывает на поверхность, откуда и удаляется вместе с пеной.

Что такое эффект лотоса

Лотос — одно из прекраснейших водяных растений на нашей планете (рис. 7.3). Его цветки не только изумительно красивы, но и чисты даже тогда, когда вода вокруг мутная и грязная. Листья и цветки не смачиваются водой, поэтому капли воды скатываются с них, как шарики ртути, не оставляя следа и смывая всю грязь. Даже капля клея и меда не удастся удержаться на поверхности листьев лотоса. Кстати, такими же уникальными свойствами обладают листья не только лотоса, но и многих других растений, в частности обыкновенной капусты.

Оказалось, что вся поверхность листьев лотоса густо покрыта микропупырышками высотой около 10 мкм, а сами пупырышки, в свою очередь, покрыты микроворсинками еще меньшего размера (рис. 7.4). Исследования показали, что все эти микропупырышки и ворсинки состоят из воска, как и поверхность многих растений. Известно, что воск плохо смачивается водой, но только наличие воска на поверхности листьев лотоса не может объяснить то, что соответствующий краевой угол составляет более 160° , так как для листьев магнолии, которые тоже покрыты воском, краевой угол равен лишь 54° . Значит, именно пупырчатая структура поверхности листьев лотоса значительно уменьшает их смачиваемость, в 3 раза увеличивая соответствующий краевой угол. И вот почему.

Капля воды, попав на поверхность листа лотоса, похожую на массажную щетку, не проникает между микропупырышками, так как этому мешает высокое поверхностное натяжение жидкости. Чтобы проникнуть между микропупырышками, капле надо увеличить свою поверхность, а это энергетически невыгодно. Поэтому капля «парит на пуантах», между которыми находятся пузырьки воздуха, а это значительно уменьшает силы адгезии между каплей и поверхностью листа лотоса. Это значит, что капле становится невыгодно растекаться и смачивать колючую поверх-

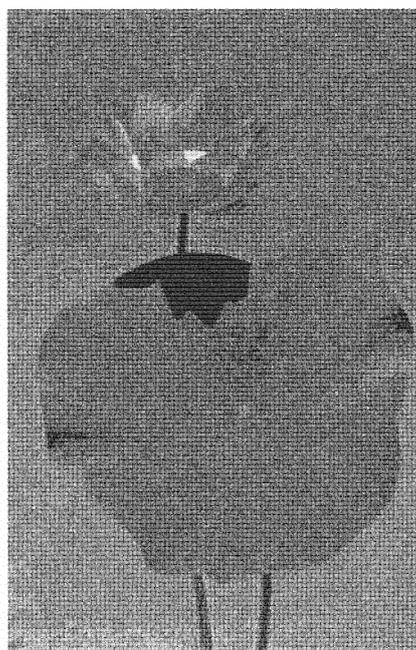


Рис. 7.3. Лотос орехоносный, или индийский (*Nelumbo nucifera*)

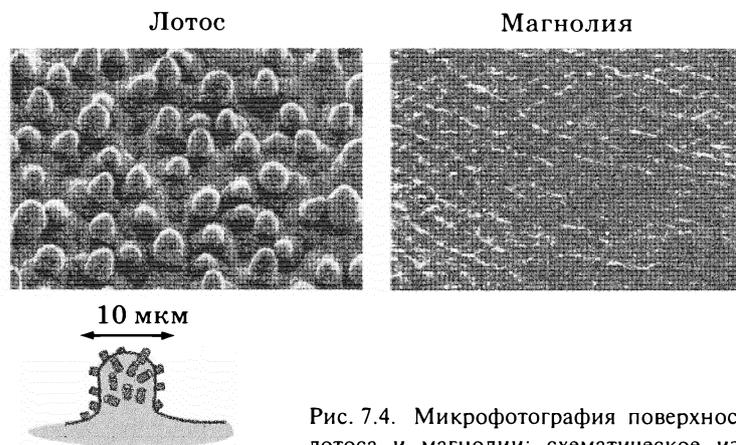


Рис. 7.4. Микрофотография поверхности листьев лотоса и магнолии; схематическое изображение одного микропупырышка (низ)

ность листа лотоса, и она сворачивается в шарик, демонстрируя очень высокий краевой угол, как это изображено на рисунке 7.5.

Поверхность, аналогичная массажной микрошетке, уменьшает адгезию (прилипание) не только капель воды, но и любых частичек размером более 10 мкм, так как они, попадая на поверхность, касаются ее лишь в нескольких точках. Поэтому частички грязи, оказавшиеся на поверхности лотоса, либо сами сваливаются с него, либо увлекаются скатывающимися каплями воды, адгезия к которым у них гораздо больше, чем к колючей поверхности листа. Такое самоочищение лотоса от частиц грязи называют эффектом лотоса. Похожим образом устроена поверхность крыльев бабочек и многих других насекомых, для которых защита от избыточной воды жизненно необходима: намочив, они теряют способность летать.

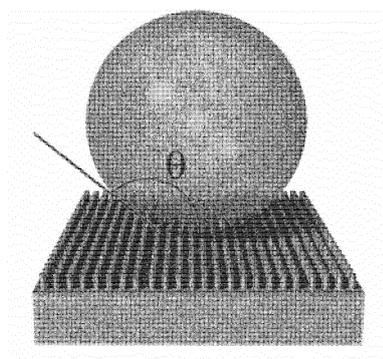
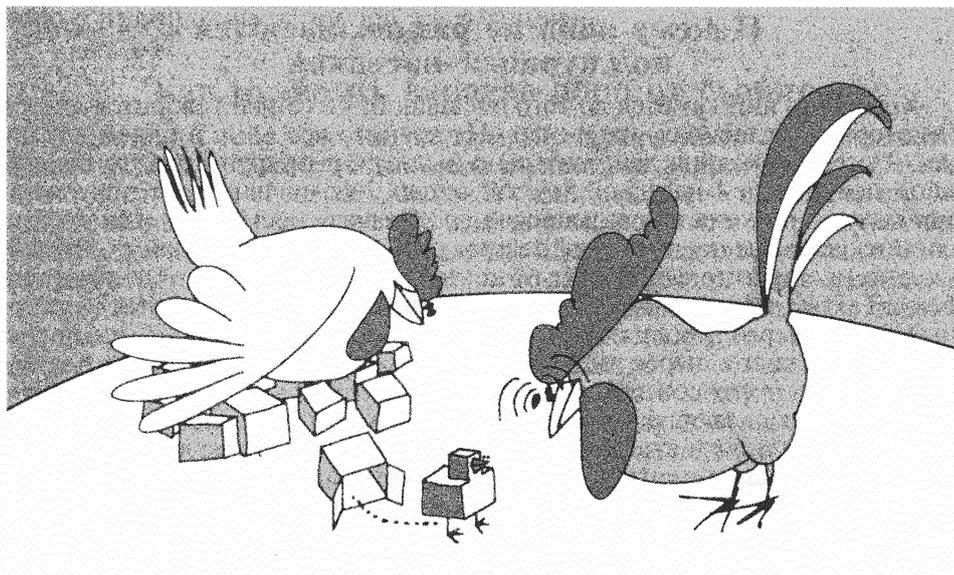


Рис. 7.5. Капля воды на массажной микрошетке

Выведав у природы ее секреты, ученые смогли создать искусственные самоочищающиеся покрытия. Эффект лотоса используется в промышленности для создания водоотталкивающих самоочищающихся покрытий и красок. Разрабатывается самоочищающееся ветровое стекло автомобиля, внешняя поверхность которого покрыта микроворсинками. На таком стекле «дворникам» делать нечего. Совсем скоро появятся постоянно чистые диски для колес автомобилей, самоочищающиеся с использованием эффекта лотоса, а уже сейчас можно снаружи покрасить дом краской, к которой грязь не прилипает. У таких технологий большое будущее.

Глава 8

Немного о физике яйца



Латинское изречение гласит: «Omne vivum ex ovo» (Все живое из яйца) (рис. 8.1). Яйцо было и до сих пор остается основным объектом изучения в биологии. Однако, пользуясь только биологическими методами исследования, иногда бывает трудно ответить на, казалось бы, простые вопросы. Например, почему яйца не раздавливаются под курицей-наседкой или почему сваренные яйца надо быстро охладить, чтобы было легче их очистить от скорлупы? Попробуем с помощью законов физики ответить на эти вопросы и еще на несколько других.

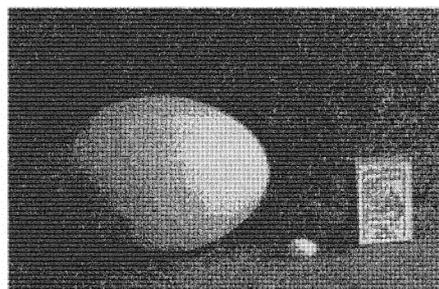


Рис. 8.1. Яйца колибри и страуса

Какое из двух сталкиваемых одинаковыми частями пасхальных яиц должно разбиться: ударяемое (неподвижное) или ударяющее (движущееся)?

С задачи о двух яйцах начинается известная книга Я. И. Перельмана «Занимательная механика». В соответствии с принципом относительности движения Галилея результат столкновения не должен зависеть от того, какое из яиц мы будем считать неподвижным, связав с

этим яйцом свою систему координат. Поэтому предсказать результат их столкновения, основываясь только на том, какое из яиц движется, а какое неподвижно, невозможно.

Почему яйца не раздавливаются под курицей-наседкой

Хрупкость яиц кажется до того очевидной, что о ней говорится даже в некоторых пословицах, например «Не храните все яйца в одной корзине». Но если бы яйца действительно были такими хрупкими, то почему яйца под курицей-наседкой массой около 2 кг, сидящей на них почти три недели, никогда не раздавливаются? Сначала посмотрим, как курица организовала кладку яиц. Оказывается, что все яйца в мягкой подстилке (соломе) сориентированы острым концом вверх, и ни одно не лежит на боку. Так же вертикально сориентированы яйца в специальных картонных контейнерах, когда мы их покупаем в магазине. Все это говорит о том, что раздавить сырое яйцо, прикладывая силу вертикально между тупым и острым его концами, гораздо тяжелее, чем сжимая с боков. Тот, кто не боится запачкать руки, может убедиться в этом сам.

Окончательно удостовериться в крепости яичной скорлупы поможет следующий эксперимент. Возьмем два сырых яйца, на концах аккуратно просверлим дырочки (с помощью иголки или тонкого сверла) и через них выльем содержимое яиц наружу. К боковой поверхности каждого яйца приклеим липкую ленту так, чтобы она разделяла яйцо на два полушария — с тупым и острым концами. Липкая лента нужна для того, чтобы полушария не треснули, когда мы будем отделять их одно от другого. Потом надо взять острый режущий инструмент (скальпель, нож или бритву) и разрезать пустые яйца по средней линии липкой ленты. Итак, мы получили четыре пустых яичных полушария. Положим их на ровную поверхность стола полюсами вверх (обрезанными краями вниз) так, чтобы они образовывали квадрат со стороной 15 см. А теперь аккуратно положим на них книгу, потом еще одну и еще... Оказывается, что яичные опоры не так хрупки, как казалось раньше, и уж конечно могут выдержать вес большой курицы. Почему?

Объяснить, почему яйцо тяжело раздавить, прикладывая силу к сферическим концам, можно с помощью закона Лапласа (результат баланса сил, приложенных к элементу скорлупы), описывающего, как зависит напряжение T (отношение силы, сжимающей скорлупу, к ее площади поперечного сечения) в искривленной части скорлупы от внешнего давления p , радиуса кривизны поверхности R и толщины скорлупы h :

$$T = \frac{pR}{h} \text{ для цилиндрической поверхности,}$$

$$T = \frac{pR}{2h} \text{ для сферической поверхности.}$$

В середине яйца, где поверхность близка к цилиндрической, внешнее давление вызывает напряжение скорлупы, по крайней мере в 2 раза большее, чем в том случае, когда такое же давление действует на сферические концы яйца. Кроме того, из закона Лапласа следует, что острый конец яйца, имеющий меньший радиус кривизны, гораздо более прочен, чем тупой. Поэтому на пасхальных яичных турнирах

противника надо бить острым концом, предварительно убедив его защищаться тупым. Закон Лапласа объясняет, почему крыши многих величественных зданий имеют форму полушарий. Сферические купола позволяют в 2 раза увеличить прочность конструкций, по сравнению с цилиндрическими той же толщины.

Как отличить вареное яйцо от сырого

Представим себе, что мы положили вареное яйцо в холодильник среди сырых, а потом забыли его положение в контейнере. Самый простой способ определить, какое из яиц вареное — положить его на стол, раскрутить и отпустить, следя за тем, сколько оборотов оно совершит до полной остановки. Сырое яйцо никогда не совершит больше двух оборотов, а вот вареное может даже и десять. Происходит это потому, что, вращая сырое яйцо, вы, вообще говоря, вращаете только его скорлупу и ближайший к ней слой жидкости внутри. Силы вязкого трения содержимого сырого яйца при вращении оставляют практически неподвижной центральную его часть. Затем, когда вы перестаете крутить яйцо, то силы вязкого трения сразу начинают тормозить вращение ближайших к скорлупе частей жидкости и скорлупы по отношению к центральным. В результате под действием сил вязкого трения и трения скольжения между яйцом и столом яйцо останавливается, сделав не больше двух оборотов. В вареном яйце под скорлупой находится твердый гель, и когда вы отпускаете раскрученное вареное яйцо, то оно движется целиком: тормозит его вращение только сила трения скольжения о поверхность стола. Поэтому и вращается вареное яйцо дольше сырого.

Как отличить свежее яйцо от несвежего

Масса среднего свежего яйца 58 г, его объем 53 см^3 , поэтому плотность примерно равна 1090 кг/м^3 . Таким образом, свежее яйцо должно быстро тонуть в чистой воде. Если в скорлупе яйца сделать трещину и оставить его в тепле, то оно скоро испортится. В процессе гниения в яйце происходит накопление различных газов и их диффузия наружу, а это ведет к уменьшению массы яйца. В результате испорченные яйца либо очень медленно опускаются на дно стакана, наполненного водой, либо вообще всплывают. Способность свежих яиц опускаться на дно в сосуде, наполненном водой, используется некоторыми хозяйками для создания стандартного рассола при консервации свежих овощей. Они опускают в кастрюлю с водой свежее яйцо и добавляют в нее соль до тех пор, пока яйцо не начнет всплывать (около 14 г на 100 мл раствора).

Как устроена скорлупа и как от нее легче очистить вареное яйцо

Толщина скорлупы около 0,3 мм, ее средняя площадь 70 см^2 . Скорлупа содержит карбонат кальция (CaCO_3) — один из самых распространенных минералов земной коры. Мел, которым мы пишем на доске, тоже карбонат кальция. В скорлупе яйца имеется около

10 000 микроскопических пор, необходимых для того, чтобы развивающийся в яйце зародыш мог дышать. Через поры происходит обмен газами с окружающим воздухом — кислород входит в яйцо, а углекислый газ выходит. Эти поры на поверхности скорлупы можно легко увидеть через увеличительное стекло.

Все хозяйки знают: вареное яйцо легче очистить от скорлупы, если сразу из кипятка положить его в холодную воду. Действительно, это так! При резком охлаждении происходит сжатие содержимого яйца и его скорлупы. Однако вещества, содержащиеся в яйце, имеют различные коэффициенты объемного расширения k . У карбоната кальция $k = 2,7 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$, а у затвердевшего геля альбумина (белка) коэффициент объемного расширения в несколько раз больше, чем у чистой воды, у которой в диапазоне температур между 20 и 60 °C $k = 4 \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}$. Допустим, что при охлаждении сваренного яйца ($t_{\text{я}} = 100 \text{ °C}$) холодной водой из-под крана ($t_{\text{в}} = 20 \text{ °C}$) внутренний объем, ограниченный скорлупой, уменьшится на 0,1 см³, объем белка уменьшится по крайней мере на 1,7 см³. Таким образом, белок сжимается в объеме гораздо больше, чем скорлупа. Поэтому при сжатии белка оболочка (мембрана), окружающая белок, оторвется от внутренней поверхности скорлупы. После этого очистить от скорлупы вареное яйцо не будет проблемой.

Как аккуратно очистить от скорлупы сырое яйцо

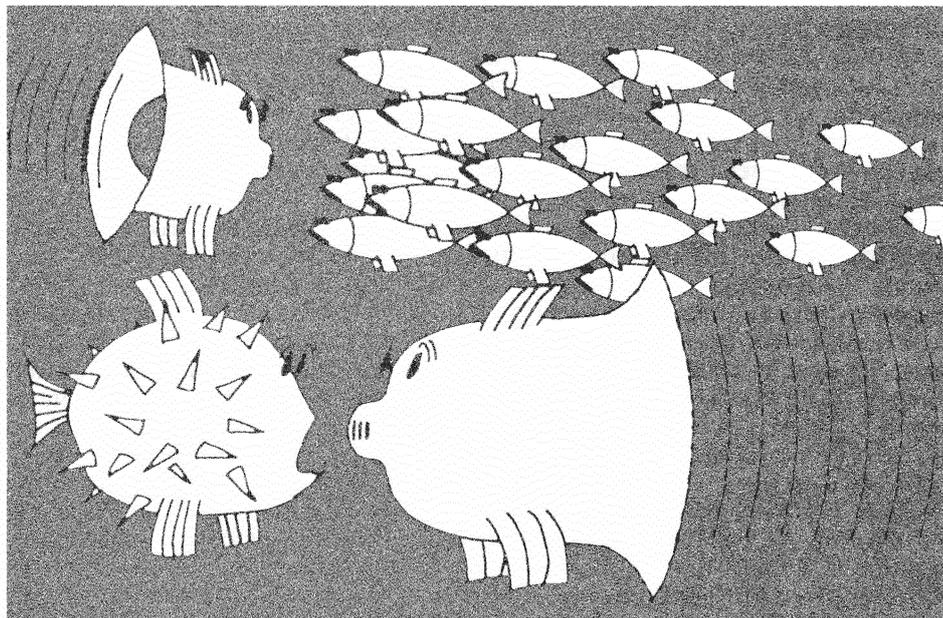
Прежде чем приготовить яичницу, мы разбиваем скорлупу ударом ножа и выливаем содержимое на сковороду. Ну, а если мы хотим изучить, как яйцо устроено внутри, тогда можно попытаться растворить его, например, в уксусе. Если положить яйцо в уксус, то через 24 ч от скорлупы ничего не останется, а все время, пока она будет растворяться, мы будем свидетелями выделения пузырьков углекислого газа. Точно такая же участь ждет и кусочек мела, опущенного в уксус.

Кусок желтого мыла в середине яйца

Значительная часть желтка — это лецитин. У молекулы лецитина один конец полярный (несет электрический заряд), а другой — нейтральный. Такая особенность лецитина позволяет желтку одновременно соединяться с молекулой воды (полярным концом) и молекулой жира или масла (нейтральным концом). В результате кусочки масла отделяются от воды слоем молекул лецитина, и образуется стабильная эмульсия. В отсутствие лецитина частички масла начинают объединяться друг с другом, и, наконец, масло и вода расслаиваются — слой масла будет плавать над слоем воды. Поэтому такие вещества, как лецитин, называют эмульгаторами. Если молекулы лецитина оказываются на поверхности воды, то они могут в несколько раз уменьшить ее поверхностное натяжение. Таким образом, молекулы лецитина очень схожи по своим свойствам с молекулами мыла и шампуня, стеарата натрия, например. А значит, желтком можно вымыть голову, о чем старшее поколение, конечно, помнит. Но если желток в шампуне еще можно заменить на стеарат натрия, то при производстве различных пищевых эмульсий, например, майонеза (смесь воды, растительного масла и уксуса), желток до сих пор остается незаменимым.

Глава 9

Каналы связи в океане безмолвия



Почти вся информация об окружающем мире поступает к человеку в виде волн — электромагнитных (свет) и звуковых. Исключения составляют лишь те сведения, которые мы получаем, вдыхая различные запахи или осяпывая предметы. Высокая скорость распространения электромагнитных волн, возможность распространения в вакууме, а также относительно малый коэффициент поглощения в воздухе сделали эти волны основными источниками информации. Радио, телевидение, мобильная связь и Интернет были бы невозможны без использования электромагнитных волн.

Вода — глушитель электромагнитных волн

К сожалению, как только человек спускается под воду, обо всех преимуществах электромагнитных волн ему можно забыть. Дело в том, что вода очень быстро поглощает электромагнитные волны, и поэтому пользоваться ими для связи уже невозможно. Например, интенсивность красной составляющей света с длиной волны $0,77 \text{ мкм}$, проходя через воду на расстоянии 1 м , ослабляется более чем в 10 раз. Причиной такого сильного поглощения электромагнитных волн в воде служит полярная структура молекул воды. Три атома, из которых состоит молекула (атом кислорода и два атома водорода), образуют равнобедренный треугольник с углом при вершине 105° , где находится атом кислорода. А так как кислород притягивает к себе электроны сильнее, чем водород, то оказывается, что вблизи кислорода их концентра-

ция больше, чем вблизи атомов водорода. Поэтому молекула воды является электрическим диполем с «минусом» около атома кислорода.

Известно, что диполи ориентированы антипараллельно напряженности внешнего электрического поля, минимизируя потенциальную энергию взаимодействия с ним. Ну, а если внешнее поле переменное, то диполи непрерывно вращаются туда-сюда, следуя за изменениями его полярности. Энергия для поддержания таких крутильных колебаний диполей воды переходит от энергии внешнего поля. Крутящиеся под действием внешнего поля молекулы трутся о соседей, и большая часть этой энергии превращается в теплоту. Поэтому энергия электромагнитных колебаний при распространении через воду быстро поглощается, превращаясь в теплоту.

Способность воды превращать энергию электромагнитных волн в теплоту используется в микроволновых (или СВЧ) печах, частота колебаний в которых составляет около 2,45 ГГц (длина волны 12 см). Отметим, что гораздо больше, чем в воде, поглощаются электромагнитные волны в этиленгликоле (антифризе), а также в метиловом и этиловом спиртах. В 1000 раз меньше, чем в воде, поглощаются электромагнитные волны в бензине, молекула которого не является полярной.

Звуководы под водой

Единственным выбором средства связи для человека и животных под водой являются звуковые волны. Изучением распространения звука под водой начали серьезно заниматься во время Второй мировой войны. Одновременно в США и СССР исследовали дальность распространения звуковой волны от подводного взрыва. Оказалось, что, вопреки теоретическим расчетам, звук от взрыва 500-граммовой тротиловой шашки можно зарегистрировать на расстоянии более 3000 км. Объяснить такое малое затухание акустического сигнала можно было, только предполагая, что звуковые колебания каким-то образом фокусируются под водой и далее с минимальными потерями проходят тысячи километров по некоему звуководу.

В результате исследований были созданы целые системы прибрежных и океанских гидроакустических антенн из подводных микрофонов (гидрофонов) с записывающими устройствами на берегу и военных кораблях. Это позволяло слышать шумы подводных лодок, находящихся практически в любой точке Мирового океана, и даже определять их тип по спектру шума. Одновременно оказалось, что в Океане множество других звуков: шумы волн, голоса китов и дельфинов, шумы от извержения подводных вулканов и косяков рыб.

Как происходит фокусировка звука под водой

Что заставляет звук распространяться по звуководу? Из оптики известно, что стеклянная линза фокусирует параллельный пучок света потому, что скорость распространения света в ней меньше, чем в воздухе. Свет может распространяться по световоду на большие расстояния также из-за того, что скорость распространения света в сердцевине волокна меньше, чем в оболочке. Точно так же можно объяснить и существование подводных звуковых каналов. На какой-то глубине в Океане скорость распространения звука минимальна, что и «тянет»

звук на эту глубину. Звук, как и все колебания, «ленив» и всегда ищет путь, чтобы пройти его с минимальной скоростью. Но почему скорость звука в воде не постоянна, и от чего она зависит?

Звук — это распространение волн сжатий и растяжений в среде. Камертон, опущенный в воду, заставит колебаться соседние молекулы воды, а те — свои соседние молекулы и т. д. Так начинаются все звуковые волны. Чем массивнее частица среды, тем тяжелее ее сдвинуть, и тем меньше должна быть скорость распространения звука в этой среде. Следовательно, скорость распространения звука в среде должна быть обратно пропорциональна ее плотности.

Другая характеристика воды, от которой зависит скорость звука — ее сжимаемость. Представьте себе несколько одинаковых шаров на поверхности стола, расположенных на равном расстоянии друг от друга и с центрами на прямой линии. Возьмем шар 1 и толкнем его вдоль этой прямой, чтобы он абсолютно упруго ударился в шар 2 — крайний из покоящихся шаров. Оба столкнувшихся шара начнут деформироваться, и при этом ранее покоящийся шар 2 начнет постепенно ускоряться, а шар 1 замедляться. В конце концов, шар 1 остановится, а шар 2 продолжит путь с той же скоростью к шару 3. Очевидно, что время при передаче скорости от шара 1 к шару 2 равно времени, необходимому для деформации шаров, а последнее будет тем меньше, чем более жесткими будут шары. Значит, скорость распространения волны деформации от шара к шару пропорциональна жесткости материала, из которого эти шары сделаны. То же можно сказать и о звуке, скорость распространения которого должна быть пропорциональна жесткости среды, которая характеризуется модулем Юнга E .

Итак, простые рассуждения привели к выводу, что скорость звука в воде должна быть прямо пропорциональна ее жесткости и обратно пропорциональна ее плотности. Попробуем найти формулу для скорости звука, используя теорию размерностей. Считая, что размерность жесткости $E \left(\frac{\text{кг}}{\text{см}^2} \right)$, плотности $d \left(\frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \right)$, а скорости звука $v \left(\frac{\text{м}}{\text{с}} \right)$, получаем следующую формулу для скорости звука v в воде:

$$v = k \sqrt{\frac{E}{d}}, \quad (9.1)$$

где k — постоянный коэффициент, который нельзя вычислить по теории размерностей. Подставляя в формулу табличные данные ($E = 2,2 \cdot 10^9$ Па; $d = 1000 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$) и считая, что $k = 1$, получаем $v = 1483 \frac{\text{м}}{\text{с}}$, что очень близко к табличной скорости звука в воде для $t = 20$ °С. Это значит, что коэффициент k действительно равен единице, и мы вывели верную формулу.

Ну, а теперь вернемся к зависимости скорости звука от глубины, чтобы ответить на вопрос, почему существует подводный звуковой канал. Сначала подумаем, какие свойства морской воды могут изменяться с глубиной. Первое, что приходит в голову — вода с глубиной становится более холодной. На рисунке 9.1 видно, что в тропических широтах температура воды при погружении резко уменьшается от 23 °С на поверхности Океана до 5 °С на глубине 1,5 км. Это резкое изменение температуры называют термоклин. Его характеристики из-

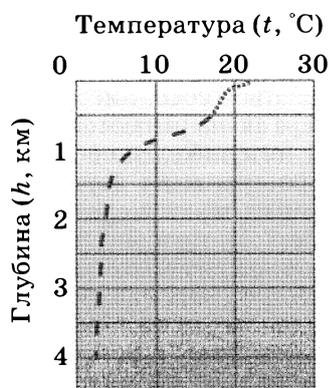


Рис. 9.1. Зависимость температуры океанской воды в тропических широтах от глубины

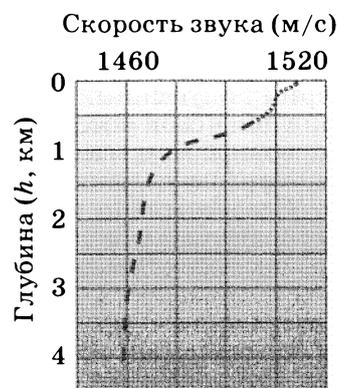


Рис. 9.2. Зависимость скорости звука в океанской воде от глубины с учетом только изменения температуры

меняются в зависимости от сезона, становясь более резкими в жаркую погоду. При дальнейшем погружении температура довольно медленно уменьшается, достигая 2—3 °C на глубине 4,5 км, где остается неизменной круглый год.

Вода при нагревании расширяется, а ее плотность уменьшается. Так как уменьшение плотности должно приводить к увеличению скорости звука (около 3 м/с при нагревании на 1 °C), то это значит, что вблизи поверхности Океана скорость звука должна быть максимальна, если на нее не действуют еще какие-либо факторы (рис. 9.2).

Однако с глубиной не только понижается температура морской воды, но и увеличивается ее давление. Увеличение давления делает воду более жесткой, а это значит, что модуль Юнга и скорость звука с глубиной должны увеличиваться. Если бы увеличение давления с глубиной было единственным фактором, изменяющим скорость звука, то эта скорость линейно росла бы с глубиной (15 м/с на 1 км погружения) так, как это изображено на рисунке 9.3.

Учитывая сразу оба фактора — температуру и давление, можно получить реальную зависимость скорости звука от глубины (рис. 9.4), «перемножая» кривые, показанные на рисунках 9.2 и 9.3. Видно, что реальная зависимость скорости звука имеет минимум на глубине около 1 км. Очевидно, что первоначальное уменьшение скорости звука с глубиной связано с резким уменьшением температуры (термоклинном), а последующее увеличение скорости звука при погружении — с ростом давления при практически постоянной температуре воды.

Постепенное увеличение солености воды с глубиной (на поверхности соленость воды 3,4%, а вблизи дна — 3,5%) вносит незначительный вклад в зависимость скорости звука от глубины далеко от берега. Однако вблизи берега, где соленость воды (а вместе с ней и ее плотность) может изменяться в широких пределах из-за впадения пресноводных рек, положение минимума скорости зависит также и от этого фактора.

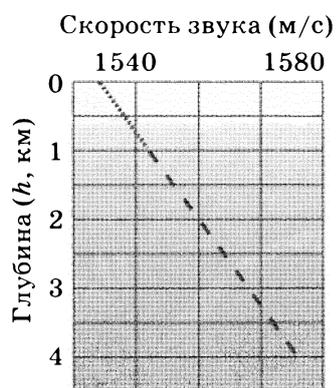


Рис. 9.3. Изменение скорости звука в океанской воде с глубиной с учетом только роста давления с глубиной

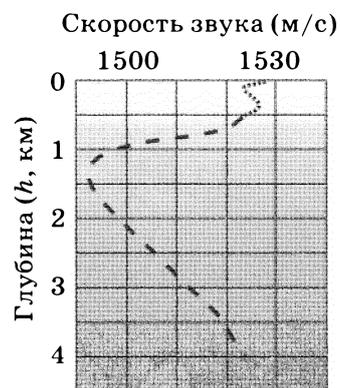
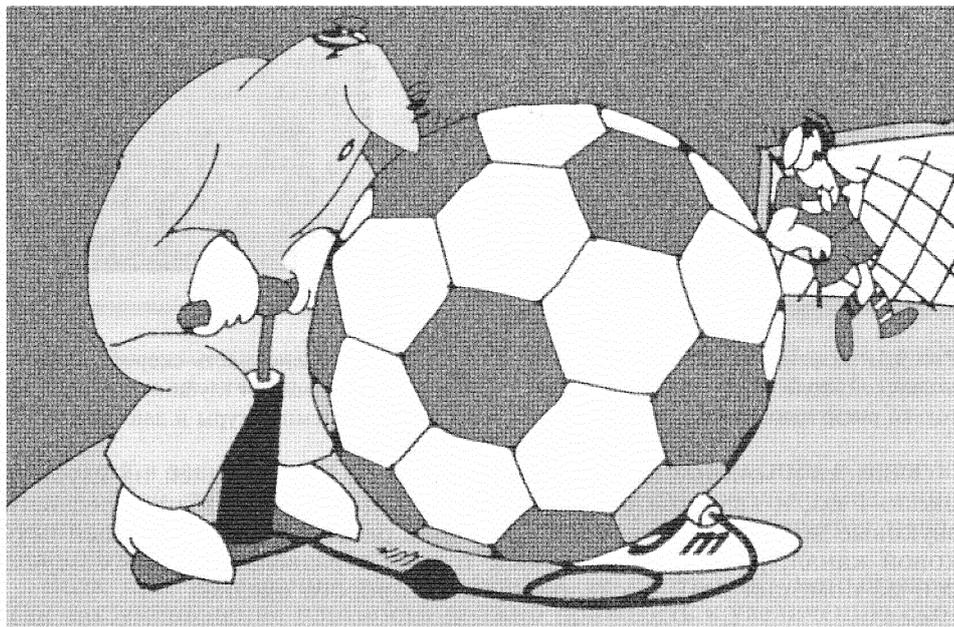


Рис. 9.4. Зависимость скорости звука в океанской воде от глубины с учетом изменений температуры и давления

Область с минимальной скоростью звука, находящаяся на глубине около 1 км, и является тем звуководом, который способен передавать звуковые волны на тысячекilометровые расстояния. Подводный звуковой канал, ранее используемый только в разведывательных целях, сейчас помогает всем исследователям Мирового океана.

Глава 10

Волна, дающая жизнь



*Сердце... сжимаясь и расширяясь поочередно
для выгона и принятия крови,
рождает пульс, или бой,
отзывающийся во всех
боевых жилах тела.*

В. И. Даль. Толковый словарь

Наше сердце — это насос, работающий в импульсном режиме с частотой около 1 Гц. Во время каждого импульса, длящегося примерно 0,25 с, сердце взрослого человека успевает вытолкнуть в аорту около 0,1 дм³ (0,1 л) крови. Кровь из аорты попадает в более узкие сосуды — артерии, доставляющие кровь на периферию.

Движение крови по сосудам — процесс довольно сложный. Стенки аорты, как и всех артерий, обладают высокой эластичностью: их модуль Юнга в 10⁵ раз меньше модуля Юнга металлов. Поэтому, когда кровь поступает в аорту, ее стенки начинают расширяться, и расширяются до тех пор, пока приток крови не прекратится. После этого силы упругости растянутых стенок аорты, стремясь вернуть их к первоначальным размерам, выжимают кровь в более отдаленный от сердца участок артерии (обратному движению крови препятствует аортальный клапан сердца). Этот участок артерии растягивается, и все повторяется сначала. Если регистрировать деформацию стенок артерии

одновременно в двух равноудаленных от сердца точках, то окажется, что максимальных значений эта деформация достигает в разные моменты времени. И чем дальше от сердца расположена точка регистрации, тем позже деформация сосуда в данной точке достигнет своего максимума.

Таким образом, после каждого сокращения сердца вдоль артерии в направлении от сердца к периферии пробегает волна деформации, подобно тому как распространяются волны по натянутой струне или на поверхности воды от брошенного камня. И если на артерию, находящуюся вблизи поверхности тела (например, у запястья), положить палец, то он будет ощущать эти волны в виде толчков (пульса), о которых так красочно сказал В. И. Даль.

Здесь следует отметить, что скорость распространения волны деформации кровеносного сосуда может значительно отличаться от скорости распространения волны сжатия в крови. Последняя, очевидно, равна скорости распространения звука и составляет несколько сотен метров в секунду, тогда как волны деформации проходят за секунду не более нескольких метров.

Пульс на все времена!

Первые упоминания об измерении пульса у человека датируются третьим тысячелетием до н. э., когда китайский император Хоам-Ту с придворным врачом Ли-Пе использовали регистрацию пульса для постановки диагноза. Учение о пульсе стало одним из основных достижений диагностики в Древнем Китае. Их концепция, выработанная в результате многолетних наблюдений за сердечным пульсом, заключалась в том, что все процессы в организме так или иначе должны влиять на форму пульсовой волны. Они изучали пульс не в одной точке на запястье (как делают сейчас), а в нескольких. Иногда число таких точек достигало десяти. Китайские врачи различали 28 типов пульса: поверхностный, глубокий, редкий, частый, тонкий, чрезмерный, свободный, вязкий, напряженный и т. д. За тысячи лет до того, как была научно обоснована теория кровообращения, они считали, что именно пульс обуславливает круговорот крови. Простота измерения пульса (не нужно никаких приборов, кроме секундомера) делает его одним из основных показателей состояния здоровья и в настоящее время.

Пульс — волна деформации

Распространяющаяся вдоль артерии волна деформации ее стенок получила название пульсовой волны. Измерить скорость распространения пульсовой волны удалось лишь в начале XX в., и значение этой скорости, как правило, равно от 3 до 15 м/с, что в десятки раз превышает среднюю скорость движения крови по кровеносным сосудам. Оценить скорость распространения пульсовой волны можно, одновременно измеряя моменты прихода волны на сонной и бедренной артериях. Так как сонная артерия расположена приблизительно на 70 см ближе к сердцу, чем бедренная, то пульсовая волна к месту регистрации под подбородком будет приходить раньше, чем под коленом, где хорошо прощупывается пульс бедренной артерии. Чем меньше интер-

вал между моментами прихода волны в эти точки, тем больше скорость распространения пульсовой волны.

Оказалось, что скорость распространения пульсовой волны зависит от упругости артериальных стенок и поэтому может служить показателем ее состояния при различных заболеваниях. Так, при гипертонии и атеросклерозе стенки артерий теряют эластичность и становятся очень жесткими, что проявляется в резком увеличении скорости распространения пульсовой волны. Почему скорость распространения пульсовой волны так сильно зависит от эластичности стенок артерий? Чтобы ответить на этот вопрос, рассмотрим подробнее процесс распространения пульсовой волны и попробуем найти математическое выражение для ее скорости.

Выводим формулу для скорости пульсовой волны



Рис. 10.1. Схематическое изображение участка артерии

Пусть артерия с внешним диаметром d представляет собой достаточно длинный (чтобы можно было пренебречь граничными условиями) цилиндр со стенками толщиной h и модулем упругости Юнга E (рис. 10.1).

Предположим, что давление p крови в точке, удаленной на расстояние x_0 от сердца, изменяется во времени так, как это изображено на рисунке 10.2, где θ — скорость распространения пульсовой волны. Если считать, что пульсовая волна движется вдоль сосуда без затухания со скоростью θ , то распределение давления по его длине будет иметь вид, изображенный на рисунке 10.3. На рисунке видно, что кровь в данной точке артерии будет двигаться только тогда, когда через эту точку пройдет пульсовая волна. Действительно, такое импульсное движение крови происходит в крупных артериях, отходящих от сердца, где затуханием пульсовой волны можно пренебречь. Распространение пульсовой волны в таких сосудах мы и рассмотрим.

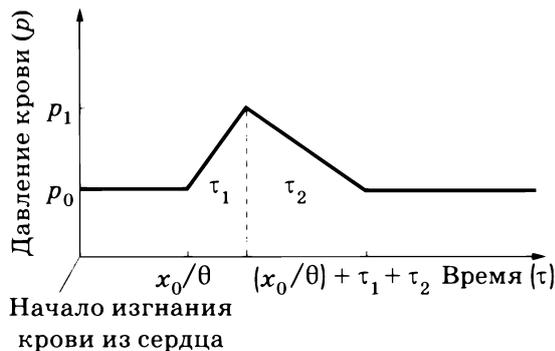


Рис. 10.2. Постулируемое в модели изменение давления крови в точке артерии, отстоящей на расстоянии x_0 от сердца

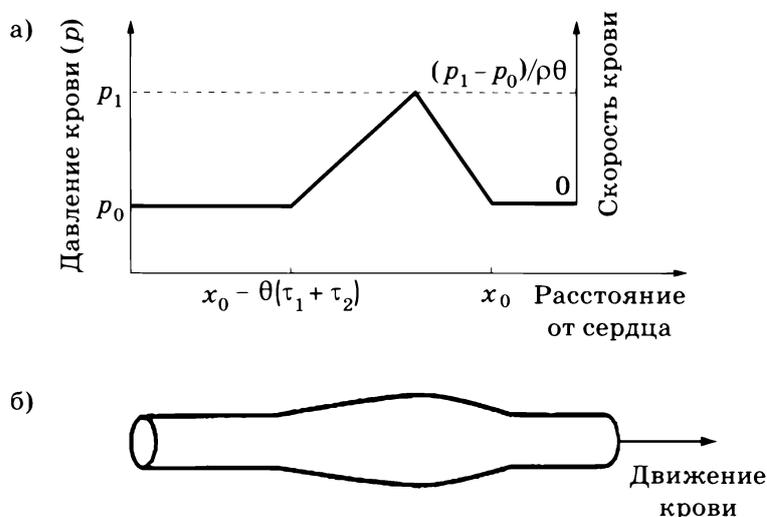


Рис. 10.3. а) Распределение давления и скорости крови вдоль артерии спустя x_0/θ после начала изгнания крови из сердца в аорту; б) схематическое изображение расширения артерии при распространении пульсовой волны

В момент времени $\frac{x_0}{\theta}$, отсчитываемый от начала сокращения сердца, на массу крови, находящуюся между поперечными сечениями $x_0 - \theta\tau_1$ и x_0 вдоль оси артерии, будет действовать сила, равная разности сил давления, приложенных к этим поперечным сечениям: $\frac{(p_1 - p_0)\pi d^2}{4}$. Так как масса крови между сечениями равна $\frac{\rho\theta\tau_1\pi d^2}{4}$, то из второго закона Ньютона можно получить ускорение этой массы крови $a_+ = \frac{(p_1 - p_0)}{\rho\theta\tau_1}$, где ρ — плотность крови.

Если пренебречь скоростью движения крови, малой по сравнению со скоростью распространения пульсовой волны (см. ранее), то масса крови вблизи точки x_0 в течение времени τ_1 будет двигаться с ускорением a_+ , после чего движение крови начнет замедляться, а соответствующее отрицательное ускорение a_- станет равным $\frac{-(p_1 - p_0)}{\rho\theta\tau_2}$.

В результате за интервал времени τ_1 , когда давление в точке x_0 росло, скорость крови, находящейся в этой области, увеличилась с нуля до $a_+\tau_1$. За следующий отрезок времени скорость крови в данной точке уменьшилась на $\frac{(p_1 - p_0)}{\rho\theta}$ и стала равной нулю. Поэтому распределение

скорости вдоль сосуда в момент времени $\frac{x_0}{\theta}$ будет иметь вид, изображенный на рисунке 10.3 (правая шкала).

Почему объем крови между сечениями $x_0 - \theta(\tau_1 + \tau_2)$ и x_0 в интервале времени между $\frac{x_0}{\theta} - \tau_1 - \tau_2$ и $\frac{x_0}{\theta}$ увеличивается? Очевидно, потому, что количество крови, притекающей в этот участок артерии слева, превышает количество оттекающей крови. В нашем случае скорость крови, оттекающей из участка артерии, в течение этого интервала времени была равна нулю. В то же время скорость притекающей крови всегда была отлична от нуля, а ее среднее значение за этот интервал времени составило $\frac{(p_1 - p_0)}{2\rho\theta}$. Таким образом, в течение интервала времени $\tau_1 + \tau_2$ скорость притока крови в вышеуказанный участок артерии превышает скорость оттока в среднем на $\frac{(p_1 - p_0)}{2\rho\theta}$.

Так как кровь практически несжимаема, то происходящее увеличение объема ΔV можно получить, умножив превышение скорости притока над скоростью оттока на площадь поперечного сечения сосуда и интервал времени:

$$\Delta V = \frac{\pi d^2 (\tau_1 + \tau_2) (p_1 - p_0)}{8\rho\theta}. \quad (10.1)$$

С другой стороны, если считать, что диаметр расширенного участка артерии увеличился в среднем на Δd по сравнению с остальной ее частью, то, пренебрегая $(\Delta d)^2$ по сравнению с $d\Delta d$, имеем

$$\Delta V = \frac{\pi\theta d\Delta d (\tau_1 + \tau_2)}{2}. \quad (10.2)$$

Приравнивая выражения (10.2) и (10.1), получаем скорость распространения пульсовой волны:

$$4\rho\theta^2 = \frac{(p_1 - p_0)}{\left(\frac{\Delta d}{d}\right)}. \quad (10.3)$$

В выражение (10.3), полученное нами из законов кинематики и динамики движения крови по сосуду, входят относительная деформация стенок сосуда $\frac{\Delta d}{d}$ и увеличение давления крови в нем $(p_1 - p_0)$. Отношение этих двух величин можно найти с помощью закона Гука, связывающего относительную деформацию материала с силой, вызывающей эту деформацию. Сделав это, получаем окончательное выражение для скорости распространения пульсовой волны:

$$\theta^2 = \frac{Eh}{\rho d}. \quad (10.4)$$

Подстановка числовых значений $\left(\frac{h}{d} = 0,1, E = 10^6 \text{ Н/м}^2 \text{ и } \rho = 10^3 \text{ кг/м}^3\right)$ в выражение (10.4) дает значение $\theta \approx 10 \text{ м/с}$, близкое к среднему экспериментально измеренному значению скорости распространения пульсовой волны. Анатомические исследования показывают, что величина $\frac{h}{d}$ мало изменяется и практически не зависит от типа

артерии. Поэтому, учитывая постоянство $\frac{h}{d}$, можно считать, что скорость пульсовой волны изменяется только при изменении упругости стенок артерии, ее модуля Юнга.

Скорость пульсовой волны и гипертония

С возрастом, а также при заболеваниях, сопровождающихся значительным увеличением модуля Юнга E стенок артерий (гипертонии, атеросклерозе), скорость θ может увеличиваться почти в 2–3 раза по сравнению с нормой (табл. 10.1). Это позволяет использовать измерение скорости распространения пульсовой волны при постановке диагноза.

Зависимость скорости распространения пульсовой волны по грудному отделу аорты человека от возраста и давления крови (м/с)

Таблица 10.1

Возраст	Среднее давление крови, мм рт. ст.			
	50	100	150	200
20–24	3,3	3,6	4,5	5,7
36–42	3,5	4,9	6,7	8,9
71–78	4,6	7,6	11,1	14,7

Томас Юнг: физик и врач

Интересно, что впервые формула (10.4) для скорости распространения пульсовых волн в артериях была выведена английским ученым Томасом Юнгом в 1809 г. Т. Юнга мы знаем главным образом как создателя волновой теории света, а еще потому, что его именем назван модуль упругости материалов. Юнг был также автором классических работ по теории кровообращения, в том числе и работ по распространению пульсовых волн в артериях. Это была поистине незаурядная личность. Уже в двухлетнем возрасте он умел читать, а к 14 годам в совершенстве владел десятью языками, играл чуть ли не на всех музыкальных инструментах и владел навыками циркового артиста. Всю жизнь он совмещал две профессии: практикующего врача и физика.

Отражение пульсовых волн

Как и все волны, пульсовые волны в артериях обладают способностью отражаться от тех мест, где условия их распространения изменяются. Такими местами для пульсовых волн являются области разветвления артерий (рис. 10.4). Отраженная от места ветвления волна складывается с первичной, и в результате кривая изменения давления крови в сосуде становится двугорбой (рис. 10.4, б). По интервалу между максимумами на кривой давления и известной скорости распро-

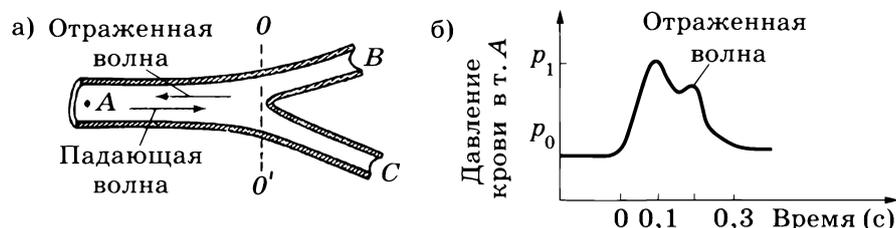


Рис. 10.4. Возникновение отраженной пульсовой волны в месте разветвления артерии: а) разрез ветвящейся артерии; б) изменение артериального давления при наличии отраженной волны

странения пульсовой волны можно оценить расстояние, на котором находится место ветвления от точки регистрации давления. Иногда кривая изменения давления в кровеносном сосуде имеет больше двух максимумов, что указывает на множественный характер отражения пульсовой волны.

Отраженная пульсовая волна, так же как и первичная, сопровождается деформацией артериальных стенок. Но если энергия упругой деформации стенок, вызванная распространением первичной волны, потом переходит в кинетическую энергию движения крови от сердца к периферии, то отраженная волна препятствует нормальному движению крови. Поэтому отражение пульсовых волн затрудняет нормальную работу нашей системы кровообращения.

От чего зависит амплитуда отраженной пульсовой волны

Пусть пульсовая волна встречает на своем пути разветвление, сходное с изображенным на рисунке 10.4, а. Тогда изменение давления Δp в месте ветвления должно быть равно сумме давлений, создаваемых падающей $\Delta p_{\text{пад}}$ и отраженной $\Delta p_{\text{отр}}$ волнами, т. е.

$$\Delta p_{\text{пад}} + \Delta p_{\text{отр}} = \Delta p. \quad (10.5)$$

Очевидно, что масса крови, притекающей к месту ветвления с пульсовой волной, должна быть равна сумме масс, оттекающих с пульсовыми волнами по артериям B и C . (Далее рассматривается только перенос крови пульсовой волной, т. е. не учитывается постоянная составляющая скорости движения крови, значение которой никак не влияет на процесс отражения пульсовой волны.) Тогда можно записать, что

$$m_{\text{пад}} - m_{\text{отр}} = m_B + m_C, \quad (10.6)$$

где $m_{\text{пад}}$ и $m_{\text{отр}}$ — массы крови, переносимые в единицу времени через сечение OO' артерии A падающей и отраженной волнами соответственно; m_B и m_C — скорости массопереноса крови пульсовой волной в начале артерий B и C соответственно.

Как было нами показано ранее (см. рис. 10.3), изменение скорости крови Δv во время пульсовой волны равно

$$\Delta v = \frac{\Delta p}{\rho \theta}, \quad (10.7)$$

где Δp — изменение давления при распространении пульсовой волны. Следовательно, для массы крови m , переносимой пульсовой волной в единицу времени через поперечное сечение сосуда S , получаем

$$m = \Delta v S \rho. \quad (10.8)$$

Учитывая формулы (10.7) и (10.8), можно переписать равенство (10.6) в виде

$$\frac{(\Delta p_{\text{пад}} - \Delta p_{\text{отр}}) S_A}{\theta_A} = \Delta p \left(\frac{S_B}{\theta_B} + \frac{S_C}{\theta_C} \right), \quad (10.9)$$

где $\theta_A, \theta_B, \theta_C$ — скорости пульсовой волны по артериям A, B и C , а S_A, S_B и S_C — площади поперечного сечения этих артерий. Решая уравнения (10.5) и (10.9), получим

$$\Delta p_{\text{отр}} \left(\frac{S_A}{\theta_A} + \frac{S_B}{\theta_B} + \frac{S_C}{\theta_C} \right) = \Delta p_{\text{пад}} \left(\frac{S_A}{\theta_A} - \frac{S_B}{\theta_B} - \frac{S_C}{\theta_C} \right), \quad (10.10)$$

откуда можно заключить, что отраженная волна отсутствует, если множитель в скобках в правой части (10.10) равен нулю. Если считать, что скорость распространения пульсовой волны не изменяется после ветвления, так как $\frac{h}{d}$ и E остаются неизменными, то отраженная волна будет отсутствовать при

$$S_A = S_B + S_C. \quad (10.11)$$

Следует отметить, что большая часть разветвлений крупных артерий в той или иной степени удовлетворяет равенству (10.11), которое требует постоянства площади поперечного сечения кровеносного русла до и после ветвления. Однако в некоторых случаях этого равенства нет, и мы сейчас увидим, к чему это приводит.

Аневризма

После каждого сокращения сердца в аорте увеличивается давление крови¹, стенки ее растягиваются, и по ним распространяется пульсовая волна. Это ритмическое растяжение стенок повторяется около 100 000 раз в день и приблизительно 2,5 млрд раз в течение всей жизни. В принципе структура стенок аорты способна противостоять этим ритмическим гидравлическим ударам. Иногда, однако, стенки аорты не выдерживают и начинают расширяться, образуя аневризму. Однажды начавшись, расширение имеет тенденцию увеличиваться все больше, и наконец аневризма разрывается, что приводит к смерти.

¹ Под давлением крови здесь и далее подразумевается разность между истинным ее давлением и атмосферным давлением. Именно эта разность и расширяет кровеносные сосуды, давая возможность крови протекать через них.

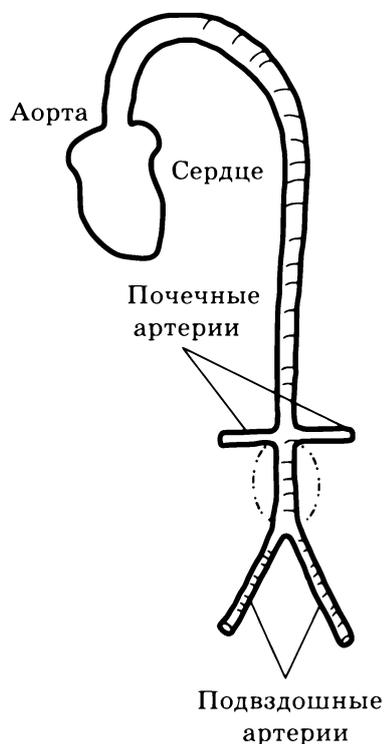


Рис. 10.5. Место возникновения аневризмы аорты (обозначено штриховыми линиями)

Обычное место возникновения аневризмы — брюшная часть аорты, чуть выше ее разветвления (рис. 10.5). Считается, что аневризма возникает в области отражения пульсовой волны от места разветвления аорты. Как было показано выше [см. выражение (10.10)], амплитуда отраженной волны пропорциональна разности между площадями поперечного сечения сосуда до ветвления и суммарного сечения после ветвления. С возрастом эта разность увеличивается из-за сужения периферических артерий и амплитуда отраженной пульсовой волны возрастает, что приводит к большему растяжению аорты.

Аневризма и закон Лапласа

Рост аневризмы — это проявление закона Лапласа, французского астронома и математика, открывшего зависимость между напряжением T , растягивающим стенки кровеносного сосуда (отношение силы к площади продольного сечения стенок сосуда), его радиусом R , давлением внутри сосуда p и толщиной его стенок h :

$$T = \frac{pR}{h}. \quad (10.12)$$

Чаще пользуются другой записью закона Лапласа, в левой части которой стоит произведение Th , численно равное силе, растягивающей стенки сосуда и приложенной к единице его длины. В этих случаях, полагая $Th = T'$, имеем следующую форму записи закона Лапласа:

$$T' = pR. \quad (10.13)$$

Из закона Лапласа (10.12) следует, что при увеличении p должно увеличиваться и T , что приводит к растяжению стенок сосуда и увеличению их радиуса R . Но так как объем стенок аорты можно считать постоянным, то увеличение радиуса аорты должно сопровождаться утончением ее стенок. Поэтому при увеличении p отношение $\frac{R}{h}$ тоже должно увеличиться, что приведет к еще большему увеличению T , и т. д. Таким образом, любое повышение артериального давления, казалось бы, должно вызывать разрыв аневризмы. Почему же на самом деле это происходит в очень редких случаях и, как правило, только в пожилом возрасте?

Эластин, коллаген и аневризма

Причина возникновения аневризмы — не только возросшая амплитуда артериального давления, но и изменение механических свойств артериальных стенок. У человека внутренний диаметр аорты около 2,5 см, а толщина стенок 2 мм. Стенки аорты состоят из клеток, содержащих два основных типа упругих материалов — эластин и коллаген.

В нерастянутых стенках сосуда коллагеновые волокна до конца не распрямлены. Поэтому при малых деформациях упругость стенок аорты определяет легко растяжимый эластин. При больших деформациях механические свойства стенок аорты определяет коллаген, который обладает гораздо большей жесткостью, чем эластин. Поэтому для молодых людей зависимость радиуса аорты от напряжения T' , растягивающего ее стенки, может быть аппроксимирована двумя отрезками сплошных линий (рис. 10.6). В пожилом возрасте свойства коллагена изменяются, он становится менее жестким, а стенки аорты — легко-растяжимыми (штриховая линия на рисунке 10.6).

Зная упругие характеристики стенок аорты и закон Лапласа, можно найти изменение радиуса сосуда при изменении давления крови в нем. Так как значение p должно соответствовать уравнению Лапласа (10.13) и упругости стенок аорты, то при каждом значении p можно получить соответствующее значение R , если найти ординату точки пересечения сплошной (или штриховой) линии (см. рис. 10.6) со штриховой прямой.

При увеличении p наклон штриховой прямой, описывающей закон Лапласа, уменьшается и приближается к наклону коллагенового участка сплошной линии. Когда они становятся равными, точка пересечения прямых отсутствует, что соответствует лавинообразному увеличению R и разрыву аневризмы. У молодых людей такой наклон штриховой прямой может быть при давлении около 130 кПа (1000 мм рт. ст.), которое в 6—8 раз превышает их действительное артериальное давление. У пожилых людей жесткость стенок аорты может уменьшаться почти в 5 раз, а артериальное давление увеличиваться до 26 кПа (200 мм рт. ст.), что делает возникновение и разрыв аневризмы более реальным.

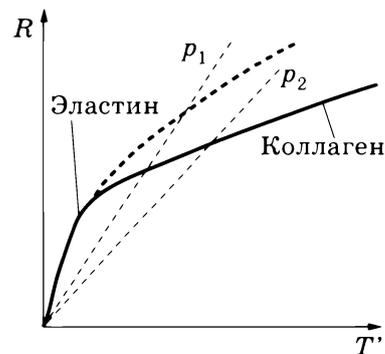
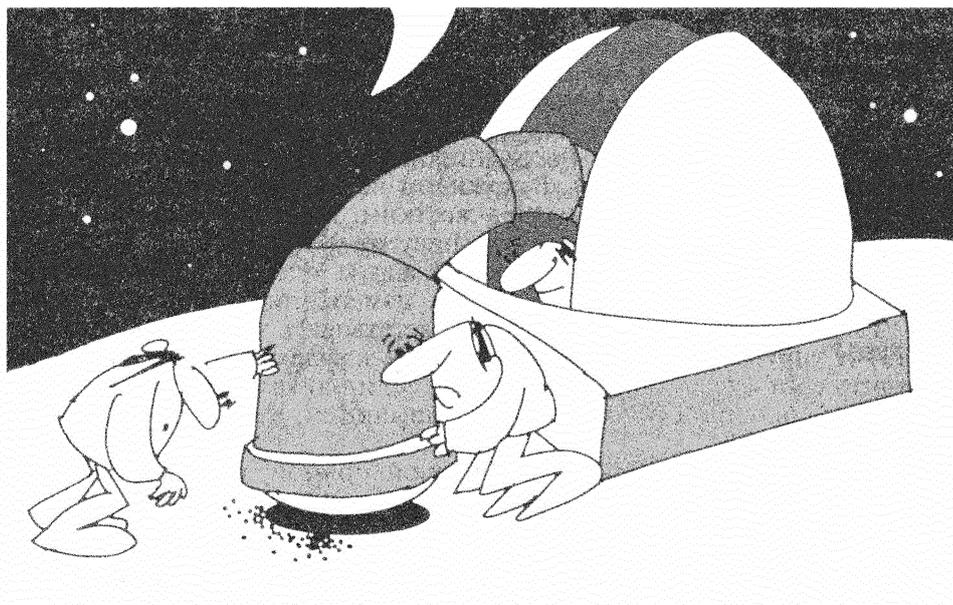


Рис. 10.6. Зависимость радиуса аорты от напряжения, растягивающего ее стенки, для молодых (сплошная линия) и пожилых (штриховая линия) людей. Штриховые линии — закон Лапласа для малого (p_1) и большого (p_2) артериального давления

Глава 11

Как заглянуть в глубь Земли (сейсмические волны)



Кажущаяся незыблемой земная твердь скрывает под собой бурные процессы, начавшиеся около 4,5 млрд лет тому назад. Колоссальная энергия, заключенная в недрах планеты, проявляется в извержениях вулканов и землетрясениях, связанных с так называемыми тектоническими движениями — непрерывным перемещением блоков земной коры (тектонических плит), несущих на себе океаны и континенты. Движение тектонических плит относительно друг друга вызывает землетрясения, когда до этого сжатый или изогнутый огромный массив каменной породы вдруг распрямляется, совершая при этом колебания. Колебания каменного массива, несущие в себе огромную энергию, дают начало сейсмическим волнам, которые можно зарегистрировать в любой точке планеты.

Чтобы представить себе энергию, освобождающуюся при одном землетрясении, сравним ее с энергией всех видов, потребляемой людьми на планете в течение года ($4 \cdot 10^{20}$ Дж). Например, землетрясение, произошедшее 26 декабря 2004 г. в Индийском океане около берегов Индонезии и имевшее магнитуду 9 баллов по шкале Рихтера, было эквивалентно мгновенному освобождению энергии $2 \cdot 10^{18}$ Дж, что почти равно двухдневному энергетическому «рациону» всех жителей Земли.

Виды сейсмических волн и способы их распространения

Существуют несколько типов сейсмических волн, различающихся по виду деформации среды, сопровождающей их распространение. В твердой среде могут распространяться волны трех типов: соответствующие изменению объема элемента среды, изменению его формы и поверхностные (рис. 11.1). Волны первого типа — *P*-волны (от англ. *primary* — первичный) называют продольными или волнами сжатия и растяжения. При землетрясении они приходят первыми, так как распространяются с огромной скоростью — около 6,5 км/с. Волны второго типа — *S*-волны (от англ. *secondary* — вторичный), распространение которых связано с изменением формы элемента среды, называют поперечными. Скорость распространения *S*-волн составляет около 4,5 км/с, поэтому *S*-волны всегда приходят после *P*-волн. Обычно скорость *S*-волн составляет 70% от скорости *P*-волн. В жидкостях *S*-волны распространяться не могут, так как упругой деформации, сдвигающей один слой жидкости относительно другого, там быть не может — слои просто «потекут».

По поверхности Земли, а также вдоль поверхностей раздела сред внутри планеты могут распространяться так называемые поверхностные волны, очень похожие на обычные волны на поверхности воды. Скорость распространения поверхностных волн самая маленькая (меньше 4 км/с) среди сейсмических волн, и поэтому они всегда приходят последними, но зато их амплитуда самая большая (рис. 11.2).

Амплитуда сейсмических волн постепенно уменьшается при удалении от эпицентра землетрясения. Например, землетрясение в Калифорнии (6,7 балла), произошедшее в 1994 г., вызвало колебания почвы с амплитудой около 1 мм в г. Альбукерке (США, 10°, или 1110 км, от эпицентра), а почти через 7 мин сейсмические волны дошли до

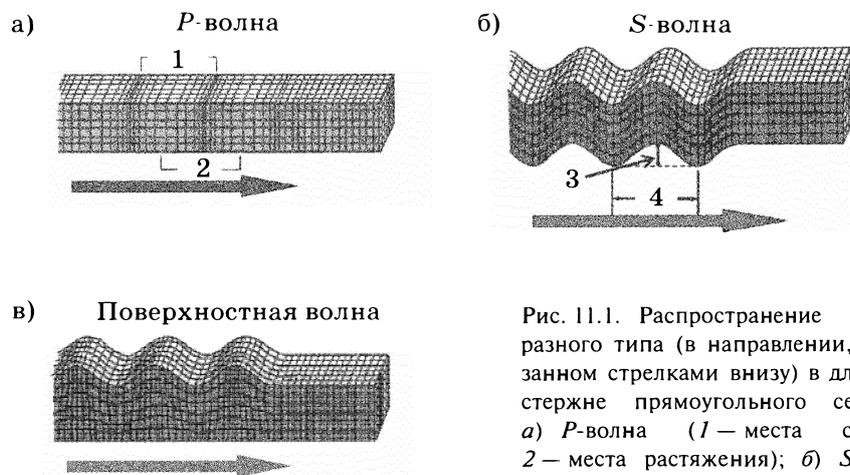


Рис. 11.1. Распространение волн разного типа (в направлении, показанном стрелками внизу) в длинном стержне прямоугольного сечения: а) *P*-волна (1 — места сжатия, 2 — места растяжения); б) *S*-волна (3 — амплитуда волны, 4 — длина волны); в) поверхностная волна

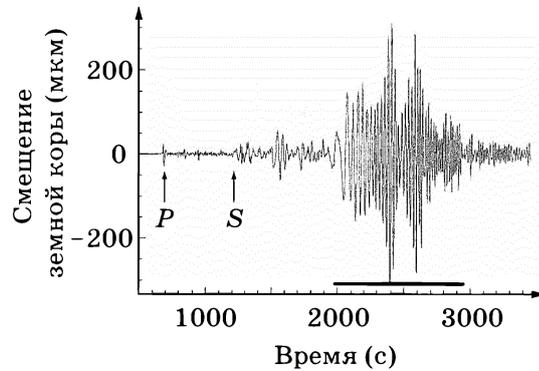


Рис. 11.2. Зарегистрированная в Финляндии сейсмограмма землетрясения магнитудой 7,1 балла по шкале Рихтера, произошедшего в 1989 г в Калифорнии. Моменты прихода волн обозначены стрелками. Место регистрации отстоит от эпицентра землетрясения на 71° (по дуге большого круга, $1^\circ = 111$ км). Отрезком жирной прямой выделены поверхностные волны, имеющие огромную амплитуду

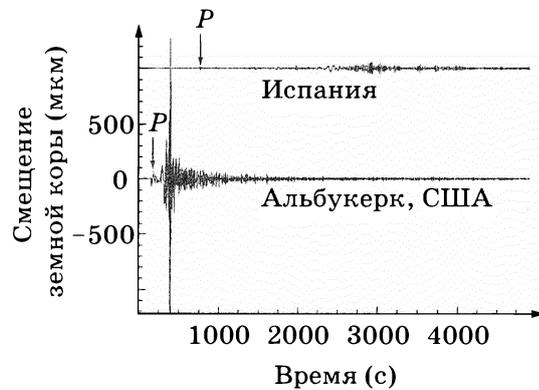


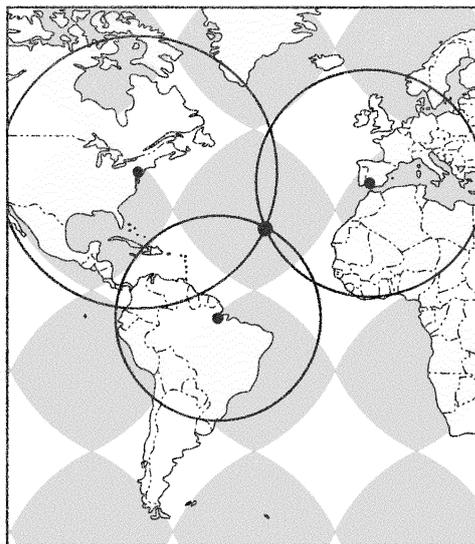
Рис. 11.3. Сейсмограммы землетрясения в Калифорнии в 1994 г.: нижняя кривая зарегистрирована на расстоянии 1110 км от эпицентра; верхняя кривая зарегистрирована в Испании. На обеих сейсмограммах отмечены моменты прихода P -волн

Испании, отстоящей от эпицентра на 85° , где их амплитуда колебаний составила только 50 мкм (рис. 11.3).

Как определяют место, где произошло землетрясение

По сейсмограмме можно определить, на каком расстоянии от эпицентра она зарегистрирована. Для этого надо измерить интервал между приходом P - и S -волн, а потом решить простую задачу по кинематике: два тела из одной точки одновременно начинают прямолинейное движение в одном направлении с разными скоростями — v (P -волна) и $0,7v$ (S -волна). Далее известно, что в город N быстрое тело (P -волна) прибыло на t с раньше, чем медленное. На каком расстоянии L от начала движения находится город N ? Легко показать, что $L = \frac{7}{3}vt$.

Рис. 11.4. Метод локализации места землетрясения. Три точки отмечено положение сейсмических станций в США, Бразилии и Испании, а место пересечения окружностей с радиусами, равными расстояниям до эпицентра, определяет его координаты на карте где-то в середине Атлантического океана

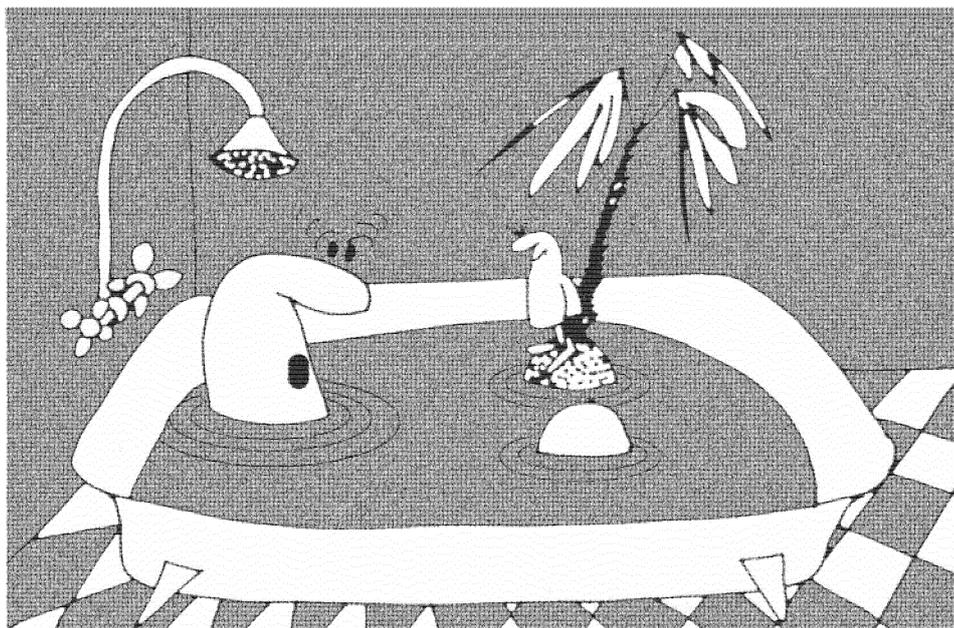


Посмотрим на рисунок 11.2, где показана сейсмограмма, в которой интервал между P - и S -волнами составляет 520 с. Подставляя $v = 6,5$ км/с, получаем $L = 7900$ км, что действительно равно расстоянию между Калифорнией, где произошло землетрясение, и Финляндией, где оно было зарегистрировано.

Однако определить расстояние L до эпицентра недостаточно для его локализации. Можно лишь сказать, что эпицентр землетрясения находится где-то на окружности радиусом L с центром в точке регистрации нашей сейсмограммы. Но если момент землетрясения зарегистрируют по крайней мере еще две сейсмические станции и в каждой из них измерят соответствующие расстояния до его эпицентра, то три окружности, проведенные из мест на географической карте, где велись наблюдения, пересекутся в одной точке — эпицентре землетрясения (рис. 11.4).

Глава 12

Как плавать по законам физики



Если спросить человека, как он плавает, то, по-видимому, следует ожидать два варианта ответа. В первом случае человек начнет объяснять, каким стилем и как быстро преодолевает водные преграды. Во втором — скажет, что садится в лодку, катер или на корабль. Вряд ли среди опрашиваемых найдется человек, который после вопроса станет объяснять физические основы способности держаться на воде или вычислять коэффициент полезного действия гребцов в лодке. Попробуем сыграть роль такого человека — теоретика плавания и ответить на несколько вопросов, касающихся физической теории плавания.

Почему мы сразу не тонем

Умеющих хорошо плавать такая форма вопроса обидит. Однако установлено, что человек, оставшийся один на один с водной стихией далеко от берега, рано или поздно все равно утонет. Объясняют это тем, что у несчастного кончаются силы и он перестает выполнять плавательные движения, за счет которых держится на поверхности воды.

Как это ни обидно, но даже самые умные из нас примерно на 70% состоят из обычной воды. Поэтому бытующее в народе мнение, что если человека сильно ударить, то от него одно мокрое место останется, имеет под собой вполне научную основу. Таблица 12.1 показывает, из чего мы состоим и какова плотность этих составляющих организма.

Плотность различных тканей человека

Таблица 12.1

	Отношение массы ткани к массе тела, %	Плотность ткани, 1000 кг/м ³
Мышцы	43	1,04
Жир	14	0,92
Кости	10	1,90
Кровь	8	1,04

Большую часть тела человека составляют мышцы. Так как их плотность больше, чем плотность воды, то при плавании они должны тянуть на дно. Еще больше, как следует из таблицы 12.1, тянут на дно кости. Кажется, что только жировая прослойка может спасти от быстрой гибели. Однако это не совсем верно.

Внутри каждого человека есть воздушный мешок — легкие. Объем воздуха в легких человека может изменяться от 1 л при глубоком выдохе до 6 л при глубоком вдохе. Так как плотность воздуха приблизительно в 800 раз меньше, чем плотность воды, то каждый литр воздуха в легких по закону Архимеда создает подъемную силу около 9,8 Н. Соответственно плотность тела человека $\rho_{\text{ч}}$ изменяется от 940—990 кг/м³ при полном выдохе до 1010—1070 кг/м³ при полном вдохе.

Голова — всему помеха

Оценивая плавучесть человека, необходимо учитывать, что голова человека, объем которой составляет около 7% объема тела, всегда должна находиться над поверхностью воды. Пусть человек в воде занимает вертикальное положение. Легко показать, что в таком случае будет справедлива следующая формула для отношения абсолютных значений архимедовой силы F_A и силы тяжести F_T , действующих на человека в воде:

$$\frac{F_A}{F_T} = 0,93 \frac{\rho_{\text{в}}}{\rho_{\text{ч}}}, \quad (12.1)$$

где $\rho_{\text{в}}$ и $\rho_{\text{ч}}$ — плотность воды и человека соответственно.

Из формулы (12.1) следует, что даже при самом глубоком вдохе архимедовой силы не хватит для полной компенсации силы тяжести пловущего человека. Но даже если бы архимедова сила была равна весу человека, он не смог бы неподвижно лежать в воде, находясь в горизонтальном положении, как это изображено на рисунке 12.1. Это вызвано тем, что архимедова сила F_A и сила тяжести F_T приложены к разным точкам тела. Сила F_A приложена в центре масс вытесненной телом жидкости (точка A на рисунке 12.1), а точка приложения силы F_T является центром масс тела и расположена чуть ниже (точка G на рисунке 12.1), которая из-за наличия воздуха в легких находится всегда дальше от головы, чем точка A . В результате силы F_A и F_T образуют

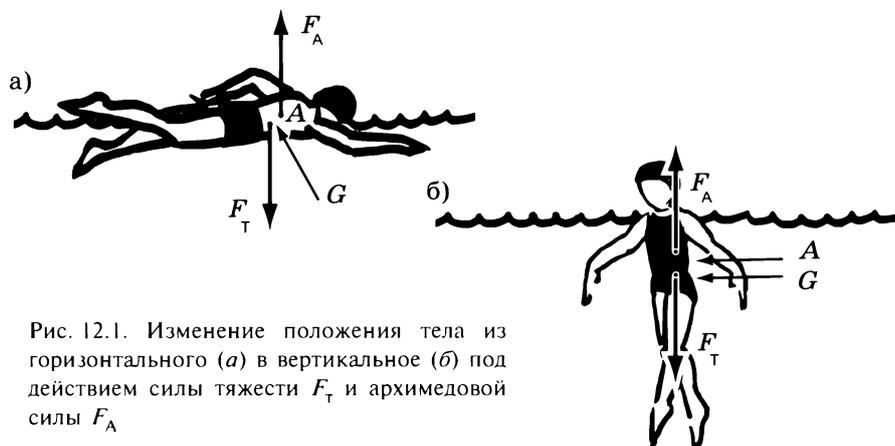


Рис. 12.1. Изменение положения тела из горизонтального (а) в вертикальное (б) под действием силы тяжести F_T и архимедовой силы F_A

пару сил, которая вращает тело в вертикальной плоскости, пока оно не примет вертикальное положение.

Легко ли плыть в вертикальном положении

Итак, если считать, что в теле человека достаточно жира и воздуха, чтобы сразу не утонуть, то можно утверждать, что вскоре после того, как человека бросят в воду, он примет вертикальное положение. Однако плыть вперед, находясь в вертикальном положении, очень трудно — мешает огромное сопротивление жидкости, которое пропорционально площади поперечного сечения. Интересно, что одним из требований, предъявляемых к пловцам первого разряда на флоте в царской России, было умение проплыть вертикально без помощи рук 20 саженей (1 морская сажень = 1,83 м). Оценка показывает, что площадь поперечного сечения тела человека на уровне пояса почти в 10 раз меньше, чем вдоль его позвоночника. Поэтому, перед тем как плыть, лучше все-таки принять горизонтальное положение. Обычно это делают, просто болтая ногами.

Что мешает болтать ногами

Найдем силу F , действующую на тело при его движении в воде со скоростью v . Сила сопротивления жидкости или газа движению зависит от скорости. При малых v почти все частицы жидкости или газа перед движущимся на них телом имеют достаточно времени, чтобы отойти в сторону, не приобретая при этом импульса в направлении v . При такой малой скорости только те частицы, которые коснулись тела, обретают его скорость. Эти сдвинутые с места частицы, двигаясь вместе с телом, будут, в свою очередь, увлекать очень тонкий слой жидкости, с которым они тесно связаны. Чем крепче связаны между собой слои жидкости, или чем больше ее вязкость, тем больше сила сопротивления, действующая на тело. В этом случае сила сопротивления прямо пропорциональна скорости v , среднему размеру тела в

плоскости, перпендикулярной v , и вязкости жидкости. Точную формулу для силы сопротивления при малых v можно получить, например, для тела, имеющего форму шара. Эта формула, получившая название формулы Стокса, имеет вид:

$$F = 3\pi\eta Dv, \quad (12.2)$$

где D — диаметр шара, а η — коэффициент вязкости, равный для воды $0,001 \text{ Па} \cdot \text{с}$. Таким образом, если скорость движения тела невелика, то на него будет действовать сила, прямо пропорциональная скорости и направленная противоположно.

Пусть теперь скорость тела увеличилась, и частицы жидкости, находящиеся на его пути, уже не успевают отходить в сторону и увлекаются вперед. В этом случае за t с тело успеет натолкнуться на массу жидкости, равную $vtSp$, где S — площадь поперечного сечения тела в направлении, перпендикулярном v . Всей этой массе жидкости тело сообщит скорость v и импульс v^2tSp . Поэтому силу сопротивления F_1 , действующую на тело со стороны жидкости при больших скоростях, которую часто называют силой лобового сопротивления, можно вычислить по следующей формуле:

$$F_1 = v^2Sp. \quad (12.3)$$

Конечно, и при больших скоростях некоторая часть силы сопротивления зависит от вязкости, и ее можно вычислить, используя выражение (12.2). Чтобы оценить, как с увеличением скорости тела изменяется влияние вязких сил сопротивления, найдем отношение F_1 к F для шара диаметром D , используя выражения (12.2) и (12.3):

$$\frac{F_1}{F} = \frac{1}{12} \cdot \frac{Dvp}{\eta}. \quad (12.4)$$

Выражение $\frac{Dvp}{\eta}$, являющееся безразмерной величиной, называется числом Рейнольдса Re . Из формулы (12.4) следует, что при $Re > 100$ вязкостью среды можно пренебречь, а силу сопротивления вычислять по формуле (12.3). Наоборот, при малых числах Рейнольдса ($Re \ll 1$) следует учитывать только вязкость жидкости, а вычисление силы проводить по формуле (12.2).

Русалка с ластом и число Рейнольдса

После такого отступления в область гидродинамики вернемся к задаче о том, каким образом нужно болтать ногами, чтобы перевести наше тело из вертикального положения в горизонтальное. Чтобы упростить задачу, будем считать, что мы используем для этого один большой ласт, надетый на обе ноги, подобно хвосту русалки. Тело русалки заменим ползатоленным поленом, к нижнему концу которого прикреплен подвижный ласт площадью поверхности S , способный двигаться в горизонтальном направлении (рис. 12.2, *a*). Чтобы не учитывать перемещений суммарного центра масс при изменении положения ластика относительно полена, будем считать, что ласт не деформируется при движении и его масса пренебрежимо мала по сравнению с массой полена.

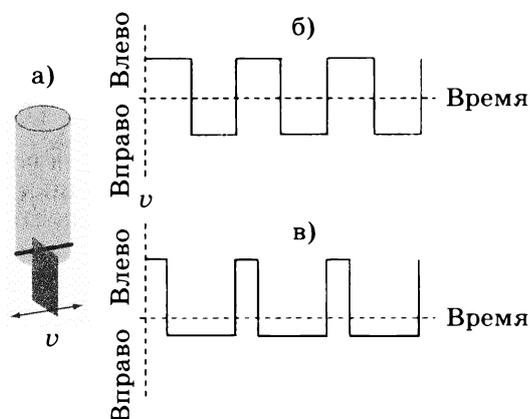


Рис. 12.2. Модель русалки (а), пытающейся перейти из вертикального положения в горизонтальное, двигая ластом; графики изменения скорости лапа v от времени при симметричном (б) и несимметричном (в) движениях

Пусть частота движения влево и вправо ластом составляет 1 Гц, размах движений 0,25 м, тогда средний модуль скорости движения будет равен 0,5 м/с. Считая, что размер лапа около 0,2 м, а вязкость воды 0,001 Па · с, получаем $Re = 100\,000$. Таким образом, при движении ластом вязкими силами можно пренебречь, а силу сопротивления надо вычислять, используя формулу (12.3).

Симметрично или нет

Пусть график изменения скорости лапа сначала выглядит симметрично, т. е. интервалы движения ластом влево и вправо одинаковы (рис. 12.2, б). В этом случае и сила сопротивления воды, и ее средний импульс при движении влево и вправо тоже будут одинаковыми, а значит, тело русалки так и останется в вертикальном положении.

Попробуем теперь двигать ласт влево с большей скоростью v_1 , чем вправо со скоростью v_2 (рис. 12.2, в). Так как расстояния, проходимые ластом при движениях влево и вправо, должны быть равны, то $v_1 t_1 = v_2 t_2$, где t_1 и t_2 — время движения лапа влево и вправо соответственно. При таких несимметричных движениях лапа средняя сила $F_{\text{ср}}$, действующая на русалку и направленная вправо, будет равна

$$F_{\text{ср}} = \frac{t_1}{t_2} \cdot \frac{t_2 - t_1}{t_1 + t_2} v_1^2 S \rho_v. \quad (12.5)$$

Таким образом, любые повторяющиеся несимметричные движения лапами приведут к тому, что мы примем горизонтальное положение и поплывем.

А если мы оказались в бочке с медом

Вязкость меда в 10 000 раз больше, чем вязкость воды. Поэтому двигать лапами, находясь в бочке с медом, очень трудно. Даже если предположить, что скорость движений в таких условиях уменьшится только в 10 раз (с 0,5 до 0,05 м/с), то отношение силы лобового сопротивления

к вязкой силе, вычисленное по формуле (12.4), составит менее $1/10$. Это значит, что основными силами, действующими при движении ласта в меде, являются силы вязкости. Попробуем теперь получить выражение для $F_{\text{сп}}$, аналогичное формуле (12.5), используя формулу (12.2) для несимметричных движений. При любых v_1, t_1 и v_2, t_2 , для которых справедливо равенство $v_1 t_1 = v_2 t_2$, за цикл средняя сила, действующая на ласт, будет равна нулю. А это значит, что в очень вязкой жидкости, где число $Re \ll 1$, плавать надо не так, как в воде, а по-другому.

Большие трудности малых существ

Как следует из формулы (12.4), очень малые существа, плавая в воде, могут сталкиваться с такими же трудностями, что и мы в воображаемом медовом озере. Известно, что бактерии, размер которых составляет около 1 мкм , плавают в воде со скоростью $0,1 \text{ мм/с}$. Число Рейнольдса для движений таких бактерий близко к 10^{-4} , поэтому при их плавании действуют только силы вязкого трения. Каким же образом бактерии двигают своими жгутиками, чтобы сдвинуться с места?

Диаметр жгутика чуть больше 100 ангстрем ($1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ м}$), и жгутик лишен мускулатуры. Поэтому бактерия не может согнуть жгутик или пустить вдоль него волну деформаций, как это делают для своего движения змеи или некоторые рыбы. Единственное, что может делать бактерия — закручивать жгутик вдоль оси, как штопор. Для этого в месте соединения жгутика с телом бактерии есть специальный молекулярный моторчик — предмет исследования многих ученых, которые до сих пор до конца не знают, как он работает. Бактерии вращают жгутиком с частотой в несколько герц, часто меняя направление движения (рис. 12.3).

Все знают, что круговые движения штопора продвигают его либо вперед, либо назад, в зависимости от того, по часовой стрелке или против его крутят. То же самое происходит и с бактерией, когда она крутит свой жгутик. Он вкручивается в жидкость или выкручивается из жидкости, которая для него является очень вязкой ($Re < 10^{-3}$), двигая бактерию вперед или назад.

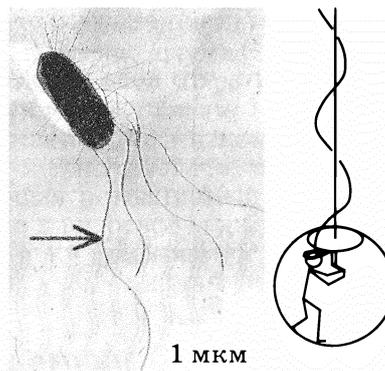


Рис. 12.3. Фото бактерии кишечной палочки (слева) и схематическое изображение принципа ее движения — вращение жгутиком, как штопором. Стрелкой на рисунке слева указан один из жгутиков

Как плыть быстрее

Чтобы быстрее плыть, необходимо не только изо всех сил двигать руками и ногами в определенной последовательности, но и ориентировать свое тело так, чтобы испытывать минимальное сопротивление воды. Согласно формуле (12.3), сила сопротивления прямо пропорциональна площади поперечного сечения S , но это выражение дает

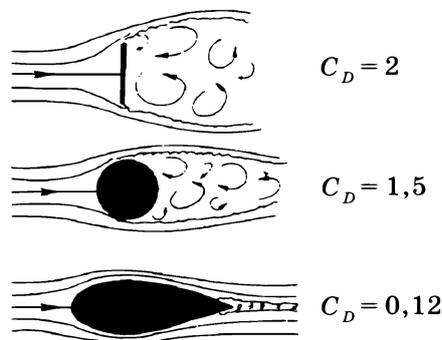


Рис. 12.4. Линии тока жидкости при обтекании диска, шара и каплевидного тела одной и той же площади поперечного сечения. Справа приведены соответствующие значения для C_D . $Re = 100\ 000$

завышенное значение для F_1 , так как не все частицы воды при столкновении с телом приобретают его скорость. Однако формулой (12.3) можно пользоваться, если ее правую часть умножить на безразмерный коэффициент C_D — коэффициент лобового сопротивления:

$$F_1 = \frac{1}{2} C_D v^2 S \rho_v. \quad (12.6)$$

При этом, как показывают эксперименты, C_D зависит от формы тела (рис. 12.4).

Из-за того, что вода по-разному обтекает тела, возникают большие различия в C_D . За диском и шаром, например, образуется зона вихрей.

А это значит, что при их движении вперед происходит потеря энергии не только на вязкое трение, но и на энергию возникающих за ними вихрей. В отличие от шара и диска, за каплевидным обтекаемым телом вихри почти не образуются, и поэтому сила сопротивления воды для движения такого тела меньше, хотя его площадь поперечного сечения такая же.

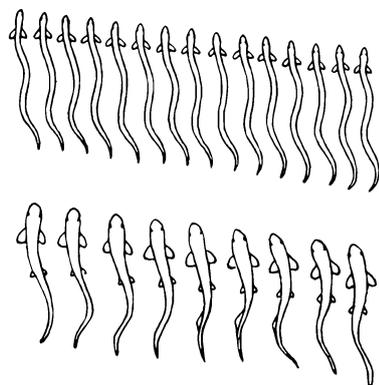


Рис. 12.5. Два вида плавания рыб — волнообразное (а) и использующее только движение хвоста (б). На обоих рисунках (справа налево) показана последовательность изображений рыбы при движении

Как плавают рыбы

Число Рейнольдса для небольших рыб составляет более 100, и они не вращают жгутик, как это делают бактерии. Рыбы используют по крайней мере два типа плавания — волнообразные движения всего тела или движения хвоста (рис. 12.5). Рыбы, имеющие змееобразную форму (например, угорь), используют первый тип

плавания, изгибая тело от головы к хвосту, отталкивая воду назад, в результате чего рыба движется вперед. При втором типе движения воду отталкивает назад быстро распрямляющийся хвост рыбы.

Неразгаданные загадки плавания меч-рыбы и дельфина

Ученые пока не могут ответить на вопрос, как многие рыбы и дельфины движутся в воде со скоростью, недоступной иногда даже для летящих в воздухе птиц. Меч-рыба, например, плывет со скоростью до 130 км/ч, тунец — 90 км/ч. Если изготовить муляж меч-рыбы и определить коэффициент лобового сопротивления C_D , то для того, чтобы набрать такую скорость, рыбе необходимо развить мощность, равную мощности автомобильного мотора порядка 100 лошадиных сил. Энергия живых существ — это энергия окислительных процессов. Но рыбы — существа холоднокровные, их температура ненамного выше температуры воды, в которой кислород растворен в очень небольшом количестве. Поэтому такие мощности для них просто недостижимы. Остается предположить, что рыбы каким-то образом умеют очень сильно уменьшать сопротивление воды.

При быстром движении обычного предмета в воде вихри образуются только позади него. Согласно закону Бернулли, давление в вихрях падает, что оказывает на тело тормозящее действие. Одна из гипотез, объясняющих резкое уменьшение сопротивления воды у меч-рыбы, состоит в том, что меч, находящийся впереди, служит генератором вихрей, которые переходят с меча на тело рыбы. В результате рыба движется в воде, со всех сторон окруженная вихрями — областями низкого давления, что соответствует чрезвычайно низкому сопротивлению движения. Такого же эффекта можно достичь, если поверхность тела сделать шероховатой, возмущая пограничный слой между жидкостью и телом и превращая течение в вихревое (турбулентное) по всей поверхности контакта. Какой из этих механизмов уменьшения C_D реализуется у меч-рыбы и дельфинов, ученые до сих пор не знают.

Почему щука всегда догонит карася

Общеизвестная поговорка «На то и щука в море, чтобы карась не дремал» подразумевает, что щука всегда догонит карася, если он не успеет где-нибудь спрятаться. Да и не только карася, а любую мелкую рыбешку. Но почему максимальная скорость у крупной рыбы больше, чем у мелкой?

Согласно формуле (12.6), сила сопротивления, которую преодолевает рыба, двигаясь в воде, при одинаковой форме тела прямо пропорциональна площади поперечного сечения S рыбы и квадрату скорости v^2 ее движения. Поэтому мощность N , которую затрачивает рыба при движении, равна

$$N = k_1 v^3, \quad (12.7)$$

где $k_1 = \frac{1}{2} C_D S \rho_v$.

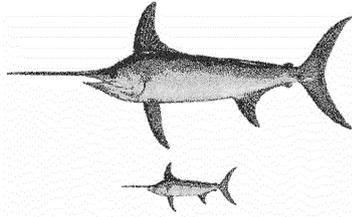


Рис. 12.6. Две меч-рыбы разных размеров, для которых проводится оценка максимальной скорости плавания

максимальная работа, производимая каждой мышцей и равная произведению максимальной силы на максимальное укорочение, должна быть пропорциональна ее объему. Так как механизм сокращения всех мышц одинаков, то и максимальная мощность также должна быть пропорциональна объему мышцы.

Если считать, что большие и маленькие рыбы подобны, как это изображено на рисунке 12.6, и что они используют один и тот же стиль плавания и имеют аналогичные мышцы, то максимальная мощность N , развиваемая этими рыбами, должна быть прямо пропорциональна объему мышц, занятых в движении:

$$N = k_2 V, \quad (12.8)$$

где V — объем рыбы, k_2 — постоянный коэффициент, зависящий от стиля плавания и типа рыбы. Приравнивая формулы (12.7) и (12.8), получаем

$$v = C_2 \left(\frac{V}{S} \right)^{1/3}, \quad (12.9)$$

где C_2 — коэффициент, не зависящий от размеров рыбы. Пусть $v_1, v_2, V_1, V_2, S_1, S_2$ — скорости, объемы и площади поперечного сечения большой и маленькой рыб соответственно. Тогда из формулы (12.9) можно получить

$$\left(\frac{v_1}{v_2} \right)^3 = \frac{V_1 S_2}{V_2 S_1}. \quad (12.10)$$

Считая формы большой и маленькой рыб подобными, а их длины равными L_1 и L_2 , можно утверждать, что $\frac{V_1}{V_2} = \left(\frac{L_1}{L_2} \right)^3$, а $\frac{S_1}{S_2} = \left(\frac{L_1}{L_2} \right)^2$.

Поэтому выражение (12.10) можно переписать в виде

$$\left(\frac{v_1}{v_2} \right)^3 = \frac{L_1}{L_2}.$$

Оценим, как связаны между собой максимальная мощность, развиваемая мышцей животного, и размеры этой мышцы. Максимальная сила каждой мышцы прямо пропорциональна ее площади поперечного сечения, а именно: каждый квадратный сантиметр мышцы способен действовать силой около 50 Н. Мышца, прикладывая такую силу, укорачивается, и максимальное укорочение не может быть больше 50% ее исходной длины. Таким образом, укорочение мышцы пропорционально ее длине. Значит,

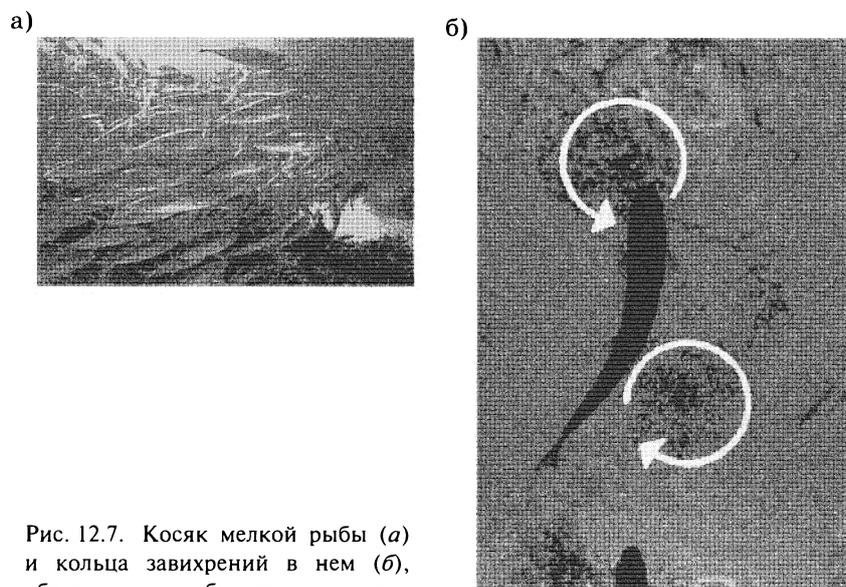


Рис. 12.7. Косяк мелкой рыбы (а) и кольца завихрений в нем (б), облегчающие рыбам движение вперед

Если учесть, что длина тела щуки около 1 м, а карася 0,1 м, то перспектива карасю попасть в пасть щуки обрисовывается вполне четко.

Рост известных пловцов, как и у баскетболистов, выше среднего. Например, рост многократного чемпиона по плаванию Александра Попова 197 см. Очевидно, успехи этих «гулливеров» в плавании можно объяснить так же, как и историю со щукой и карасем.

Почему мелкие рыбы ходят косяками

В косяке все рыбы движутся в одном направлении друг за другом. При этом число рыб в косяке может быть от нескольких штук до миллионов. Плыть в косяке не только безопаснее, но и энергетически выгоднее, если держаться точно за виляющим впереди хвостом, который оставляет после себя завихрения, подталкивающие вперед плывущих сзади (рис. 12.7). Двигаться так, чтобы оказаться точно между двумя завихрениями, оставленными впереди плывущей рыбой, помогают специальные рецепторы боковой линии — высокочувствительные датчики давления.

Что мешает двигаться в воде со скоростью звука

Вся энергия при движении в воде уходит на преодоление силы сопротивления. Вязкость воды в 50 раз, а плотность в 800 раз больше, чем воздуха. Это и является основной причиной того, что самолеты летают в десятки, а иногда и в сотни раз быстрее, чем плывут подводные лодки и торпеды (не более 130 км/ч).

Тормозят движение в воде не только ее большая вязкость и плотность, но и зоны низкого давления (турбулентности и вихри), возникающие на хвосте подводных лодок и торпед. В том месте, где давление падает ниже давления насыщенных паров воды (2,3 кПа при 20 °С), образуется пузырек пара. Другими словами, когда давление падает, его не хватает, чтобы держать молекулы воды вместе, и они разлетаются, образуя пар. Такой пузырек пара называют кавитационным пузырьком, а процесс — кавитацией. Последующее схлопывание кавитационных пузырьков рождает ударные волны, которые являются причиной акустического шума подводных лодок и эрозии их гребных винтов. Поэтому при конструировании торпед и подводных лодок всегда учитывается возникновение кавитационных пузырьков пара.

Что нам мешает, то нам и поможет

Еще в начале 1960-х гг. перед советскими учеными была поставлена задача разработать принцип движения под водой со скоростью, близкой к скорости звука. И тогда возникла идея превратить заклятого врага — кавитацию в помощника. Если не устранять кавитацию, а, наоборот, создавать ее, то движущееся под водой тело будет со всех сторон окружено облаком кавитационных пузырьков. Такие условия, названные суперкавитацией, приводят к тому, что тело перестает соприкасаться с водой и как будто летит в окружающем его газовом пузыре. Значит, резко уменьшается сила сопротивления и соответственно увеличивается скорость движения под водой (рис. 12.8). Сила тяги гребного винта в условиях суперкавитации уменьшается, так как со всех сторон он окружен газовыми пузырьками. Поэтому для источника тяги в таких условиях больше подходит ракетный двигатель.

В 1977 г. противолодочная торпеда «Шквал», движущаяся в условиях суперкавитации со скоростью более 100 м/с, была принята на вооружение ВМФ СССР. Технологию создания таких подводных средств не могли воспроизвести в течение 30 лет, и только в середине 2005 г. Германия заявила, что разработала аналогичную высокоскоростную торпеду «Барракуда». В настоящее время ученые и конструкторы пытаются использовать суперкавитацию для создания пассажирских подводных судов.

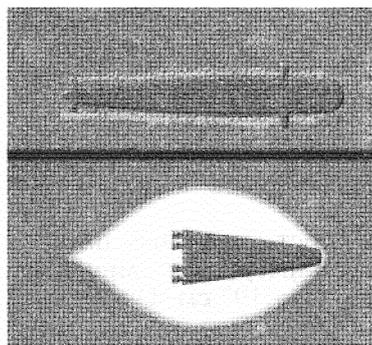
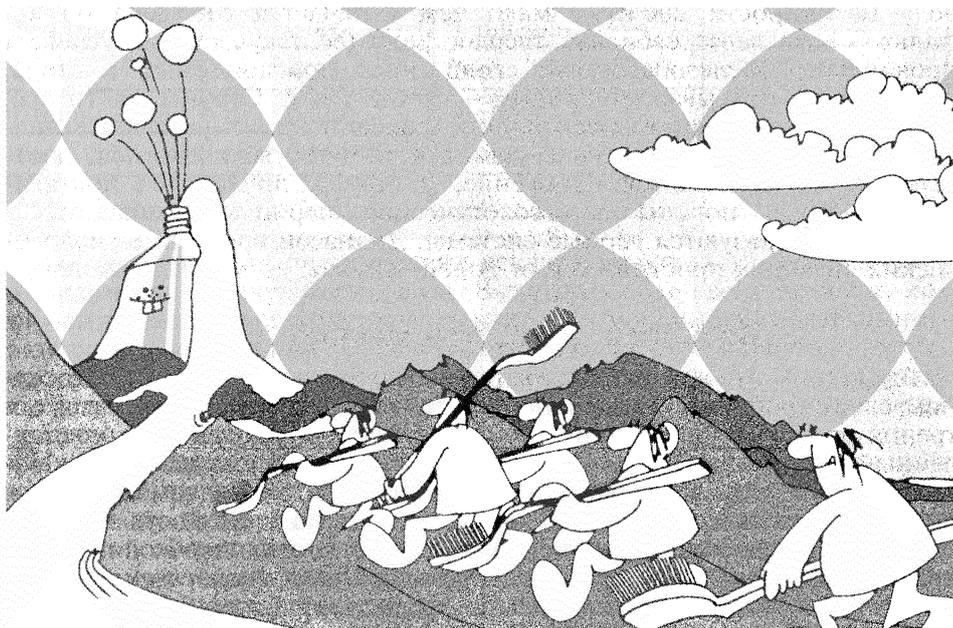


Рис. 12.8. Схематическое изображение обычной подлодки, окруженной маленькими кавитационными пузырьками пара, и торпеды, летящей в кавитационном газовом пузыре (суперкавитация)

Глава 13

Реология – наука о том, что все течет



Реология – наука о деформациях и текучести тел, об их упругих, пластических и вязких свойствах в различных сочетаниях. Слово «реология» происходит от греческого слова «рео» – течение; афоризм «все течет» по-гречески звучит «пáнта рéи».

Упругие деформации возникают в теле при приложении нагрузки и исчезают, если нагрузки снять. Пластические деформации появляются только в том случае, когда вызванные нагрузкой напряжения превышают предел текучести; они сохраняются после снятия нагрузки. Вязкое течение отличается тем, что оно возникает при любых сколь угодно малых напряжениях; с ростом напряжений увеличивается скорость течения, и при сохранении напряжений вязкое течение продолжается неограниченно.

Вязкое течение проявляется во многих природных процессах и в большом числе технологических. Много веществ участвует в таких процессах:

- породы, составляющие земную кору, магма, вулканическая лава;
- нефть и глинистые растворы, играющие важную роль в добыче нефти;
- влажная глина, цементная паста, бетон и асфальтобетон (смесь асфальта и песка);
- масляные краски (смесь масла и частиц пигмента);
- растворы и расплавы полимеров в процессе изготовления нитей, пленок, труб путем экструзии;

- хлебное тесто и тестообразные массы, из которых изготавливают конфеты, сосиски, кремы, мази, зубные пасты.

Реология позволяет утверждать, что при быстрых воздействиях все тела ведут себя как твердые, при медленных появляется текучесть. Но понятия «быстрый» и «медленный» для разных сред различны. Удар о воду на скорости 200 км/ч мало чем отличается от удара об асфальт — вода ведет себя как твердое тело (ее текучесть не успевает проявиться). Железобетонный столб, косо прислоненный к стене, через месяц оказывается кривым — бетон течет. Струны на гитаре, оставленные в натянутом состоянии, снижают тон. В результате медленного течения материала их длина чуть-чуть увеличивается, соответственно уменьшается натяжение, и струны приходится подтягивать. Горные породы за геологические периоды сминаются в складки — образуются горные системы. Диапазон времени в реологических явлениях простирается от долей секунды до миллионов лет.

Вязкость — то, что мешает течь

Вязкость — это внутреннее трение жидкости, препятствующее соседним слоям двигаться с различной скоростью. Например, силы вязкого трения останавливают тонкий слой воды у берега реки, и этот остановленный берегом слой замедляет соседние слои воды в реке. Бензин, вода и молоко — относительно жидкие, они текут лучше, чем более вязкие жидкости, такие, как мед, кетчуп или сметана. Вязкость η можно определить, измеряя горизонтальную силу F , которую необходимо приложить к пластинке площадью S , плавающей на тонком слое жидкости толщиной h , чтобы она двигалась со скоростью v (рис. 13.1).

В формуле

$$\eta = \frac{F/S}{v/h},$$

предложенной еще И. Ньютоном, выражение, стоящее в числителе, называют напряжением сдвига, а в знаменателе — скоростью сдвига. В системе СГС единицей вязкости является пуаз (0,1 Па · с). В таблице 13.1 приведены значения вязкости различных жидкостей.



Рис. 13.1. Опыт и формула для определения вязкости η

Таблица 13.1

Жидкость	Вязкость, пуаз	Жидкость	Вязкость, пуаз
Ацетон	0,003	Машинное масло	1—7
Бензин	0,006	Глицерин	15
Вода	0,01	Мед	100
Спирт	0,012	Кетчуп	500
Ртуть	0,016	Сметана	1000
Молоко	0,03	Сургуч	100 000 000 000

Как правило, для органических веществ вязкость увеличивается с возрастанием молекулярного веса. Вязкость также увеличивается, когда между частицами жидких суспензий или макромолекулами возникают связи, приводящие к возникновению пространственных структур. Поэтому вязкость таких жидкостей называют структурной вязкостью, она зависит от условий течения и в основном уменьшается с ростом скорости сдвига (рис. 13.2).

Именно зависимость вязкости краски от скорости сдвига помогает наносить ее, например, на стену. Как видно из графика (см. рис. 13.2), когда краску не перемешивают (скорость сдвига равна 0 с^{-1}), ее вязкость наибольшая. Это значит, что при хранении краска практически не расслаивается на краситель и растворитель. Когда мы вынимаем кисть из банки с краской и делаем это достаточно медленно (скорость сдвига $< 1 \text{ с}^{-1}$), то на кисти остается довольно много краски, так как вязкость ее большая. Коснувшись кистью с краской стены, мы начинаем интенсивно двигать ею (скорость сдвига от 100 до 1000 с^{-1}), уменьшая этим вязкость краски в сотни раз. В результате краска становится жидкой, стекает с кисти и растекается тонким слоем по поверхности стены. Но сразу после того, как мы перестаем трогать этот слой краски и начинаем красить соседний участок, вязкость только что нанесенного слоя краски увеличивается. Если бы этого увеличения вязкости тонкого слоя краски на стене не происходило, то краска,

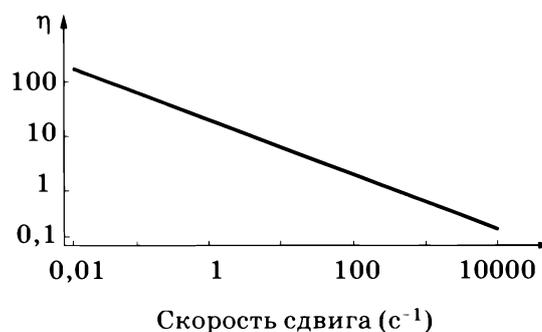


Рис. 13.2. Зависимость вязкости η (в $\text{Па} \cdot \text{с}$) водорастворимой краски от скорости сдвига (в с^{-1})

как вода, стекала бы с ее поверхности. Таким образом, зависимость вязкости краски от скорости сдвига служит ее важнейшей характеристикой, определяющей технологию крашения. То же относится и к косметическим кремам, измерение вязкости которых в широком диапазоне скоростей сдвига является показателем их качества.

Реология чуда святого Януария

Святой великомученик Януарий, небесный покровитель Неаполя, был казнен язычниками в начале IV в. С тех пор его запекшаяся кровь хранится в специальном сосуде. Первые упоминания о сосуде с кровью святого Януария и связанном с этой реликвией чуде относятся к XIV в. Чудо святого Януария за редкими исключениями проявляет себя на протяжении 600 последних лет и представляет собой таинственное превращение на короткое время запекшейся крови святого в багряную жидкость, происходящее таинственным образом на глазах у всех присутствующих. Три раза в год (в мае, сентябре и декабре) неаполитанцы приходят в городской собор, чтобы стать свидетелями чуда. Архиепископ демонстрирует стеклянный сосуд, содержащий засохшую кровь святого Януария, потом начинает его встряхивать и наконец объявляет, что кровь стала жидкой или осталась засохшей (рис. 13.3). Кровь святого Януария оставалась засохшей считанные разы, что всегда рассматривалось как предзнаменование беды. Бедствиями, которые согласно молве случались тогда, являются чума 1527 г. и землетрясение в Южной Италии 1980 г.

Если в сосуде действительно находится кровь святого Януария, то спонтанно перейти из твердого (запекшегося) состояния в жидкое она не может. Не поможет этому и встряхивание. Есть, однако, целый класс веществ, вязкость которых уменьшается иногда в тысячи раз при встряхивании или перемешивании. Поэтому группа ученых из Итальянской ассоциации изучения паранормальных явлений утверждают, что в чаше еще со Средневековья, по-видимому, содержится коллоидный раствор соединения железа $FeO(OH)$, который внешне напоминает кровь, являясь темно-коричневым и почти твердым гелем, но стоит его потрясти, и он разжижается. Такие жидкие смеси называют тиксотропными.



Рис. 13.3. В ожидании чуда святого Януария

Что такое тиксотропия

Тиксотропия (от греч. *thixis* — прикосновение и *tropé* — поворот, изменение) — способность гелей, паст и жидких суспензий уменьшать вязкость при перемешивании или встряхивании и возвращаться к первоначальной вязкости в состоянии покоя, когда заканчивается механическое воздействие. Далекo не все жидкости обладают тиксотропными свойствами. Как правило, тиксотропными являются желеобразные жидкости, состоящие из крупных и нитевидных молекул и поэтому имеющие очень большую вязкость.

Встряхивание уменьшает вязкость тиксотропной жидкости, так как оно разрывает межмолекулярные (водородные) связи между ее молекулами или микрочастицами, давая возможность соседним слоям жидкости двигаться свободнее относительно друг друга. Классическим примером тиксотропной жидкости служит кетчуп. Каждый знает, что вылить кетчуп из бутылки гораздо легче, если перед этим бутылку несколько раз встряхнуть.

Тиксотропия буровых растворов

При бурении скважины часть породы, разрушенной долотом, необходимо поднять на поверхность. Для этого по колонне бурильных труб в скважину закачивают буровой раствор (промывочная жидкость или буровой шлам), где он подхватывает частицы породы и выносит их на поверхность (рис. 13.4). Более вязкий раствор вынесет на поверхность больше взвешенных в нем выбуренных частиц породы. Но для закачивания вязких жидкостей требуется большее давление, а это дополнительные износ и поломки в буровом оборудовании. Поэтому вязкость — важное свойство буровых растворов.

Сто лет назад буровые растворы представляли собой смесь глины и воды, и часто для изготовления раствора рабочие выпускали стадо коров в карьер, заполненный водой. Грязь, которая оставалась после стада, потом закачивали в буровую скважину. Сейчас инженеры больше не полагаются только на воду, глину и коров. Вместо этого они тщательно разрабатывают составы и смеси, которые бы соответствовали определенным требованиям при различных условиях бурения.

Циркуляция бурового раствора в скважине иногда прерывается. При отсутствии циркуляции раствора часть породы, отслоившаяся от стенок в процессе бурения, может оседать на дно шахты скважины и создавать пробки, что приводит к серьезным проблемам. Чтобы этого не было, буровые растворы, как краски и кремы, должны быть тиксотропными.

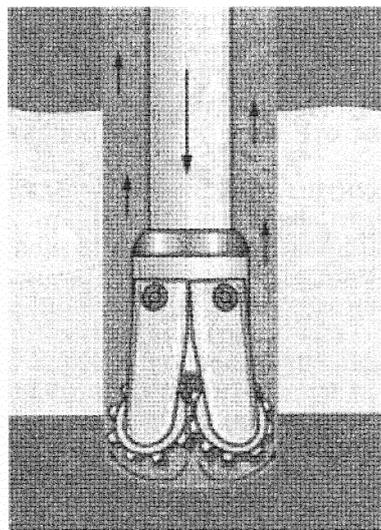


Рис. 13.4. Направление движения бурового раствора при бурении скважины

Глава 14

Как мороз притягивает морскую воду

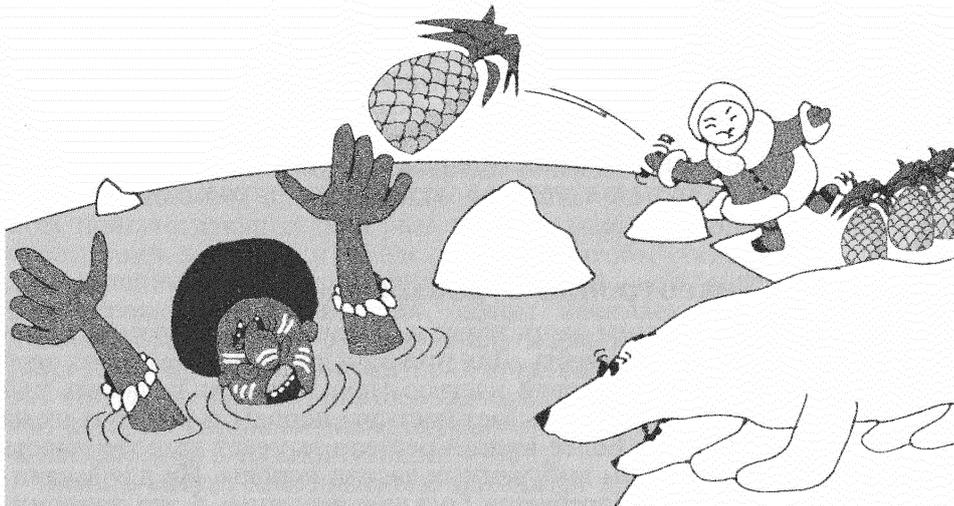


Рис. 14.1. Карта Атлантического океана. Жирной стрелкой 1 обозначен Гольф-стрим

Океанские воды, находясь в постоянном движении, переносят тепло от экваториальных широт к полюсам, что уравнивает температуру на поверхности Земли и влияет на ее климат. Океанские течения образуются и находятся под влиянием ветров, солёности воды, ее температуры, топографии океанского дна и силы Кориолиса, вызванной вращением Земли вокруг оси.

Гольфстрим (Gulf Stream в переводе с английского — поток из залива) — теплое поверхностное течение, несущее около 150 млн м³ воды в секунду из Мексиканского залива в Северную Атлантику и достигающее берегов Западной Европы, где оно меняет свое название на Северо-Атлантическое течение (рис. 14.1). Оно смягчает климат северо-запада Европы и остывает с приближением к полю-

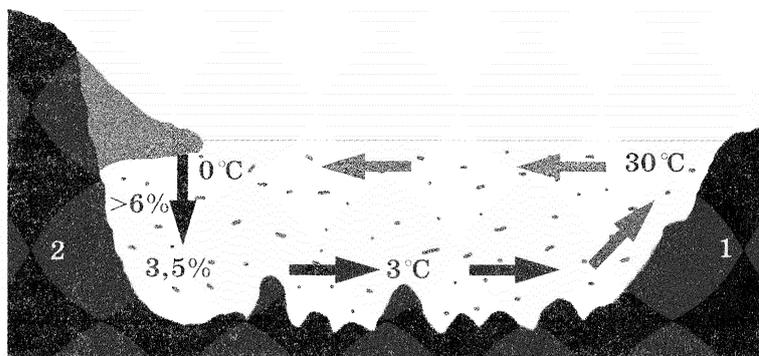


Рис. 14.2. Схематический вертикальный разрез Атлантического океана от берегов Флориды 1 до Гренландии 2. Двумя светлыми стрелками показано движение Гольфстрима по поверхности океана, а темными — обратное холодное глубинное течение, возвращающее воды к экватору. Цифры на схеме обозначают температуру и соленость воды в соответствующих местах

су. Теплую воду для Гольфстрима приносят пассаты — ветры, дующие на запад в экваториальных широтах. Теплое экваториальное течение, разогнавшись от Африки, разбивается у берегов Америки на два — одно течет на север (Гольфстрим), а другое — на юг (Бразильское).

Между Кубой и Флоридой Гольфстрим имеет скорость около 5 км/ч, ширину около 70 км, глубину 700 м и температуру 25 °С. Двигаясь на северо-восток, Гольфстрим постепенно расширяется и замедляется, и на полпути к Европе его скорость составляет уже не более 7 км в сутки.

Для сравнения: самая полноводная река в мире — Амазонка несет в Тихий океан лишь около 0,2 млн м³ воды в секунду, это в 1000 раз меньше, чем Гольфстрим. Что касается Амазонки, как, впрочем, и всех остальных рек, вода в ней течет как по наклонной плоскости — с гор в моря и океаны. Трудно себе представить, чтобы Гольфстрим скатывался с экватора к Северному полюсу, как с горы. Что же тогда тянет Гольфстрим на север?

Но сначала ответим на другой вопрос: куда в Северной Атлантике исчезает такое огромное количество воды, пришедшее с Гольфстримом? Ответ, казалось бы, очень простой: вода у берегов Гренландии остывает и уходит на дно, а потом с холодным глубинным течением возвращается к экватору, поднимается на поверхность, нагревается солнцем и опять с Гольфстримом несется к Гренландии (рис. 14.2).

Круговорот воды в Атлантике напоминает картину конвективных потоков воды в кастрюле, центральная часть дна которой подогревается газовой горелкой (рис. 14.3). Стрелки на рисунке показывают направление движения жидкости в кастрюле — жидкость поднимается в центре от дна, потом движется к стенкам и опускается вдоль них опять на дно. Эти конвективные потоки легко сделать видимыми, если опустить в кастрюлю маленькие частички фильтровальной бумаги или промокашки или добавить в нее несколько капель краски. Объяснить движение воды в кастрюле, стоящей на огне, довольно просто — вода, нагреваясь у дна кастрюли, уменьшает свою плотность и поднимается вверх, а ей на смену приходит

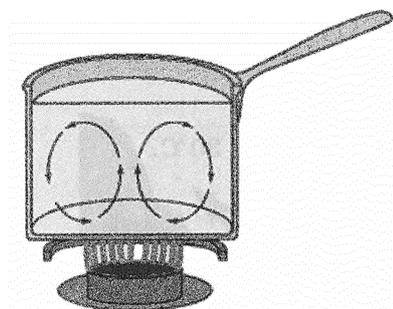


Рис. 14.3. Схематический разрез кастрюли с водой, стоящей на газовой горелке. Круговыми стрелками обозначены направления конвективных потоков воды

остывшая у стенок вода, имеющая бóльшую плотность. На рисунке 14.4 показано, как изменяется плотность воды при нагревании.

Чтобы объяснить движение Гольфстрима через Атлантику так же, как мы объяснили движение воды в кастрюле, нам надо знать, как изменяется температура воды на поверхности от экватора до Гренландии и от поверхности до дна. На рисунке 14.2 показано, что разница температур в январе в Мексиканском заливе и у берегов Гренландии составляет около 30°C , а глубинные воды Атлантики (на глубине более 3000 м) имеют одинаковую температуру — около 3°C . Температуры же глубинных и поверхностных вод у берегов Гренландии практически не

различаются. Достаточно ли такого распределения температур, чтобы толкать Гольфстрим от Флориды к берегам Гренландии?

Конвективные потоки воды в кастрюле возникают из-за того, что ее нагревают снизу. Нагрев кастрюли сверху (например, лампой) нагреет верхние слои жидкости больше, чем нижние, и верхние слои станут легче нижних, но никакого движения воды это не вызовет, так как верхние слои и до нагрева были наверху. Океан нагревается сверху, а температура верхних слоев океана всегда выше, чем нижних, и поэтому такое распределение температур не сможет стать движителем Гольфстрима. Что же все-таки толкает Гольфстрим на север?

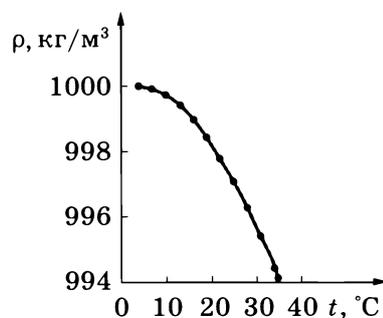


Рис. 14.4. Зависимость плотности воды от температуры

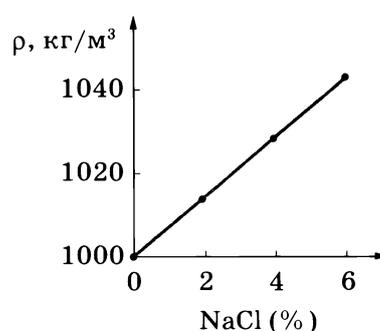


Рис. 14.5. Зависимость плотности воды от содержания в ней хлористого натрия

Как и в случае с кастрюлей на огне, в Атлантике должны быть места, где более легкие слои воды поднимались бы с глубины и/или более тяжелые слои опускались бы с поверхности на глубину. Эти места и могли бы служить моторами Гольфстрима. Здесь нам необходимо вспомнить, что вода в Океане соленая, а плотность воды зависит не только от температуры, но и от ее солёности. На рисунке 14.5 показана зависимость плотности воды от содержания в ней хлористого натрия (в массовых %) при температуре 15 °С.

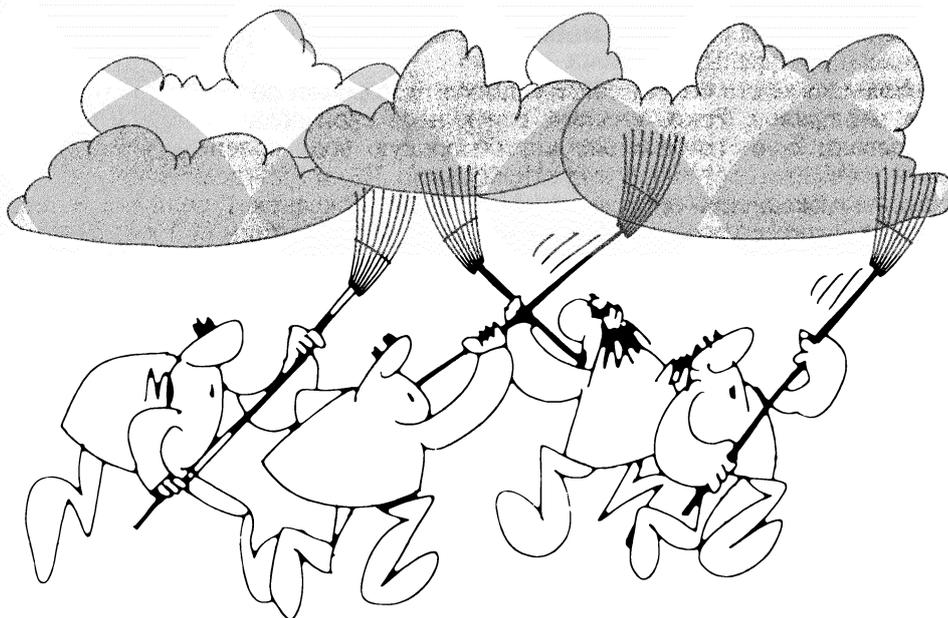
Большая часть солей, содержащихся в морской воде, — это соли земных минералов. Реки, стекая с гор и неся свои воды в моря и океаны, вымывают соли из камней, делая морскую воду соленой. Содержание соли в Океане составляет в среднем около 3%, и 85% всех солей, растворенных в океанской воде, — это NaCl. Масса океанской соли так велика, что если всю ее уложить вдоль земного экватора шириной 1 км, то высота этой соляной стены составит 500 км.

А теперь посмотрим опять на рисунок 14.2 и обратим внимание на то, что около берегов Гренландии солёность воды, а значит, ее плотность, резко увеличивается. Происходит это потому, что даже в июле температура воздуха в Гренландии не поднимается выше -20 °С. В результате весь год у берегов Гренландии океанская вода замерзает и превращается в лед. Так как лед пресный (не содержит соли), то под ним концентрация соли очень высокая. Вода под гренландским льдом не только очень соленая, но и тяжелая (см. рис. 14.2). Поэтому она опускается на дно, а на образовавшееся пустое место у берегов Гренландии поступает легкая вода Гольфстрима. Опускающаяся на дно соленая и холодная вода образует в нескольких сотнях километров к югу от Гренландии водовороты диаметром 10—15 км, которые хорошо видны из космоса и были отмечены на многих древних морских картах. Итак, можно считать, что мороз у берегов Гренландии притягивает к себе Гольфстрим.

Гольфстрим делает климат в Западной Европе очень мягким, и зимняя температура, например, в Лиссабоне никогда не опускается ниже +10 °С, хотя в Нью-Йорке, находящемся далеко от Гольфстрима, но на той же широте, температура зимой часто опускается ниже 0 °С. Ученые утверждают, что мягкий климат способствовал развитию цивилизации в Западной Европе. Глобальное потепление, постепенно увеличивающее температуру нашей планеты, может лишить Гренландию своей притягательной силы. Происходящее таяние ледников Гренландии уменьшает солёность воды у ее берегов, а это, в свою очередь, лишает Гольфстрим силы, толкающей его на север, и Европа на некоторое время замерзает, что происходит все чаще и чаще. Ученые оценили, как может измениться климат в Европе, если глобальное потепление не будет остановлено. Самый худший сценарий — это возвращение в Европу ледникового периода в течение 3—5 лет. Наиболее же вероятное развитие событий — более суровые зимы, засухи летом, неурожай и, как следствие, войны.

Глава 15

Пар — вода, которая легче воздуха



Что такое пар и сколько его на Земле

Молекулы воздуха над водоемами при любой температуре покидают жидкость и образуют водяной пар. Этот процесс называется испарением. Одновременно с испарением протекает и обратный процесс — конденсация, т. е. возвращение молекул из пара в жидкость. Если испарение происходит в закрытом сосуде, то сначала концентрация пара будет расти, но потом наступит момент, когда число молекул, покидающих жидкость, станет равным числу молекул, возвращающихся в жидкость. Такой пар называют насыщенным, так как его концентрация в воздухе соответствует максимально возможной при данных условиях (давлению и температуре). Очевидно, что чем выше температура воздуха, тем интенсивнее испаряется вода и тем больше водяных паров может содержаться в единице объема, а значит, давление насыщенных паров тоже растет с температурой (рис. 15.1). Поэтому концентрация водяных паров в тропических широтах в 100 раз выше, чем у полюсов.

Если бы весь пар, содержащийся в воздухе, внезапно перешел в дождь, то вблизи экватора выпало бы 50 мм осадков, а вблизи полюсов только 1 мм. При этом в среднем на поверхности Земли образовался бы слой воды толщиной 25 мм. Известно, что за год в среднем выпадает 1 м осадков. Поэтому набивший всем оскомину круговорот воды в природе совершается по крайней мере 40 раз за год. Концен-

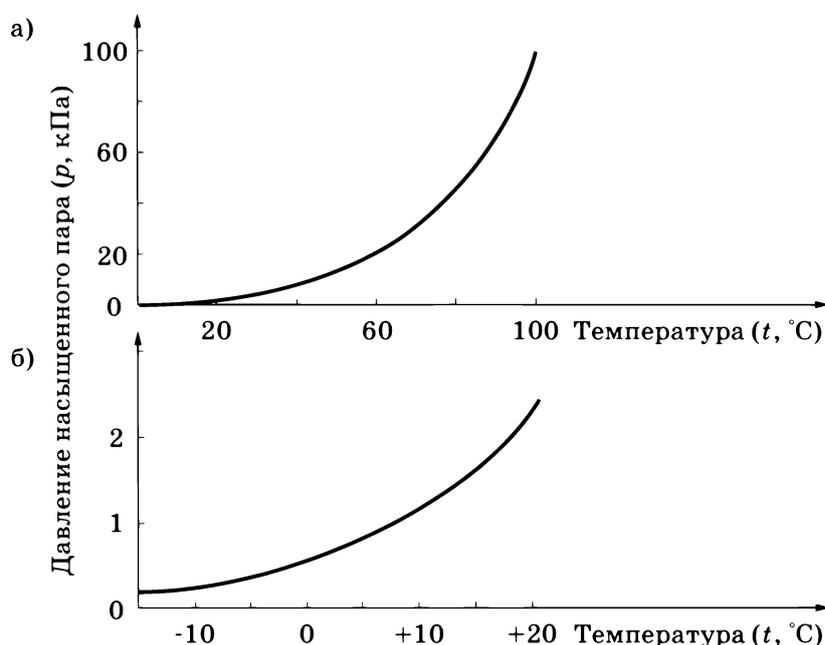


Рис. 15.1. а) Зависимость давления насыщенных водяных паров от температуры при нормальном атмосферном давлении. Область над кривой соответствует образованию тумана и облаков, под кривой — их исчезновению; б) зависимость для диапазона температур воздуха средней полосы России

трация (давление) водяных паров с удалением от поверхности земли падает гораздо быстрее, чем для остальных газов. Происходит это из-за того, что с высотой уменьшается температура воздуха, а значит, и его способность удерживать влагу. На высоте 5 км температура воздуха около -20 °C. Поэтому почти половина всей влаги атмосферы находится в нижнем ее слое, имеющем толщину 1,5 км, и менее 5% находится на высоте более 5 км. Относительная влажность воздуха тоже уменьшается с высотой, составляя в среднем 60–80% у поверхности Земли и 20–40% на высоте 9 км.

Как измеряют влажность на расстоянии

Чтобы предсказать погоду, надо знать, откуда и куда движется влажный воздух. Для этого определяют влажность воздуха на расстоянии. Делают это, например, с помощью датчиков, измеряющих интенсивность инфракрасного излучения Земли, установленных на спутниках. Водяные пары очень сильно поглощают этот тип излучения, и поэтому на фотографиях Земли, сделанных со спутника в этой части

спектра, яркость изображения зависит от концентрации водяных паров, находящихся над данной точкой поверхности планеты. Поэтому, измеряя яркость инфракрасного излучения различных участков Земли, можно оценить среднюю влажность воздуха над ними.

Какая влажность лучше

Интересуясь прогнозом погоды, мы редко обращаем внимание на влажность воздуха, считая, что главное — это температура и осадки. Однако значения относительной влажности тоже бывают очень важны. Излишне сухой воздух с относительной влажностью меньше 40% делает сухими слизистые оболочки легких и носоглотки, увеличивая риск инфекций и кровотечений. Влажный воздух (больше 60%) в помещении создает идеальные условия для роста плесени и размножения так называемых пылевых клещей, что может вызывать аллергию у людей, склонных к этому заболеванию. Кроме того, высокая влажность может стать причиной тепловых ударов, так как при большой концентрации водяных паров в воздухе нам становится тяжело отдавать избыточное тепло с помощью потоотделения. Как следует из таблицы 15.1, увеличение влажности с 50 до 70% при температуре 32 °С приводит к кажущемуся росту температуры окружающего воздуха до 41 °С. Наоборот, когда влажность нулевая, то та же температура 32 °С нами ощущается как 28 °С. Поэтому если вам стало зябко в холодной комнате, то поставьте на пол таз с теплой водой. Скоро влажность воздуха увеличится, и вам станет теплее. Считается, что комфортным условиям соответствует температура 20—22 °С при относительной влажности воздуха 45—50%.

Известно, что воздух зимой в доме становится сухим, отчего иногда даже першит в горле. Объяснением этой сухости холодного воздуха может служить зависимость парциального давления насыщенного во-

Таблица 15.1

Влажность, %	Температура воздуха, °С										
	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					

дяного пара от температуры, ведь в теплую комнату воздух поступает снаружи, где парциальное давление водяных паров очень низкое. Например, если на улице $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ и 50% влажности, то такой воздух после нагрева до $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ будет иметь относительную влажность всего 13%, т. е. в 4 раза меньше, чем необходимо для комфортных условий. А когда за окном мороз, влажность воздуха в доме становится еще меньше, и приходится прибегать к помощи увлажнителей. Поэтому многие комнатные растения зимой рекомендуется поливать чаще, чем летом.

Почему продукты быстро высыхают в холодильнике

В холодильной камере самое холодное место, испаритель, находится сверху, откуда холодный и поэтому тяжелый воздух опускается вниз. Соприкасаясь с продуктами и стенками холодильника, воздух нагревается, а его относительная влажность уменьшается, так как нагретый воздух поглощает больше влаги, чем холодный. Таким образом, холодный воздух, нагревшись, сразу становится сухим и отбирает часть влаги у продуктов. Потом теплый, а значит, легкий воздух поднимается вверх к испарителю, где охлаждается до первоначальной температуры, но влажность его оказывается выше первоначальной из-за воды, отобранной у продуктов. Это повторяется несколько раз, пока относительная влажность воздуха не превысит 100%, и тогда на поверхности испарителя появляются капельки воды или кристаллики льда.

Циркулирующий по холодильнику воздух «перевозит на себе» воду от более теплых продуктов к более холодному испарителю. При этом продукты, лишаясь воды, охлаждаются, так как они теряют тепло, необходимое для испарения влаги. Легко посчитать, например, что огурец массой 50 г, потеряв всего 0,1 г влаги, охладится более чем на один градус. Поэтому сухие продукты охлаждаются в холодильнике медленнее, чем влажные. А вообще, лучше хранить продукты в холодильнике в закрытой посуде или во влагонепроницаемой пленке, хотя остывать они будут, конечно, медленнее. Чтобы ускорить циркуляцию воздуха и охлаждение продуктов, в современных моделях холодильников используют вентиляторы.

Как избежать запотевания стекол

Влага из теплого воздуха конденсируется на холодной поверхности. Из графика зависимости давления насыщенных паров от температуры следует (см. рис. 15.1), что воздух влажностью 50%, нагретый до температуры $20\text{ }^{\circ}\text{C}$, начнет конденсироваться на поверхностях, температура которых ниже $10\text{ }^{\circ}\text{C}$. Поэтому когда мы входим с мороза в помещение, то сразу запотевают очки. Маска для подводного плавания при нырянии в воду быстро запотевает изнутри. Автомобилисты часто испытывают неудобства при запотевании изнутри окон в еще не разогретых автомобилях.

Чтобы не дать образоваться скоплению мельчайших капелек на холодном стекле, необходимо уменьшить поверхностное натяжение воды, из которой они состоят: тогда капельки сольются друг с другом, образуя пленку, которая снова сделает окно или очки прозрачными. Чтобы понизить поверхностное натяжение, можно просто натереть стекло куском мыла, а потом протереть тряпочкой. Кроме того, следу-

ет помнить, что в прохладную погоду окна автомобиля изнутри не будут запотевать, если воздух постоянно движется у внутренней поверхности стекла и стекла изнутри уже теплые.

Почему самолет в небе оставляет белый след

В турбинах самолета сгорает углеводородное топливо, а одним из продуктов горения является вода — ее пар, нагретый до высокой температуры. Горячий водяной пар, вылетая из сопла турбины, начинает конденсироваться. При этом образуется нитеобразное облако, состоящее из мельчайших кристалликов льда, так как температура на такой высоте ниже $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ (рис. 15.2). Иногда воздух на высоте бывает перенасыщен влагой, которая не может конденсироваться из-за отсутствия так называемых ядер конденсации — мельчайших частиц, например пыли. В таких случаях пролетающий самолет, оставляющий за собой частицы сажи (продукта неполного сгорания топлива), вызывает конденсацию перенасыщенных паров атмосферы. Поэтому по белому следу от летящего самолета можно судить о влажности воздуха в верхних слоях тропосферы, а значит, и о предстоящей погоде. Быстро исчезающий и едва заметный след говорит о том, что воздух на высоте сухой и погода будет безоблачной. Ну, а если белый след тянется через все небо, то следует ждать ухудшения погоды.



Рис. 15.2. Белый след за летящим самолетом

На фотографиях, сделанных со спутников, Земля во многих местах покрыта плотной белой сеткой следов от пролетевших самолетов. Было показано, что в некоторых случаях следы от летящего самолета превращаются в облака площадью от 4000 до $40\ 000\ \text{км}^2$, оказывая влияние на климат.

Чем опасны и полезны для человечества водяные пары

Водяные пары опасны тем, что относятся к так называемым парниковым газам. В отличие от остальных молекул воздуха (N_2 , O_2 и CO_2), молекула воды асимметрична (рис. 15.3). Поэтому она имеет постоянный дипольный момент, что делает ее спектр поглощения очень густым и сложным и дает возможность поглощать инфракрасное излучение в широком спектре частот. Это значит, что водяные пары, находясь

в атмосфере, свободно пропускают через себя солнечную коротковолновую радиацию с пиком длины волны около 0,6 мкм, но задерживают инфракрасное излучение Земли с длиной волны около 11 мкм.

Парниковый эффект водяного пара сравним с эффектом углекислого газа. Многие, однако, считают, что если бы парникового эффекта водяных паров не было, то наша планета никогда бы не отогрелась от космического холода. Температура на ее поверхности составляла бы около 30 °К, и жизни на ней, конечно, не было бы. Но в последнее время концентрация водяных паров в тропосфере неуклонно возрастает, и больше всего в тропических широтах, где каждые 10 лет она увеличивается на 13%. Происходит это из-за постепенного нагревания нашей планеты. Полезен же пар тем, что образующиеся из него облака отражают часть солнечного излучения, таким образом борясь с глобальным потеплением.

Как разгоняют облака

Наиболее плотные облака, защищающие нас от солнечного света и содержащие много влаги, находятся, как правило, на высоте 2—3 км и содержат много мельчайших (размером 10—100 мкм) капелек переохлажденной воды и кристалликов льда при температуре меньше -10 °С. Чтобы уничтожить облако, необходимо вызвать появление крупных капель (больше 1 мм) и кристаллов льда в тумане, состоящем из мельчайших капелек воды и кристалликов льда. Для этого в облаках распыляют микрочастицы, которые служат так называемыми ядрами для образования крупных капель и кристаллов. В качестве таких частиц часто используют иодид серебра, кристаллическая структура которого очень похожа на гексагональную структуру кристаллов льда, из-за чего адгезия кристаллов льда и капелек воды к частичкам иодида серебра велика. Поэтому в облаке к кристалликам иодида серебра прилипают молекулы воды, и, став тяжелыми, они начинают падать на землю, унося с собой часть облака.

Другой способ осаждения облака — его охлаждение. Для этого в облако забрасывают кристаллы сухого льда (СО₂), который, охлаждая облако, вызывает усиленную конденсацию с образованием крупных капель и кристаллов льда. Есть и другие методы борьбы с облаками. Например, можно разбрасывать в облаках микроскопические крупинки гигроскопических солей (NaCl или KCl), которые, попав в облако, будут притягивать к себе влагу и разбухать, становясь зародышами больших капель. Однако этот метод, как и использование цементной пыли для осаждения облаков, считается экологически небезопасным.

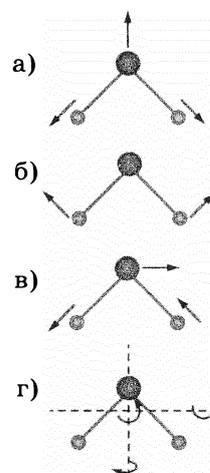


Рис. 15.3. Различные типы колебательных (а — в) и вращательных (г) движений молекулы воды. Стрелками показано направление движений атомов

Как искусственный туман помогает сельскому хозяйству

Наиболее эффективной технологией выращивания растений является метод зеленого черенкования, которым можно размножить растения — розы, хризантемы, виноград, многие плодовые и ягодные культуры и даже помидоры. Чтобы растение прижилось, влажность воздуха должна быть близка к 100%, так как зеленые черенки с листьями не имеют собственной корневой системы и влагу, а также питание они могут получить только через листья. Саженцы поэтому выращивают в теплицах, где время от времени распыляется вода, подаваемая под давлением в несколько десятков атмосфер и образующая туман, состоящий из капелек размером не более 30 мкм (рис. 15.4). Туман из более крупных капель быстро оседает.

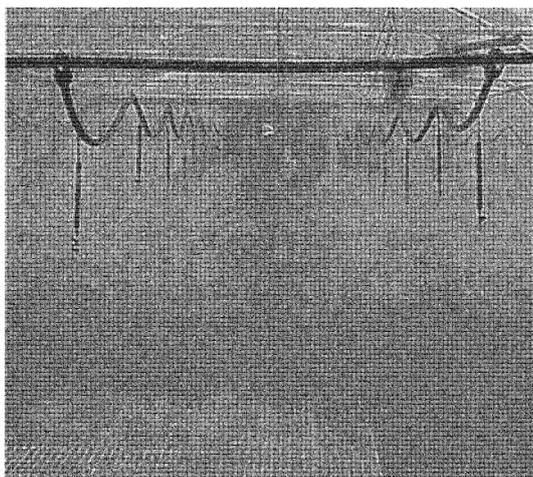
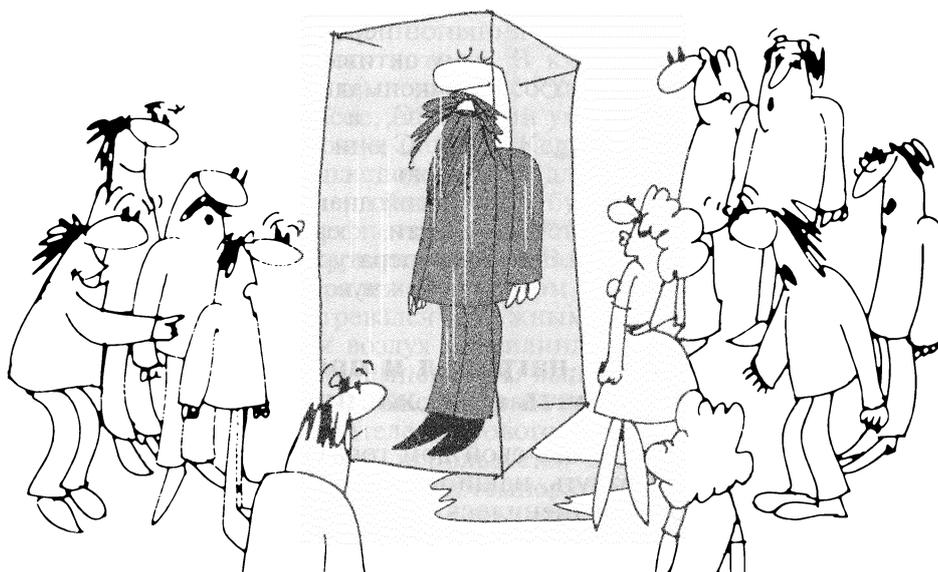


Рис. 15.4. Искусственный пар в теплице

Туман в теплице не только насыщает воздух влагой, но и может понижать температуру в ней на десять и более градусов. Это дает возможность использовать теплицы в условиях жаркого климата. Искусственный туман во время ночных заморозков при выращивании растений в открытом грунте сохраняет тепло, излучаемое землей, направляя его на их обогрев. Это происходит из-за того, что водяные пары интенсивно поглощают инфракрасное излучение.

Глава 16

Термодинамика вокруг и внутри нас



Жизнь возможна только при температуре окружающей среды от нескольких градусов ниже температуры замерзания чистой воды ($0\text{ }^{\circ}\text{C}$) до $40\text{--}50\text{ }^{\circ}\text{C}$ выше нуля. Чтобы сделать свою жизнь более комфортной и не испытывать переохлаждения или чрезмерного перегрева, человек носит одежду, нагревает свой дом зимой и охлаждает его летом. О том, как с точки зрения физики объяснить, что такое чувство холода и жары, что такое тепловые насосы и крионика, пойдет речь в этой главе.

Почему человек чувствует себя лучше, когда его температура около $37\text{ }^{\circ}\text{C}$

Человек чувствует себя хорошо, когда у него температура $36,6\text{ }^{\circ}\text{C}$. Но стоит температуре тела увеличиться или уменьшиться лишь на $1\text{ }^{\circ}\text{C}$, ему становится жарко или холодно. А если температура тела отклоняется от нормальной на $4\text{ }^{\circ}\text{C}$, то жизни человека грозит большая опасность. Такая чувствительность человека к температуре тела связана с тем, что самые важные химические реакции в организме происходят с участием ферментов — химических соединений, ускоряющих или замедляющих протекание этих реакций. Способность фермента влиять на скорость определенной химической реакции в первую очередь определяется пространственной структурой этой огромной молекулы. С изменением температуры пространственная структура

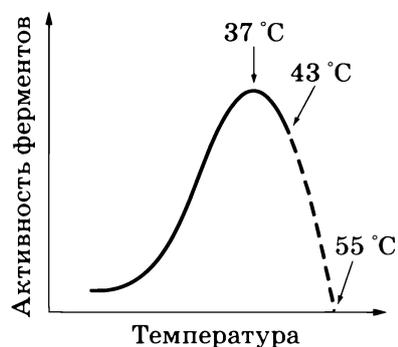


Рис. 16.1. Зависимость активности ферментов (скорости химических реакций с их участием) от температуры. Сплошная линия — обратимые изменения; штриховая — необратимые

молекулы фермента изменяется, и он перестает «работать». Поэтому активность многих ферментов максимальна при температуре 37 °C, а при нагревании выше 43 °C они уже необратимо теряют свою способность (рис. 16.1). Узкий диапазон температур активности ферментов и определяет температуру тела, при которой человек чувствует себя комфортно.

Как человек нагревал и продолжает нагревать свое жилище

Человек научился нагревать свой дом гораздо раньше, чем охладить его. Чтобы не замерзнуть, наши предки в пещерах разводили костры. С тех пор мало что изменилось. Просто большинство из нас не видит тех костров, которые день и ночь горят, чтобы в квартирах было тепло. А ведь тепло окружает нас со всех сторон. Просто надо уметь взять его и перенести в дом.

Как перенести тепло атмосферы и земли в дом

Если зимой внести немного воздуха или кусок земли с улицы домой, то в квартире теплее не станет. Однако можно поступить по-другому. Возьмем жидкость, например фреон-12 (CF_2Cl_2), и нальем ее (несколько миллилитров) в воздушный резиновый шарик, после чего шарик сразу завяжем веревкой, чтобы пары фреона не улетучились. Так как температура кипения фреона $-33\text{ }^\circ\text{C}$, то даже зимой на улице весь фреон испарится, и шарик надуется. При этом, испаряясь, фреон отбирает тепло у холодного воздуха. Теперь внесем воздушный шарик, наполненный парами фреона, в комнату и сожмем его. Когда давление внутри шарика увеличится настолько, что пары фреона начнут конденсироваться, то вся та энергия, которую получили на улице от холодного воздуха, выделится, и в комнате станет теплее. Потом, когда воздушный шарик остынет, можно опять вынести его на улицу, уменьшить давление внутри его и снова дожидаться, пока весь фреон испарится.

Таким образом, совершив работу над парами фреона, мы перенесли тепло от более холодного тела (воздух на улице) к более теплому (воздух в комнате). Такие устройства называют тепловыми насосами. Тепловые насосы могут закачивать внутрь помещения тепло не только атмосферы, но и грунта и находящихся рядом водоемов.

Тепловые насосы — холодильники наоборот

В обычных бытовых холодильниках решетка радиатора, находящаяся с задней стороны, всегда теплая, даже горячая. В принципе холодильник можно назвать тепловым насосом, откачивающим тепло из холодильной камеры в комнату или кухню. А вообще тепловые насосы — это холодильники, откачивающие тепло, например из незамерзающих глубин земли. На глубине 4—5 м и более температура грунта в течение года практически постоянна и соответствует среднегодовой температуре атмосферного воздуха. В климатических условиях средней полосы России эта температура составляет $+5...+8\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Первый тепловой насос, названный множителем тепла, был предложен Уильямом Томсоном (лордом Кельвином) в 1852 г. и представлял собой холодильник, используемый для отопления. Томсон считал, что ограниченность энергоресурсов в будущем не позволит сжигать топливо в отопительных печах. В качестве рабочего тела в тепловом насосе Томсона использовался воздух. Воздух засасывался из помещения в цилиндр, расширялся и при этом охлаждался, затем проходил теплообменник, где нагревался наружным воздухом. После сжатия до атмосферного давления воздух из цилиндра поступал в обогреваемое помещение нагретым до температуры выше первоначальной.

Современные тепловые насосы работают по схеме, изображенной на рисунке 16.2. В испарителе теплового насоса тепло земли, водоемов или окружающего воздуха используется для испарения хладагента (жидкости, кипящей при низкой температуре). Полученный пар сжимается компрессором. При этом температура пара повышается, и его

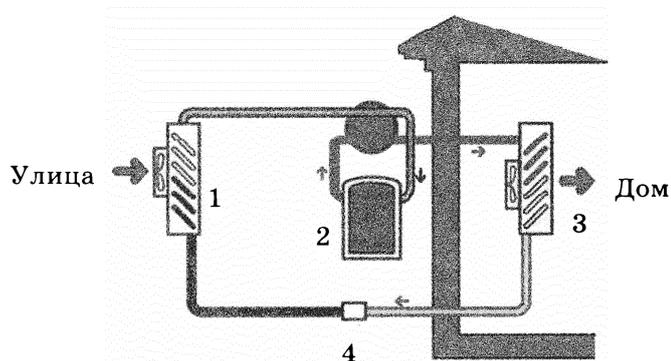


Рис. 16.2. Схема работы теплового насоса, выкачивающего тепло из наружного воздуха: 1 — теплообменник, находящийся на улице, в котором происходит испарение хладагента (например, фреона); 2 — компрессор, сжимающий пары хладагента, в результате чего увеличивается их температура; 3 — теплообменник, находящийся в помещении, в котором остывают пары хладагента, нагревая окружающий воздух; 4 — клапан (сужение), разделяющий зону высокого (справа) и низкого (слева) давления, через который жидкий хладагент медленно перетекает, попадая в наружный теплообменник 1

тепло в конденсаторе (теплообменнике внутри помещения) передается в систему отопления и горячего водоснабжения, а количество тепла, поставляемого потребителю, может в несколько раз превышать затраты энергии на привод компрессора.

Коэффициент преобразования холодильников и тепловых насосов

Отношение полученного тепла к работе, затрачиваемой на привод компрессора, называют коэффициентом преобразования теплового насоса. В наиболее распространенных теплонасосных системах он равен 3 и более. Попробуем понять, почему пользоваться тепловым насосом гораздо выгоднее, чем электрообогревателем, коэффициент преобразования которого равен 1.

Холодильник и тепловой насос — это двигатели, работающие наоборот, так как при совершении работы охлаждается более холодное тело и нагревается более теплое. Известно, что КПД идеального теплового двигателя (машины Карно), преобразующего количество теплоты Q , полученное от нагревателя, в работу A , равен:

$$\text{КПД} = \frac{A}{Q} = \frac{T_{\text{н}} - T_{\text{х}}}{T_{\text{н}}},$$

где $T_{\text{н}}$ и $T_{\text{х}}$ — температуры нагревателя и холодильника соответственно. Это значит, что если мы будем нагревать дом с помощью идеального теплового насоса, получая тепло от улицы при температуре $T_{\text{у}}$ и передавая дому количество теплоты Q при температуре $T_{\text{д}}$ дома, то его коэффициент преобразования КОП будет равен:

$$\text{КОП} = \frac{Q}{A} = \frac{T_{\text{д}}}{T_{\text{д}} - T_{\text{у}}} > 1.$$

Таким образом, нагревать комнату тепловым насосом гораздо выгоднее, чем электрическим камином, так как от земли или от холодного воздуха нам удастся получить в несколько раз большее количество теплоты, затрачивая одну и ту же энергию.

Сегодня тепловые насосы выпускаются мощностью от 2 кВт до 200 МВт. По оценкам специалистов, применение тепловых насосов позволит сократить потребление топлива (газ, мазут, уголь и т. д.) приблизительно на 40%, снижая загрязнение окружающей среды. По прогнозам Мирового энергетического комитета, к 2020 г. использование тепловых насосов во всем мире для отопления и горячего водоснабжения приблизится к 75%.

Можно ли зимой использовать тепло прошедшего лета

Оказывается, можно! В Австрии, Голландии и Великобритании тепло прошедшего лета используют зимой для подогрева дорожного покрытия, чтобы избежать его обледенения. Для этого под асфальт на глубину 12 см закапывают полиэтиленовые трубки диаметром 25 мм, располагая их на расстоянии 15 см друг от друга. Средняя тем-

пература грунта на этой глубине 12°C , но летом она поднимается до 25°C . Летом теплую воду из труб сливают в теплоизолированные накопители, закопанные рядом с дорогой. Зимой, как только температура дорожного покрытия понизится до 2°C , по трубам начинают пропускать теплую воду, предотвращая образование гололеда.

Почему мы носим свитер, а на коже появляются мурашки

Воздух является хорошим теплоизолятором и помогает нам сохранять тепло, но только если он неподвижен. При движении воздух отбирает у тела тепло. Толщина слоя неподвижного воздуха уменьшается при среднем ветре с 2–4 мм до 1 мм, а свитер увеличивает толщину этого слоя до 10 мм. При появлении мурашек волосы на коже «встают», что также утолщает слой неподвижного воздуха (рис. 16.3).

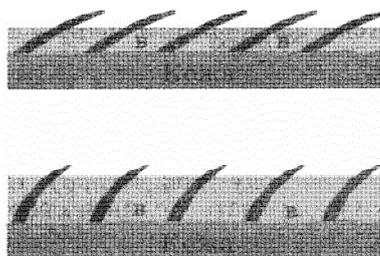


Рис. 16.3. Утолщение слоя неподвижного воздуха (δ) при появлении мурашек на коже

Почему мы дрожим от холода

Сокращение мышц не только дает возможность двигаться, но и снабжает нас теплом. Ведь мышцы не являются идеальными пружинами, которые, сжимаясь, хранят в себе энергию деформации, а при расслаблении совершают работу. Деформация мышц неупругая, и поэтому, сокращаясь и совершая работу, они одновременно служат источниками тепла. Выполняя среднюю физическую работу, мы разогреваемся, а мышцы, занимающие около 50% массы нашего тела, являются при этом источником около 75% всего тепла. Остальные 25% — это тепло, выделяющееся при различных биохимических реакциях. Когда мы дрожим от холода, наши мышцы беспорядочно сокращаются, и это позволяет согреться.

Как сохраняет тепло тюлень, плавая в Ледовитом океане

Моржи и тюлени плавают в холодной воде, температура которой около 0°C . Все тело у них покрыто толстым слоем подкожного жира, который служит хорошим теплоизолятором. Однако на ластах и хвосте, чтобы они были легкими и подвижными, жира нет, и их температура падает до $1\text{--}2^{\circ}\text{C}$ (рис. 16.4). Казалось бы, что через эти не покрытые жиром конечно-

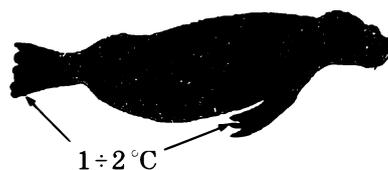


Рис. 16.4. Тюлень в ледяной воде

сти тепло должно уходить в окружающую ледяную воду, как через открытую форточку. Почему же тюлени не замерзают?

Кровь снабжает кожные покровы тюленя кислородом и, доставив его туда, возвращается обратно к сердцу. Но вместе с кислородом кровь выносит на поверхность тюленя и тепло, ведь глубоко внутри тела температура всегда $37\text{ }^{\circ}\text{C}$, поэтому кровообращение и служит одной из основных причин теплопотери. Однако мудрая природа так устроила систему кровоснабжения конечностей у тюленей, чтобы эти потери были минимальны.

Противоточная система: экономия тепла

Опустим в снег U-образную трубку и будем пропускать через нее горячую воду (рис. 16.5, а). Протекая через трубку, вода будет постепенно остывать, отдавая свое тепло холодному снегу, и поэтому температура воды, выходящей из трубки, будет всегда меньше первоначальной. Попробуем теперь сблизить половинки трубки так, чтобы они касались друг друга, а потоки воды, движущиеся в противоположных направлениях, могли обмениваться теплом. При такой противоточной системе движения жидкости вода будет остывать только в левой половинке трубки (рис. 16.5, б), двигаясь в глубь снегового слоя. Когда вода, сделав разворот, направится вверх, к ней начнет поступать тепло от более нагретой воды, текущей рядом вниз, и температура выходящей из трубки воды начнет постепенно увеличиваться. Таким образом, противоточное движение позволяет значительно уменьшить потери тепла, так как часть тепла отдается холодной воде, возвращающейся из снега обратно в тепло.

У тюленей и моржей кровоснабжение в конечностях противоточное. Это позволяет уменьшить потери тепла, так как часть тепла арте-

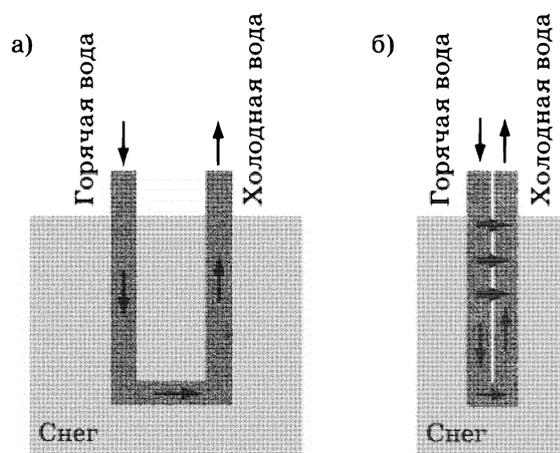
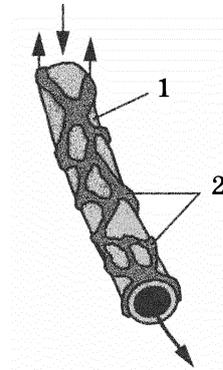


Рис. 16.5. Обычная система циркуляции воды через снег (а) и ее противоточный аналог, уменьшающий теплопотери. Стрелками показано движение воды и теплопередача

Рис. 16.6. Противоточная система кровоснабжения конечностей тюленя: 1 — артерия, несущая теплую кровь к холодному краю лапы; 2 — вены с кровью, текущей от холодного края лапы. Стрелками показано движение крови



риальной крови, текущей от сердца к периферии, отдается более холодной венозной крови, возвращающейся из отдаленной части лапы или хвоста. Хорошая теплопередача между артериями и венами объясняется тем, что вены просто оплетают артерии, несущие теплую кровь к конечностям тюленя (рис. 16.6).

Почему хомяк все время ест

Наблюдая за хомяками, поражаешься их прожорливости, о которой так много сказано в сказках и поговорках. За день хомяк, да и любой мелкий грызун, может съесть столько, сколько сам весит. В то же время масса ежедневного рациона слона составляет менее 1/10 его массы, хотя по калорийности пища слона почти не отличается от пищи грызуна, так как оба питаются исключительно растениями. От чего зависит количество пищи, необходимое животному для поддержания нормальной жизнедеятельности?

Известно, что постоянная температура тела у теплокровных животных поддерживается за счет выделения тепла при постоянно протекающих химических реакциях (процессы метаболизма). Подсчитано, что при потреблении организмом 1 м³ кислорода выделяется 20 МДж энергии. При этом количество освобожденной теплоты не зависит от вида пищи.

Пусть животное имеет форму шара радиусом R , а единица массы животного нуждается каждую секунду в кислороде объемом q м³. Тогда количество теплоты Q , освобождающееся каждую секунду в организме, составит

$$Q = 4/3 \cdot \pi R^3 \cdot \rho \cdot q \cdot 20 \cdot 10^6 \text{ Дж}, \quad (16.1)$$

где ρ — плотность тела животного.

Так как температура тела остается постоянной, то энергия, образующаяся в организме за счет метаболических процессов, должна равняться количеству теплоты, перешедшему от животного в окружающую среду. Известно, что количество теплоты Q_1 , переходящее в единицу времени от более нагретого тела к менее нагретому при их соприкосновении, пропорционально площади соприкосновения S , разнице их температур ΔT , теплопроводности среды между ними χ и обратно пропорционально толщине слоя этой среды Δx . Так как у нашего шарообразного животного $S = 4\pi R^2$, то

$$Q_1 = \chi \cdot 4\pi R^2 \frac{\Delta T}{\Delta x}. \quad (16.2)$$

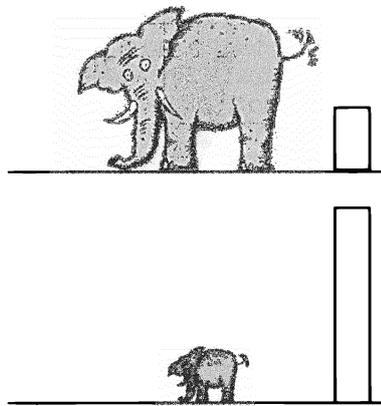


Рис. 16.7. Схематическое изображение двух подобных животных. Столбиком указано соответствующее количество теплоты, выделяемое каждым килограммом животного для поддержания постоянной температуры

Приравнивая количество теплоты, освобождающееся в организме при метаболических процессах (16.1), к количеству теплоты, теряемому телом через его поверхность (16.2), получаем

$$q = \frac{k}{R}, \text{ где } k = \frac{3\chi}{2 \cdot 10^7 \cdot \rho} \cdot \frac{\Delta T}{\Delta x}.$$

Можно считать, что при изменении размеров нашего шарообразного животного величина k остается постоянной, и значит, потребности единицы массы в кислороде q растут с уменьшением размеров животного. Так как масса шара $M = (4/3) \pi \rho R^3$, то q можно выразить и через M :

$$q = \frac{k}{R} = \frac{k}{\left(\frac{M}{\rho \cdot \frac{4}{3} \cdot \pi} \right)^{1/3}} \sim M^{-1/3},$$

откуда следует, что единице массы хомяка требуется кислорода гораздо больше, чем такой же единице массы слона. А так как весь кислород расходуется животным на окисление питательных веществ, то количество пищи, необходимое хомяку, в расчете на единицу массы тела должно быть гораздо больше соответствующего количества пищи для слона. Конечно, сделанное допущение о шарообразности животных несправедливо, но очевидно, что полученная формула для q будет справедлива и для всех подобных животных (рис. 16.7).

Для реальных животных и человека, как показали измерения, $q = 70 M^{-1/4} \frac{\text{ккал}}{\text{день} \cdot \text{кг}}$, что, например, соответствует 1509 ккал в день для человека массой 60 кг. Таким образом, только для поддержания постоянной температуры мы должны тратить на обогрев около 1500 ккал в день. Другими словами, человек — это лампочка мощностью около 75 Вт, так как в теле человека, даже когда он спит, протекают химические реакции с выделением тепла.

Почему человеку нужен искусственный холод и как его добыть

Искусственный холод часто необходим, чтобы защитить от перегрева наш организм. Кроме того, холод необходим для того, чтобы сохранить продукты свежими. Есть по крайней мере два способа охладить себя: 1) вылить себе на руку одеколон или спирт, которые при испарении забирают тепло у руки, а значит, охлаждают ее,

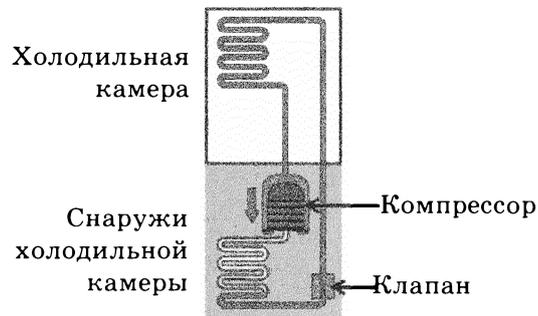


Рис. 16.8. Схема компрессионного холодильника

и 2) открыть баллончик со сжатым газом и направить струю на руку; в результате газ, расширяясь, охладится, и мы почувствуем рукой уменьшение его температуры. Оба эти способа были использованы в работе домашних холодильников, массовое производство которых началось с середины 1920-х гг.

Как работает обычный холодильник

Компрессионный холодильник (рис. 16.8) состоит:

- из насоса (компрессора), который создает область высокого давления в трубочках теплообменника снаружи холодильной камеры и область низкого давления в трубочках теплообменника холодильной камеры;
- из клапана (сужения), разделяющего эти две секции теплообменника;
- из хладагента с температурой кипения около $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$, переходящего из одной секции теплообменника в другую, а также из газового состояния в жидкое и обратно.

Каждые 15 мин в холодильнике что-то шелкает и раздается шум работающего двигателя. Это насос компрессора начал очередной цикл работы:

- сжимается газ, находящийся во внешнем теплообменнике, и его давление и температура увеличиваются;
- двигаясь по внешнему теплообменнику, газ остывает, нагревая воздух в комнате;
- и наконец, температура газа падает настолько, что часть газа конденсируется в жидкость;
- высокое давление перед клапаном вбрызгивает капельки жидкого хладагента в секцию теплообменника, находящуюся под низким давлением, где хладагент начинает кипеть, испаряясь и понижая температуру холодильной камеры.

Холодильник А. Эйнштейна

В компрессионном холодильнике движущиеся части электродвигателя являются источником шума. Они-то и уменьшают надежность его работы. Интересно, что у истоков создания холодильника, не со-

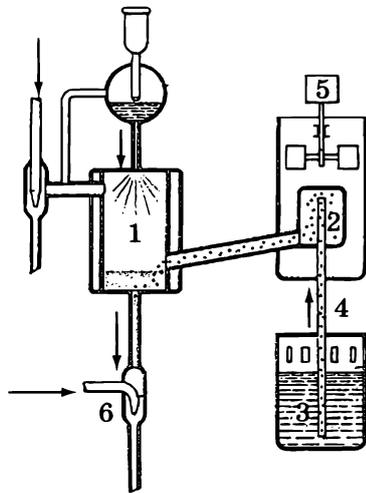


Рис. 16.9. Схема одного из холодильников, предложенных А. Эйнштейном и Л. Сциллардом. Давление воды, вытекающей из крана (см. вертикальную стрелку в левой верхней части), создает, по закону Бернулли, в колбе 1 давление меньше атмосферного. В результате жидкий метанол из сосуда 3 поднимается по трубке 4 и испаряется, понижая температуру воздуха в сосуде 2, в результате чего охлаждается контейнер 5, где может, например, находиться мороженое. Далее метанол вместе с водой смывается в водопровод с помощью второго водоструйного насоса 6

Сциллард. В 20-х гг. прошлого века они предложили сразу несколько типов таких холодильников. Придумать новый тип домашнего холодильника Эйнштейна побудила статья в газете, где рассказывалось, как большая семья умерла от отравления аммиаком, который вытек из неисправного компрессионного холодильника. Два их патента были куплены фирмой Electrolux, которая до сих пор производит холодильники. К сожалению, приход к власти фашистов, а потом Вторая мировая война помешали воплощению этих проектов, так как Эйнштейн иммигрировал в США, а Сциллард — в Англию.

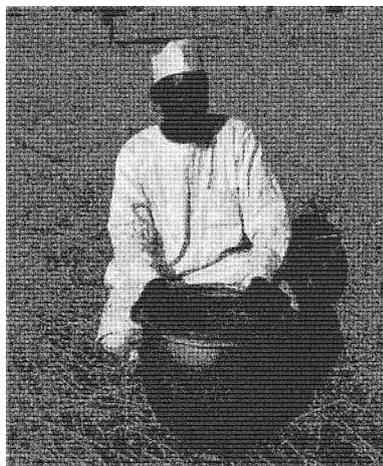


Рис. 16.10. Примитивный холодильник, состоящий из двух глиняных горшков с влажным песком между ними

держашего подвижных частей (рис. 16.9), стояли два известных физика — Альберт Эйнштейн и Лео

Самый примитивный холодильник

Одним из самых простых и надежных холодильников, который до сих пор используется коренным населением африканских пустынь, являются два глиняных горшка, вложенные друг в друга (рис. 16.10). Пространство между горшками заполняется мокрым песком, а влага, медленно испаряясь, охлаждает внутренний горшок, заполненный, например, овощами. В таком холодильнике можно хранить овощи достаточно долго.

Крионика и коварные кристаллы льда

Крионика — наука о сохранении биологических объектов путем их заморозки — относительно молода, ей нет еще и 50 лет. Ученые считают, что при низких температурах тело подвержено лишь очень незначительным изменениям и поэтому может сохраняться неопределенно долгое время.

Некоторые холоднокровные животные (тритоны, лягушки и рыбы), помещенные в лед, легко переносят заморозку и после разморозки чувствуют себя хорошо. Некоторые теплокровные животные также способны переносить холод, впадая в длительную спячку. Но сложность их замораживания заключается в том, что при температуре ниже 0 °С вода внутри клеток превращается в кристаллы льда, и они разрывают ткани. Для предотвращения разрыва тканей во время охлаждения применяют специальные вещества — криопротекторы.

Глицерин — лекарство от замерзания у насекомых и лягушек

Глицерин в высокой концентрации содержится в гемолимфе (крови) насекомых, и с этим связывают их способность выживать при низких температурах. Свойство глицерина быть хорошим криопротектором широко используется в биологии и медицине. Эритроциты (красные клетки крови) в замороженном состоянии можно хранить без повреждения много месяцев, если предварительно погрузить их в глицерин. Так, у замороженных до температуры -14°C хомячков, в кровь которых был добавлен глицерин, исчезали все признаки жизни, и они становились совершенно твердыми. Однако, пробыв около часа в таком состоянии, они оттаивали и возвращались к жизни.

Мгновенная заморозка — универсальный криопротектор

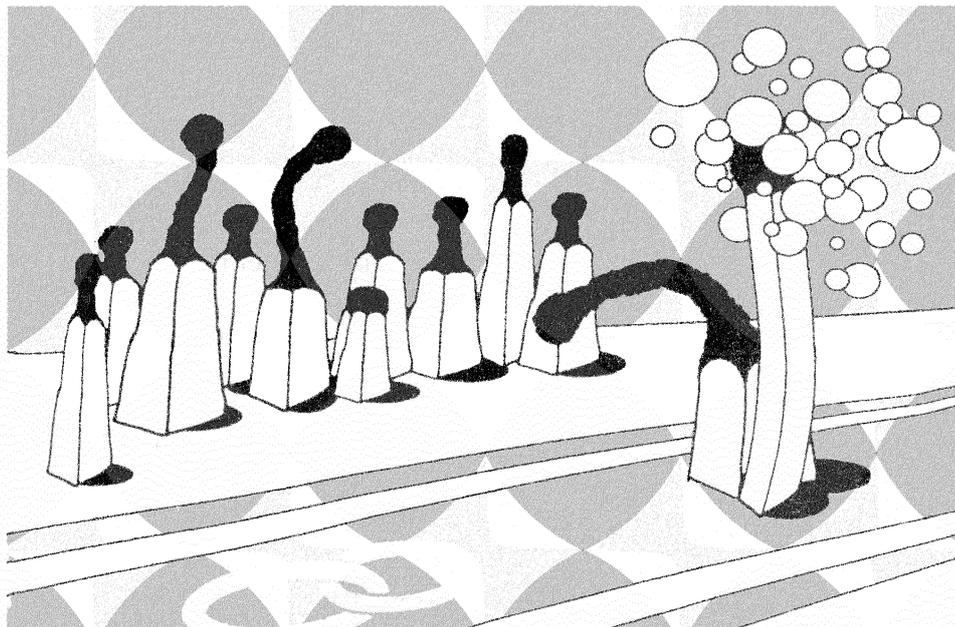
Охладить до очень низких температур и не дать образоваться кристаллам льда можно даже тогда, когда не удастся окружить все клетки глицерином. Для этого нужно резко замедлить диффузию молекул воды, чтобы предотвратить их соединение в кристаллы льда. Если очень быстро понизить температуру воды, то молекулы застынут, так и не образовав кристаллов. Вода при такой заморозке превратится в стекловидное тело. Действительно было установлено, что при заморозке со скоростью $1-10^{\circ}\text{C}$ в секунду можно обойтись и без криопротекторов.

А если увеличить давление

Эта идея основана на понижении температуры фазового перехода вода — лед при повышении давления. Так, например, при давлении 2045 атм температура кристаллизации чистой воды составляет -22°C . Значит, при таком давлении можно охлаждать, например, до температуры -20°C , не боясь образования кристаллов льда.

Глава 17

Игры с огнем



Явления, наблюдаемые при горении свечи, таковы, что нет ни одного закона природы, который при этом не был бы так или иначе затронут.

М. Фарадей. Истории свечи

Горение — это один из основных физико-химических процессов, который сопровождает человечество на пути его прогресса. При горении выделяется энергия, которая используется в быту, промышленности, автомобильном транспорте и теплоэлектростанциях. В то же время оно порождает пожары и делает атмосферу загрязненной, приближая глобальное потепление. Изучение процесса горения необходимо для более эффективного расходования углеводородного топлива и защиты от опустошительных пожаров.

Что мешает изучать горение на Земле

Несмотря на важную роль горения в нашей жизни, изучено оно явно недостаточно. И для этого есть причина — притяжение Земли, из-за которого при горении возникает конвекция (движение воздуха) — нагретый воздух становится легче и устремляется вверх, а холодный снизу приходит ему на смену. Этот поток воздуха приводит к

значительному изменению температуры вдоль пламени (рис. 17.1) и усложняет исследование процесса горения. Поэтому в условиях невесомости изучать горение легче.

Как горит падающая свеча

Еще в 1940 г. советский ученый Я. Б. Зельдович предложил математическую модель горения газовой горючей смеси в невесомости. Оказалось, что в этих условиях горение газовой смеси должно происходить в изолированных друг от друга газовых шариках. При этом кислород и топливо поступают в каждый из шариков только посредством диффузии, и поэтому температура горения в невесомости должна быть ниже, чем в обычных условиях. Только в начале 1990 гг. теория Зельдовича была подтверждена экспериментально.

Для имитации невесомости построили гигантскую (высотой более 100 м) трубу, внутри которой откачивали воздух, а сверху бросали капсулу-лабораторию (рис. 17.2). Как только начина-

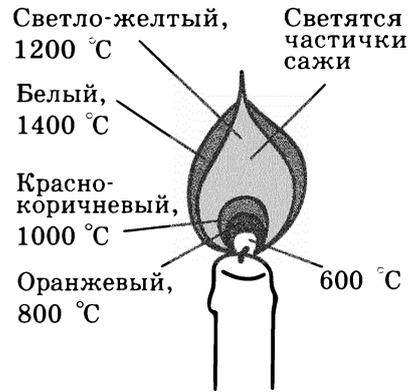


Рис. 17.1. Схематическое изображение пламени свечи и температур в различных точках пламени при горении в нормальных условиях

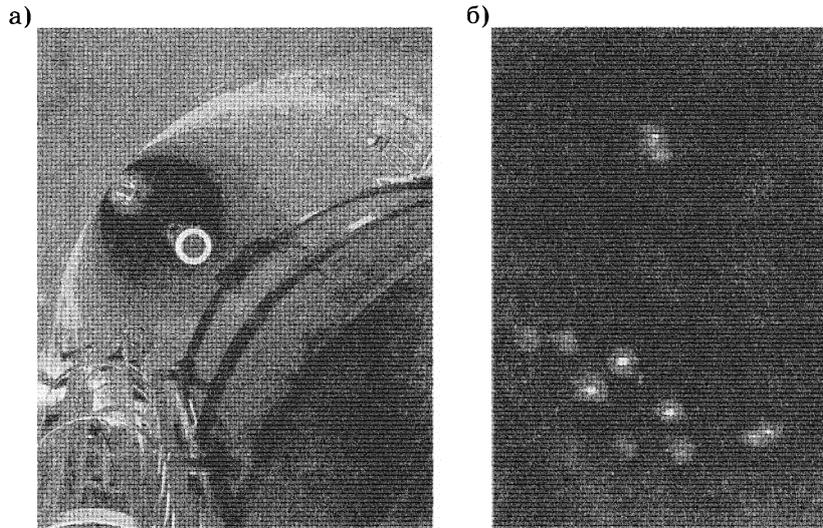


Рис. 17.2. а) Падение капсулы с горючей смесью внутри вертикальной трубы, в течение которого изучают, как влияет невесомость на горение; б) мельчайшие горящие газовые шарики, на которые распадается пламя в невесомости

лось падение, длящееся около 5 с, в капсуле с горючей газовой смесью загоралось пламя, рассыпающееся на много шариков диаметром от 1 до 10 мм. Горение шариков фиксировали с помощью находящихся внутри видеокамер. Это шарообразное пламя до сих пор служит моделью для изучения процесса горения. Пламя горящей свечи при падении тоже резко изменялось, превращаясь из вытянутого вверх в шарообразное.

Зачем в космосе играют с огнем

В 1996 г. на космической станции «Мир» были проведены эксперименты по сжиганию свечей. Оказалось, что свеча, полностью сгорающая на Земле за 10 мин, на станции может гореть в течение 45 мин. Однако пламя было очень слабым и голубоватым, и его даже нельзя было заснять на видеокамеру. Поэтому, чтобы доказать существование процесса горения, пришлось вносить в пламя свечи кусочек воска и снимать его плавление.

Процесс горения в условиях невесомости может поддерживаться только за счет молекулярной диффузии или искусственной вентиляции. Без вентиляции тепловое излучение очага горения лишь охлаждает его и в конце концов может остановить процесс, не оставляя даже дыма. В обычных же условиях тепловое излучение служит положительной обратной связью, поддерживающей горение. Поэтому для прекращения пожара в невесомости достаточно выключить вентиляцию и немного подождать.

Светло-желтый цвет верхушки пламени в обычных условиях обусловлен свечением частичек сажи, уносимых вверх поднимающимся потоком горячего воздуха. Сажа — это микрочастицы, содержащие углерод, не успевший сгореть, т. е. превратиться в CO_2 . В невесомости пламя свечи имеет меньшие размеры и горит при более низкой температуре, чем при обычных условиях, так как нет достаточного притока воздуха, содержащего кислород. Поэтому сажи очень мало, так как она не образуется при температуре меньше 1000°C . Но даже если бы ее и было достаточно, то и тогда из-за низкой температуры она была бы источником инфракрасного излучения. Значит, цвет у пламени в невесомости всегда голубоватый (рис. 17.3).

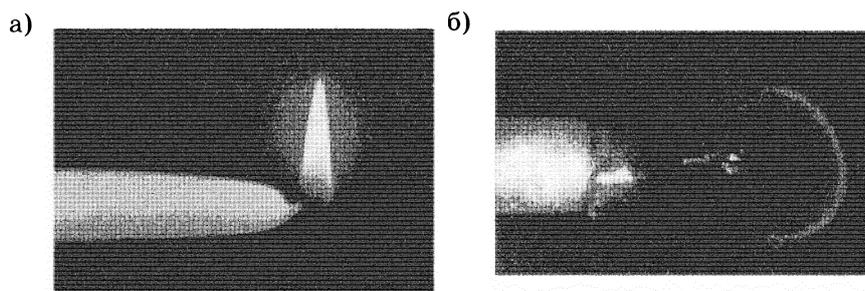


Рис. 17.3. Горение свечи: а) на Земле; б) в невесомости

Из-за того, что в невесомости нет восходящего движения воздуха, пламя имеет шарообразную форму. По той же причине свеча в невесомости горит практически без дыма. В невесомости из-за низкой температуры горения образуется меньше паров стеарина (или парафина), поэтому и свеча светит слабо, и быстрее сгорает фитиль. Таким образом, свеча в невесомости должна быть сделана из состава, имеющего более низкую температуру плавления, и несгораемого фитиля, например из асбеста.

Изучение процессов горения было продолжено на космических челноках и продемонстрировало: шарики из газовой смеси горят, выделяя так мало энергии (меньше 1 Вт), что горение каждого из них может продолжаться несколько часов. При этом потери энергии на тепловое излучение компенсируются выделением энергии, происходящим при сгорании газовой смеси, которая поступает в шарики посредством диффузии из окружающей среды. В отличие от обычных условий огонь в невесомости «не хочет» распространяться. Более того, горящие по соседству шарики всегда отталкиваются друг от друга, так как между ними концентрация топлива и окислителя меньше, а горение распространяется всегда в ту сторону, где концентрация больше. А в 1997 г. на станции «Мир» случился пожар, который, к счастью, удалось потушить. И все-таки на Международной космической станции предусмотрено создание специальной лаборатории по изучению процессов горения, так как научиться управлять горением, экономя при этом на топливе, — мечта конструкторов тепловых двигателей и всего человечества.

Почему сгоревшая спичка изогнута

Если зажженную спичку держать горизонтально, то по мере передвижения язычка пламени ее сгоревшая часть будет изгибаться вверх (рис. 17.4). Причиной изгиба сгоревшей спички служит вертикальное движение воздуха в области горения, в результате которого устанавливается направленный снизу вверх температурный градиент. Поэтому верхняя часть горячей спички нагревается до более высокой температуры, чем нижняя. При горении масса и объем спички уменьшаются, и чем больше температура горения, тем более заметны эти изменения. Значит, верхняя часть горячей спички должна укорачиваться в большей степени, чем нижняя, и поэтому сгоревшая часть горизонтально горячей спички загибается вверх. Этому также способствует поток воздуха вблизи горячей спички, направленный всегда снизу вверх.

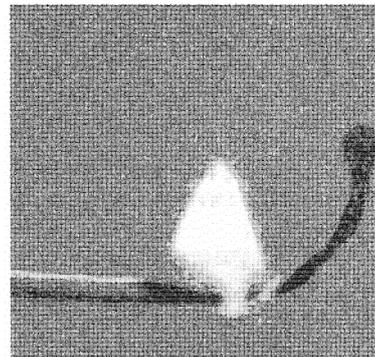


Рис. 17.4. Горизонтально расположенная спичка при горении загибается вверх

От чего зависит цвет пламени

Цвет пламени зависит от того, какие элементы в нем сгорают. Высокая температура пламени дает возможность атомам перескакивать на некоторое время на более высокие энергетические состояния, а по-

том, возвращаясь в исходное состояние, излучать свет определенной частоты, которая соответствует структуре электронных оболочек данного элемента. Газовая горелка горит голубым пламенем из-за наличия СО, угарного газа. Желто-оранжевое пламя спички объясняют наличием в древесине солей натрия. Атомы меди придают пламени ярко-зеленый цвет, который иногда воспринимается нами как белый. Алюминий и железо не обладают выраженной способностью окрашивать пламя.

Как обнаружить пожар

Суть любого метода обнаружения пожара — раннее обнаружение возгорания. Постоянными спутниками пожара являются высокая температура и дым. Поэтому в качестве детекторов пожара используют устройства, измеряющие температуру и/или уровень задымленности. Эти датчики помещают на потолке, так как горячий воздух, содержащий частицы дыма от очага возгорания, всегда устремляется вверх.

В помещениях, где много пыли и дыма от работающих двигателей и хранятся легковоспламеняющиеся жидкости (автомобильные гаражи), очевидно, не следует пользоваться детекторами дыма для предотвращения пожара, так как они будут давать ложные сигналы. Поэтому в таких местах более уместен температурный датчик, обычно настроенный на температуру 60 °С. Как правило, такие датчики представляют собой биметаллический контакт, замыкающийся при нагревании и включающий пожарную сирену или другие устройства оповещения. Этот тип датчика пожарной сигнализации один из самых старых и часто срабатывает уже тогда, когда пожар успевает разрастись до угрожающих размеров.

В большинстве случаев при выборе типа детектора пожарной сигнализации предпочтение отдается дымовому датчику, так как пожар обычно сопровождается выделением большого количества дыма, и именно этот тип детектора способен предупредить людей в здании об

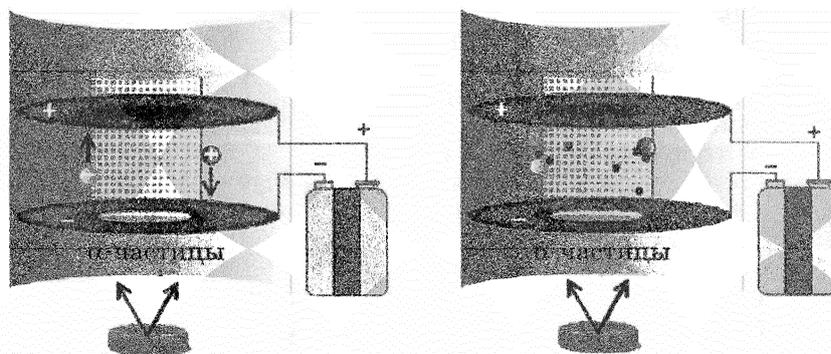


Рис. 17.5. Работа ионизационного датчика дыма: а) в отсутствие дыма ионы воздуха движутся между электродами; б) частицы дыма (черные малые кружки), связываясь с ионами, нейтрализуют их заряд, увеличивая сопротивление между электродами

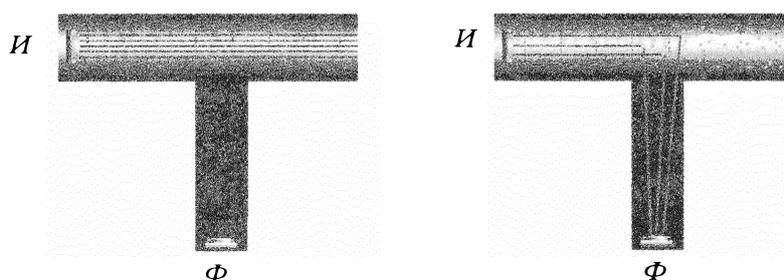


Рис. 17.6. Работа оптического датчика дыма: *а)* в отсутствие дыма лучи света распространяются прямолинейно от источника *И*; *б)* частицы дыма (серые точки) рассеивают лучи света, поворачивая часть из них на 90° , что регистрируется фотодетектором *Ф*

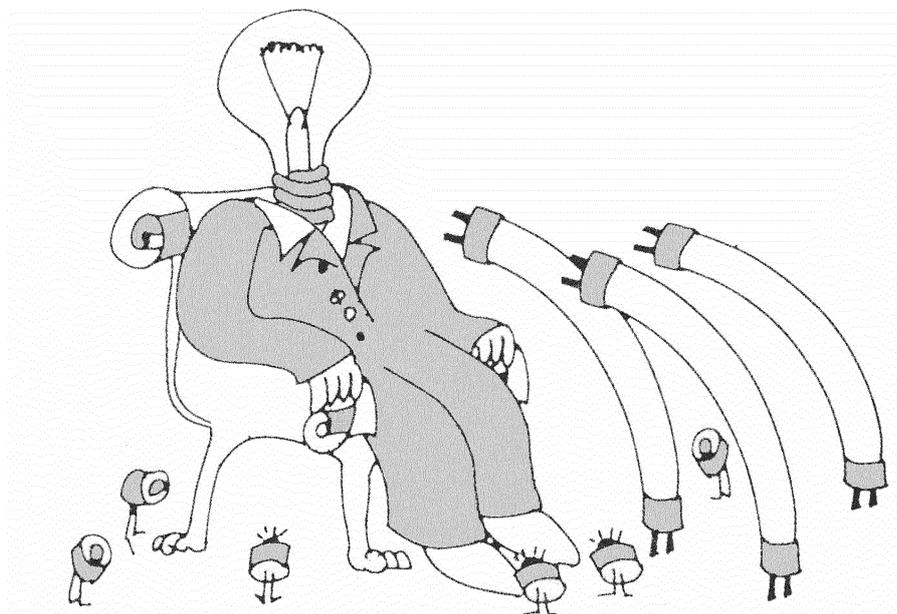
опасности. В дымовых датчиках используют ионизацию или фотоэлектрический принцип для обнаружения дыма в воздухе.

В ионизационных детекторах дыма используется источник радиоактивного (альфа-) излучения (как правило, америций-241, ^{241}Am), ионизирующий воздух между металлическими пластинами-электродами, электрическое сопротивление между которыми постоянно измеряется с помощью специальной схемы (рис. 17.5). Оказывающиеся между пластинами микрочастицы дыма связываются с ионами, нейтрализуют их заряд и увеличивают таким образом сопротивление между электродами, на что реагирует электрическая схема, подавая сигнал тревоги. Датчики, устроенные по этому принципу, демонстрируют весьма впечатляющую чувствительность, реагируя еще до того, как самый первый признак дыма обнаруживается живым существом. Следует отметить, что никакой опасности для человека этот источник радиации не представляет, так как альфа-лучи не могут пройти даже через лист бумаги и полностью поглощаются слоем воздуха толщиной в несколько сантиметров.

Известно, что при увеличении влажности электропроводность воздуха растет. Поэтому недостатком ионизационного детектора является его чувствительность к влажности окружающего воздуха. Этого недостатка лишен самый распространенный датчик дыма — оптический, в котором используется то, что частицы дыма рассеивают свет, проходящий через воздух (рис. 17.6). Поэтому интенсивность рассеянного света может служить показателем задымленности воздуха.

Глава 18

О лампочках — и не только



Освещенные окна домов и улицы... Огни рекламы и проносащихся мимо автомобилей... Все это приметы нашей цивилизации. Искусственное освещение сделало человека менее зависимым от солнечного света. Держа в руках горящий факел, люди могли передвигаться по ночам и устраиваться на ночлег в глубине пещер, где до сих пор находят наскальные рисунки. Свет факелов продлил «рабочий день» первобытных людей, сделав его более продуктивным и способствовав, таким образом, прогрессу человечества. С тех пор прошло несколько тысяч лет, но и сейчас, сами того не замечая, мы продолжаем использовать факелы, ведь слово «лампа» в переводе с греческого означает «факел».

Известные и неизвестные имена в ламповом семействе

Как выбрать подходящую лампу? Почему они такие разные по виду и цене? И вообще, чем они отличаются друг от друга?

Существуют два основных типа ламп: лампы накаливания, источником света в которых служит раскаленная металлическая нить (спираль), и газоразрядные, свет в которых возникает из-за электрического разряда в лампах, наполненных различными газами.

Однако и лампы накаливания бывают разные: аргоновые, криптоновые, ксеноновые, галогенные и кварцево-галогенные. В свою оче-

редь, газоразрядные лампы подразделяются на те, у которых газ внутри находится под низким давлением (лампы дневного света или люминесцентные, ультрафиолетовые и так называемые неоновые лампы рекламных огней), и на те, у которых газ внутри находится под высоким давлением (ртутные паросветные лампы, натриевые дугоразрядные и металлогалогенные лампы).

Инертный газ внутри ламп накаливания

Зачем нужен инертный газ в лампах накаливания? Представим себе, что одна из молекул вольфрама, находящаяся на поверхности раскаленной нити, получив от соседних молекул достаточную энергию, покидает эту поверхность, но сразу же сталкивается с подлетающей к нити молекулой газа. Очевидно, что результатом такого столкновения будет возвращение молекулы вольфрама обратно на поверхность нити. Значит, присутствие газа в лампе накаливания должно замедлять испарение вольфрама. Это с одной стороны. С другой стороны, чтобы вольфрам не потерял свое уникальное свойство — быть самым тугоплавким металлом, этот газ не должен вступать с ним в химическую реакцию, т. е. быть инертным. Но какой инертный газ выбрать?

Выбирая инертный газ для ламп накаливания, учитывали его свойства и доступность (цену). Радон, являясь продуктом радиоактивного распада радия, обладал радиоактивностью, и поэтому сразу же был исключен. Гелий (массовое число 4) был чересчур легким для того, чтобы отталкивать испаряющиеся атомы вольфрама (массовое число 184) обратно на поверхность нити. Неон (массовое число 20) хотя и был тяжелее гелия в 5 раз, но стоил в 10 раз дороже. Концентрация аргона (массовое число 36) в атмосфере около 1%, и поэтому он является самым дешевым из инертных газов. Концентрация криптона в атмосфере Земли в 7000 раз меньше, а ксенона в 200 000 раз меньше, чем аргона, что делало их производство очень дорогим. Все это на долгое время определило выбор изготовителей ламп накаливания — аргон.

Однако со временем новые технологии сделали производство криптона (массовое число 72) и ксенона (массовое число 108) относительно дешевым, что позволило использовать криптон вместо аргона при заполнении ламп накаливания. Как и следовало ожидать, срок службы у ламп, наполненных криптоном, был больше, чем у аргоновых. Кроме того, криптоновые лампы позволяют увеличить температуру накаливания вольфрамовой нити, сохраняя тот же срок службы, что и у аргоновых. В результате яркость криптоновых ламп может быть на 10% выше, чем яркость аргоновых той же мощности.

Галогенная лампа — современный предел для лампы накаливания

Лампа накаливания, даже наполненная криптоном, обладает рядом недостатков. Один из них — относительно большие размеры. Если уменьшить размеры, приблизив стекло к спирали, то стекло расплавится. Можно, конечно, вместо обычного стекла использовать кварцевое, температура плавления которого гораздо выше. Однако только

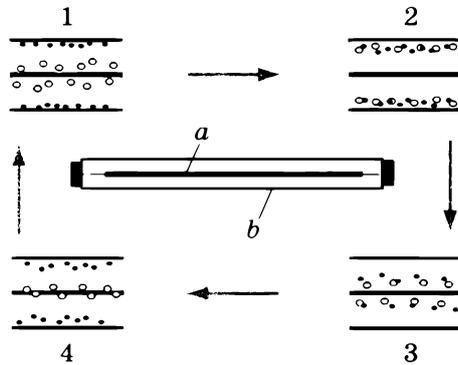


Рис. 18.1. Схема галогенного цикла, в результате испарившиеся атомы вольфрама (большие кружки), взаимодействуя с атомами галогена (малые кружки), возвращаются на раскаленную спираль лампы: 1—4 — последовательные этапы галогенного цикла; а — вольфрамовая нить, б — цилиндрическая колба лампы, сделанная из тугоплавкого стекла или кварца

замена обычного стекла на кварцевое не позволяет получить компактную лампу накаливания. Испаряющийся вольфрам, осаждающийся на меньшую поверхность лампы, быстро затемняет ее, блокируя свет, идущий от раскаленной нити.

В 1958 г. в компании General Electric было найдено технологическое решение, так называемый галогенный цикл, с помощью которого можно удалить с внутренней поверхности стекла осевшие атомы вольфрама. Чтобы галогенный цикл заработал, лампу накаливания надо заполнить смесью инертного газа (аргона или криптона) и газа-галогена (например, брома), а поверхность стекла приблизить к раскаленной нити так, чтобы его температура стала выше $200\text{ }^{\circ}\text{C}$. Галогенный цикл (рис. 18.1) работает следующим образом:

1) испарившаяся молекула вольфрама движется по направлению к стеклу лампы и осаждается на нем; 2) находясь на поверхности лампы, атом вольфрама образует молекулу с атомом брома и переходит в газообразное состояние; 3) молекула вольфрам — бром движется с конвективными потоками газа и сталкивается с раскаленной спиралью лампы; 4) оказавшись на спирали, соединение вольфрама и брома диссоциирует (распадается) на вольфрам, оседающий на спирали, и бром, попадающий в газ, наполняющий лампу.

Таким образом галогенный цикл очищает внутреннюю поверхность стекла от осаждающихся молекул вольфрама и одновременно восстанавливает целостность вольфрамовой нити. Поэтому использование галогенного цикла

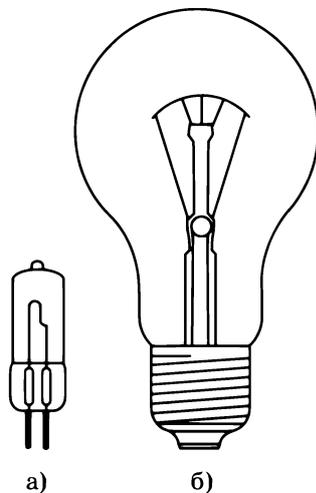


Рис. 18.2. Миниатюрная галогенная лампа (а) и обычная лампа накаливания (б)

позволяет не только уменьшить размеры ламп накаливания, что делает их незаменимыми в качестве источника света в автомобильных фарах, но и поднять температуру нити с 2500 до 3000 °С. В результате галогенные лампы обладают не только удвоенным ресурсом работы (2000 ч), но и увеличенной на 20% яркостью по сравнению с обычными лампами накаливания такой же мощности. Иными словами, галогенные лампы экономят энергию, расходуемую на освещение. Галогенные лампы могут иметь различную форму, но их размеры, как правило, меньше, чем у обычных ламп накаливания (рис. 18.2).

Газоразрядная лампа: светит, но не греет

Главным недостатком ламп накаливания является то, что большая часть энергии, расходуемой на освещение, идет на нагрев ламп. Даже в самых экономичных галогенных лампах только 10% затраченной энергии превращается в свет, а остальные 90% — в тепло. Однако можно получить свет из электричества с помощью электрического разряда. Электрический дуговой разряд в воздухе впервые описал В. В. Петров в 1802 г. Ослепительно яркий свет электрической дуги тогда давал надежду, что со временем люди смогут отказаться от свечей, лучины, керосиновой лампы и даже газовых фонарей. В первых дуговых светильниках постоянно приходилось сдвигать поставленные напротив друг друга угольные электроды, и поэтому они достаточно быстро выгорали. В 1875 г. П. Н. Яблочков предложил надежное и простое решение. Он расположил угольные электроды параллельно, разделив их изолирующим слоем. Изобретение имело колоссальный успех, и свеча Яблочкова, или русский свет, нашла широкое распространение в Европе. Свеча Яблочкова, ставшая первой серийно выпускаемой газоразрядной лампой, по сравнению с лампами накаливания Эдисона обладала двумя преимуществами: белым светом, а не желтоватым, и большей яркостью. Поэтому свеча Яблочкова в течение многих лет использовалась в кинопроекторах, пока не появились более совершенные источники света — ксеноновые и галогенные лампы. Свечу Яблочкова можно считать бабушкой всех современных газоразрядных ламп.

Ну, а папой современных ламп дневного света (или люминесцентных ламп) стал американский изобретатель П. Хьюит, предложивший в 1903 г. в качестве источника света использовать электрический разряд между электродами в стеклянной лампе, заполненной парами ртути. Позже установили, что большая часть излучения дуговой лампы Хьюита — ультрафиолетовая, т. е. не видимая для глаза человека. Чтобы сделать ее видимой, предложили покрывать лампы Хьюита изнутри веществом-люминофором, которое поглощало бы ультрафиолетовое излучение, а взамен излучало бы видимое. Сначала для этого выбрали бериллий, но он оказался очень токсичен (особенно для легких), а потом остановились на фосфоре. Покрытые изнутри фосфором лампы Хьюита получили название люминесцентных и стали широко использоваться в освещении с 1938 г. Основными преимуществами люминесцентных ламп по сравнению с лампами накаливания стали их гораздо больший световой выход (доля энергии, превращаемой в свет, достигала 40%) и увеличенный в 6 раз рабочий ресурс — продолжительность работы лампы до того, как она выходит из строя. А это значит, что люминесцентные лампы более долговечны и экономичны по сравнению с лампами накаливания. К со-

жалению, у люминесцентных ламп, как и у всех газоразрядных, есть и недостатки — они дороже, их нельзя сделать очень маленькими, а в качестве источника электрического напряжения нельзя использовать низковольтные (1,5—12 В) батарейки или аккумуляторы.

Почему лампы дневного света так сложно устроены

Из-за мигания при включении и гудении при работе использование дома ламп дневного света весьма проблематично. Однако современные модели люминесцентных ламп лишены этих недостатков. Но сначала разберемся, как работает обычная люминесцентная лампа, имеющая форму длинной цилиндрической трубки (рис. 18.3).

Как видно из рисунка, лампа дневного света — это электрический прибор, состоящий из собственно лампы 4, которая светится, когда внутри ее происходит электрический разряд, стартера 5, разогревающего электроды лампы перед возникновением разряда, и дросселя 6, ограничивающего электрический ток через лампу.

Чтобы в газоразрядной лампе возник электрический разряд, напряжения сети 220 В между ее электродами недостаточно, так как газ внутри лампы, состоящий из смеси аргона и паров ртути (1%), не является проводником электричества. Условием возникновения разряда является ионизация этого газа, т. е. расщепление части атомов газа на электроны и положительно заряженные ионы. Делается это с помощью стартера, который на короткое время (1—2 с) включает нагрев металлических электродов (вольфрамовых спиралей), находящихся в противоположных частях лампы. Как только электрод нагревается, часть электронов испаряется с его поверхности и под действием электрического поля начинает двигаться к противоположному электроду, время от времени сталкиваясь с атомами газа. Столкновение летящего электрона с нейтральным атомом газа вызывает ионизацию последнего, в результате чего число свободных электрических зарядов увеличивается, в лампе возникает электрический разряд, а из-за столкновения заряженных частиц с атомами ртути происходит ультрафиолетовое свечение. После возникновения электрического разряда подогревать электроды уже не нужно, так как электрический разряд сам поддерживает необходимый уровень ионизации.

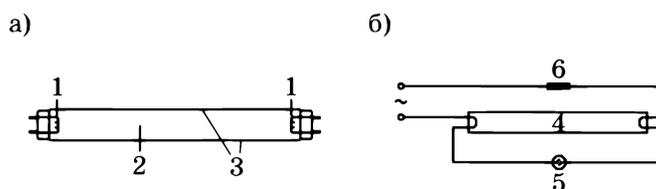
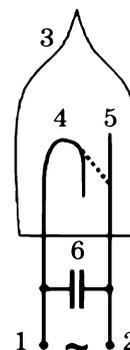


Рис. 18.3. Устройство люминесцентной лампы (а) и подключение ее к сети (б): 1 — вольфрамовые спирали; 2 — смесь паров ртути и аргона, заполняющая лампу; 3 — люминофор (фосфор), покрывающий внутреннюю поверхность лампы; 4 — лампа в схеме подключения; 5 — стартер; 6 — дроссель

Рис. 18.4. Схематическое изображение внутреннего устройства стартера люминесцентной лампы: 1, 2 — электрические контакты стартера; 3 — стеклянный баллон неоновой лампы; 4 — электрод неоновой лампы, изогнутый в виде перевернутой буквы U (∩); 5 — другой электрод неоновой лампы; 6 — электрический конденсатор. Штриховой линией обозначено положение конца разогретого электрода 4 неоновой лампы



Стартер представляет собой тумблер (замыкатель), на короткое время замыкающий два контакта. На рисунке 18.4 показано внутреннее устройство самого распространенного стартера, которым оснащено большинство ламп дневного света. Как видно, стартер — это параллельное соединение неоновой лампы 3 и электрического конденсатора 6. Левый электрод неоновой лампы 4 изогнут в виде перевернутой буквы U (∩) и представляет собой биметаллическую пластинку, спаянную из двух металлов с разными коэффициентами теплового расширения. А это значит, что при нагревании этот электрод может разгибаться, принимая форму, похожую на букву Г.

При включении лампы в электрическую сеть все напряжение (220 В) прикладывается к неоновой лампе, и так как расстояние между электродами лампы всего около 1 мм, то даже без предварительного нагрева электродов в ней возникает электрический разряд. Сразу после начала разряда электрод 4 неоновой лампы, разогреваясь, начинает разгибаться и наконец касается электрода 5. Как только это происходит, неоновая лампа гаснет, и ток из электрической сети переключается на нагрев электродов лампы дневного света.

Со временем неоновая лампа, электрический разряд в которой прекратился, начинает остывать, а вместе с ней и биметаллическая пластинка электрода 4. Через 1—2 с неоновая лампа остывает настолько, что контакт между ее электродами 4 и 5 исчезает, и напряжение в электрической сети (220 В) опять прикладывается к люминесцентной лампе. Но сейчас в лампе дневного света уже разогреты электроды, и в ней возникает электрический разряд. Электрический конденсатор 6, замыкающий контакты стартера, уменьшает электромагнитные помехи, возникающие при размыкании и замыкании электродов неоновой лампы.

Если бы в лампе дневного света не было дросселя (электрического сопротивления переменному току), то ток через нее мог бы превысить допустимый предел, и она бы перегорела. Поэтому использовать люминесцентные лампы без дросселей нельзя. Старые модели дросселей представляли собой половину электрического трансформатора (катушка провода с металлическим сердечником), и пропускание через них переменного тока вызывало жужжание или гул. Новые модели

ламп дневного света оснащены специальными электронными ограничителями тока и поэтому бесшумны.

При включении люминесцентные лампы, как правило, несколько раз мигают. Связано это может быть с низкой температурой окружающей среды, когда одиночного прогрева электродов лампы бывает недостаточно для инициации электрического разряда; с плохим состоянием электродов лампы, когда их нагрев не приводит к достаточному испарению электронов из них; а также с неисправностью стартера, когда, например, электроды неоновой лампы замыкаются на очень короткое время, недостаточное для разогрева электродов лампы дневного света.

И все-таки, несмотря на кажущуюся сложность работы люминесцентных ламп и их относительную дороговизну, по сравнению с лампами накаливания им всегда следует отдавать предпочтение, так как лампы дневного света позволяют в 3—4 раза снизить энергозатраты на освещение. Кроме того, как показывают расчеты, эксплуатация ламп, обладающих в 6 раз большим рабочим ресурсом и гораздо меньшими энергозатратами, быстро окупает расходы на их приобретение.

Компактные люминесцентные лампы — рекомендация специалистов

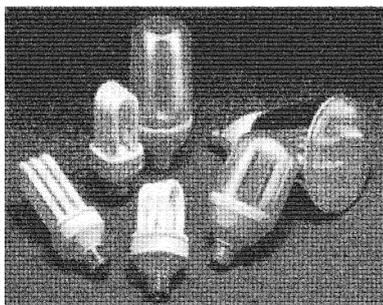


Рис. 18.5. Внешний вид нескольких компактных люминесцентных ламп, содержащих электронный пускорегулятор и оканчивающихся таким же винтовым контактом E27, как и у обычных ламп накаливания

Человека очень тяжело убедить сменить в своем доме освещение со старого, использующего лампы накаливания, на новое — с люминесцентными лампами. Для этого нужно сменить осветительные приборы, содержащие так называемый патрон, который используется только в лампах накаливания.

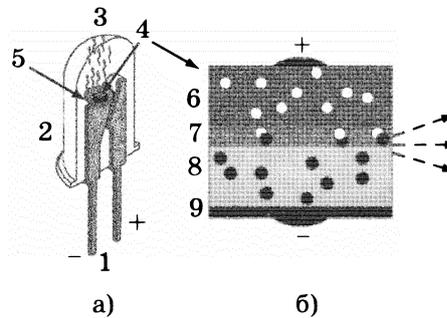
В начале 1980-х гг. были разработаны компактные люминесцентные лампы, обладающие всеми достоинствами ламп дневного света, но устроенные так, что их можно ввинчивать в патрон для обычной лампы накаливания (рис. 18.5). Как и многие современные модели ламп дневного света, эти лампы при работе не гудят и не мерцают, так как вместо стартера и дросселя они содержат электронный пускорегулятор,

обеспечивающий их бесшумную и стабильную работу. Очевидно, что использование компактных люминесцентных ламп позволяет значительно снизить материальные затраты при переходе на энергосберегающие технологии при освещении дома, в котором мы живем.

Светодиоды — лампы будущего

Незаметно для многих из нас на смену лампам накаливания и люминесцентным лампам приходят полупроводниковые осветительные устройства — светодиоды. Происходит это потому, что светодиоды гораздо более эффективно преобразуют электрическую энергию в свет. Схема, иллюстрирующая строение светодиода и его работу, показана

Рис. 18.6. *а)* Светодиод в разрезе; *б)* строение полупроводникового чипа, испускающего свет: 1 — металлические контакты для подключения к источнику постоянного тока; 2 — прозрачный кожух светодиода; 3 — свет, испускаемый светодиодом; 4 — полупроводниковый чип, слои которого показаны схематически; 5 — параболический зеркальный отражатель, собирающий свет в параллельный пучок; 6 — слой, обладающий дырочной или *p*-проводимостью; 7 — активный слой, химический состав которого определяет параметры испускаемого света; 8 — слой, обладающий электронной или *n*-проводимостью; 9 — электропроводящая подложка чипа. Электроны на схеме обозначены черными кружками, а дырки — белыми. Электрическое напряжение, приложенное между *n*- и *p*-слоями полупроводникового чипа, приводит к движению электронов (отрицательных зарядов) из *n*-слоя 8 в активный слой 7. Одновременно туда же под действием приложенного напряжения движутся дырки (положительные заряды) из *p*-слоя 6. В активном слое 7 дырки и электроны встречаются и уничтожают друг с друга, и при этом часть энергии выделяется в виде света (штриховые стрелки)



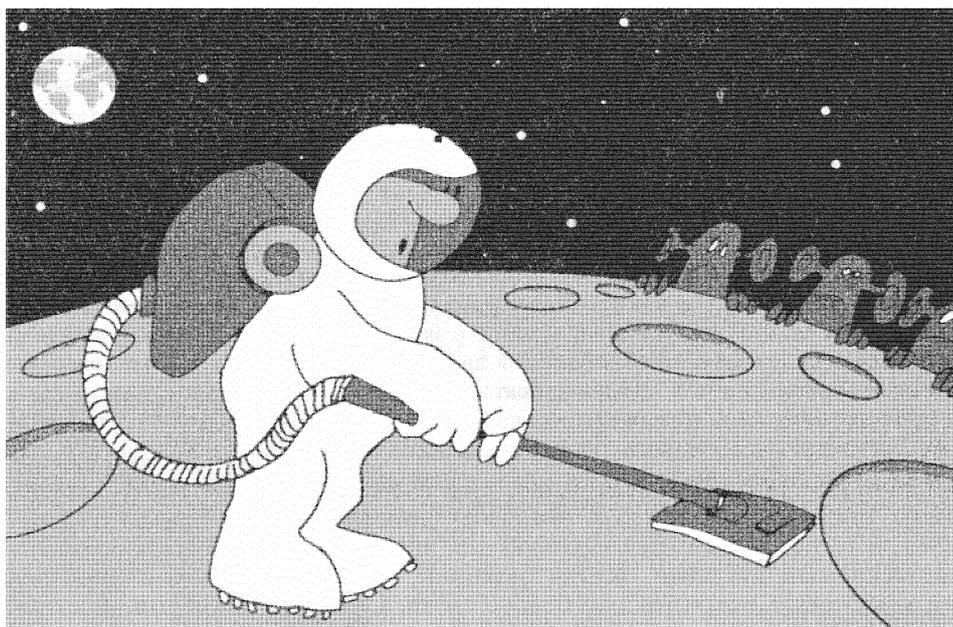
на рисунке 18.6. Так, например, уже сейчас светоотдача (отношение силы света к расходуемой энергии) диодов, испускающих красный свет, в 10 раз превышает таковую для ламп накаливания. То, что свет, испускаемый диодами, всегда окрашен, не означает, что светодиоды не могут стать источниками белого света. Составляя источник света из нескольких светодиодов, испускающих красный, зеленый и синий свет, можно получить любые оттенки белого, как угодно близко приближая его спектр к солнечному.

Светодиоды уже стали вытеснять лампы накаливания из автомобильных осветительных устройств. Так, например, более половины выпускаемых в Европе автомобилей используют красные светодиоды в качестве высокого стоп-сигнала, а также указателей поворота и габаритных огней. Увеличивается с каждым годом процент светофоров, работающих на светодиодах, и установка каждого нового светодиодного светофора позволяет в 5 раз снизить энергозатраты по сравнению со старыми светофорами, где белый свет, получаемый от ламп накаливания, проходя через фильтры, превращался в красный, желтый и зеленый.

В отличие от хрупких ламп накаливания и люминесцентных ламп, светодиоды очень прочны механически, а срок их эксплуатации может достигать 100 000 ч. Единственные недостатки светодиодных осветительных устройств — они стоят дороже и светят не так ярко, как хотелось бы. Но над устранением этих недостатков работают ученые-исследователи, и, как считает Жорес Алферов, лауреат Нобелевской премии 2000 г., светодиодам принадлежит будущее.

Глава 19

Пыль и электричество дома и в космосе



Что такое пыль

Пыль — это взвешенные в воздухе и осевшие на поверхность тел мельчайшие твердые частицы органического или минерального происхождения. Обычно пыль под действием влажности превращается в грязь. Отдельные частицы пыли имеют размеры от 10^{-9} до 10^{-4} м и различную форму. Они могут нести электрический заряд или быть электронейтральными. Концентрацию пыли часто выражают числом частиц в единице объема. Меньше всего пыли на вершинах гор, например, в Альпах ее концентрация всего 200—2000 в 1 см^3 . На улицах крупных городов пыли в сотни раз больше, а в жилых домах ее концентрация достигает 6 млн в 1 см^3 .

Постоянными источниками пыли являются некоторые виды производства, сельского хозяйства, транспортные средства, а также пожары, извержения вулканов, движущиеся ледники и различные катастрофы. Пыль причиняет ущерб промышленному оборудованию, снижает качество выпускаемой продукции, а также может быть причиной разных заболеваний. Поэтому исследование пыли — важная научно-техническая проблема, стоящая перед человечеством.

Как избавиться от пыли

Для устранения пыли воздух пропускают через специальные пылеуловители, в работе которых могут использоваться различные технологии. Многослойные тканевые фильтры бытовых пылесосов могут задерживать 99,9% частиц размером более 1 мкм. Так как частицы пыли способны электризоваться, то для пылеудаления часто применяют фильтры, внутри которых находится электростатически заряженный элемент, притягивающий к себе микрочастицы. Чтобы сделать пылеудаление более эффективным, воздух в помещении ионизируют.

В некоторых современных пылеуловителях бытового и промышленного применения используется центробежный способ концентрации микрочастиц. Воздух в этих устройствах заставляют вращаться, после чего частицы пыли, отброшенные от центра вращения, собирают на периферии.

Влажный воздух служит хорошим индикатором пыли. Конденсация влаги (образование тумана) из пара может происходить только на так называемых ядрах конденсации. Такими ядрами и служат мельчайшие пылинки, парящие в воздухе. Поэтому, чем больше пыли в воздухе, тем чаще и гуще там туманы. Туманы, осаждаясь на землю, очищают воздух от пыли. Однако избавляться от пыли, осаждая ее парами воды, чаще всего не представляется возможным. А когда это удастся, то приходится бороться уже с грязью. Поэтому физики сейчас исследуют процессы, приводящие к слипанию частичек пыли, чтобы впоследствии ими управлять, превращая облако пыли в маленький камушек, падающий на землю.

Пыль и силы Ван-дер-Ваальса

Силы, приводящие к слипанию между собой одинаковых молекул и состоящих из них мельчайших частичек, называются силами Ван-дер-Ваальса. Вот как работают эти силы.

На рисунке 19.1, *а* приведено схематическое изображение неполярной молекулы (например, O_2 или H_2), т. е. молекулы, в которой число электронов слева и справа одинаково. Однако даже у неполярной молекулы время от времени один из краев становится отрицательным, а противоположный — положительным. Становясь на очень короткое время диполем, молекула электризует соседнюю молекулу (рис. 19.1, *б*), и они притягиваются друг к другу (рис. 19.1, *в*).

Это и есть силы Ван-дер-Ваальса, которые иногда еще называют дисперсионными силами, т. е. силами, препятствующими рассыпанию

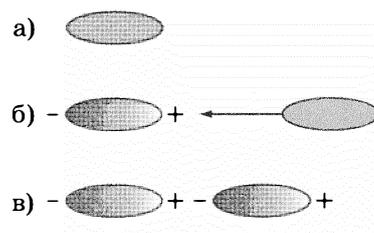


Рис. 19.1. Как силы Ван-дер-Ваальса приводят к слипанию частиц пыли (*а*), схематическое изображение неполярной молекулы. Становясь на очень короткое время диполем, молекула электризует соседнюю молекулу (*б*), и они притягиваются друг к другу (*в*)

(распылению) твердых тел и испарению жидких. Легко догадаться, что чем больше размер неполярной молекулы (например, инертного газа), тем в бóльших пределах может изменяться ее диполь, оставаясь в среднем равным нулю. Поэтому притяжение между соседними молекулами высокомолекулярных соединений будет больше, чем у низкомолекулярных, при прочих равных условиях. А значит, температура кипения у высокомолекулярных жидкостей должна быть выше, чем у низкомолекулярных. К сожалению, в совершенстве управлять силами Ван-дер-Ваальса физики еще не научились, и поэтому мгновенно превратить облако угольной пыли в кусочек угля пока не удастся.

Что такое космическая пыль

Астрофизикам не дают покоя мысли о космической пыли. По последним гипотезам, появление космической пыли связывают со взрывом звезд. Ученые утверждают, что эта пыль была первым твердым веществом во Вселенной. Считается, что все планеты образовались из ступенек космической пыли под действием сил гравитации, хотя окончательная модель этих процессов еще не построена.

Космическая пыль мешает вести наблюдения астрономам, заслоняя некоторые области звездного неба и создавая вместо них так называемые темные туманности; но иногда свет соседних звезд, рассеиваясь на облаках космической пыли, делает их видимыми.

Химический анализ показал, что в космической пыли очень много углерода (5—10%), и поэтому она могла стать необходимым источником возникновения органической жизни на Земле, построенной на основе углерода, ведь в среднем каждый день на 1 м² нашей планеты опускается одна космическая пылинка, что в сумме составляет около 100 т в сутки.

Космические пылинки размером с частицу, образующую дым, являются крошечными родственниками метеоритов — микрометеоритами (рис. 19.2). Астероиды и кометы служат постоянными поставщиками космической пыли на Землю. Малые размеры (менее 0,2 мм) позволяют им достичь поверхности Земли, не сгорев при этом. На Земле космическую пыль можно найти в глубоководных отложениях

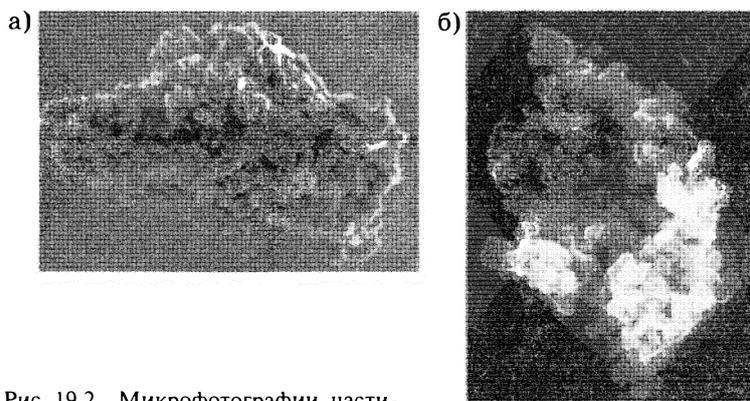


Рис. 19.2. Микрофотографии частичек космической пыли

на дне морей и океанов, в толще антарктического льда и в стратосфере. Специальная программа сбора и изучения космической пыли проводится на околоземной орбите с помощью Международной космической станции.

Беспилотные космические корабли, исследовавшие окрестности Юпитера и Сатурна, обнаружили там потоки космической пыли, источниками которой служат эти гигантские планеты. Оказалось, что мельчайшие частицы пыли размером от 2 до 50 нм несутся от Сатурна со скоростью около 100 км/с. Разгоняться до таких высоких скоростей им помогает электрический заряд, приобретенный после взаимодействия с солнечной радиацией, и магнитное поле этой планеты. Однако потери этих гигантских планет от постоянного пылевого ветра, дующего в космос, ничтожны. Так, Юпитер теряет каждую секунду всего от 20 г до 1 кг массы.

Лунная пыль

Лунная пыль — самая изученная из всех видов космической пыли. Еще задолго до высадки космонавтов на Луну ученые задались вопросом, существует ли слой пыли, парящий на высоте нескольких километров над ее поверхностью. В принципе такой слой пыли мог появиться при равенстве между электростатической силой отталкивания одноименно заряженной пыли и Луны и силой притяжения между ними. Очевидно, что такой слой пыли сделал бы процесс прилунения очень сложным и опасным. Однако простой расчет, доступный любому старшекласснику, показывает, что равенство электростатических кулоновских сил отталкивания и гравитационных сил, если оно есть, будет справедливо для любого расстояния между Луной и пылинкой, а поэтому никакого плотного слоя пыли там быть не может.

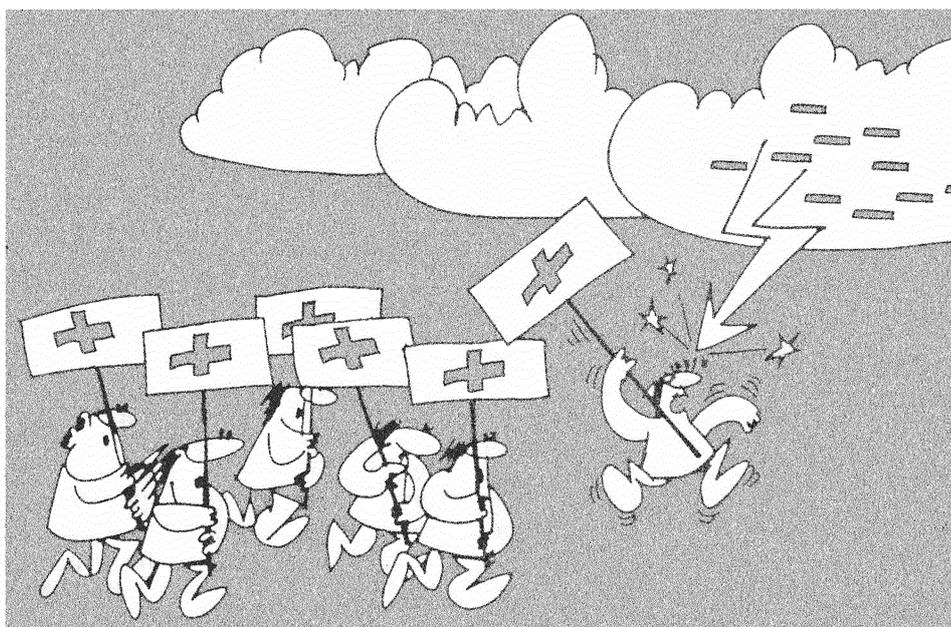
В 1972 г. американскому астронавту Х. Шмидту (Аполлон-17) после высадки на Луну и прогулки по ее пыльной поверхности показалось, что вокруг пахнет порохом. Причиной этого оказалась лунная пыль, просочившаяся в скафандр астронавта. Шмидт даже стал чихать, и у него развилась аллергия — лунный вариант сенной лихорадки. Кроме того, прилипающая снаружи к скафандру пыль мешала передвигаться и создавала массу проблем в работе многих систем и приборов.

Отсутствие атмосферы на Луне создало идеальные условия для возникновения и сохранения там очень толстого слоя пыли. Во-первых, все, что летело в сторону Луны, благополучно долетело до ее поверхности, а не сгорело в атмосфере, как это происходит на Земле. Во-вторых, на Луне нет ветров, рек и дождевых потоков, а значит, вся космическая пыль, смешанная с микро- и макрометеоритами, лежит там, куда упала очень давно или совсем недавно.

Микроскопический анализ лунной пыли показал, что она является смесью мельчайших базальтовых фрагментов, шариков и острых кусочков вулканического стекла с вплавленными минералами. После того как несколько сотен килограммов пыли были доставлены американскими астронавтами на Землю, возникли проекты по борьбе с пылью при следующих высадках на Луну. Оказалось, что лунная пыль очень богата элементарным железом. На Земле встречаются только оксиды железа, а чистое железо сразу окисляется и ржавеет.

Глава 20

Молния, или Как заряжается Земля



В каждый момент времени в разных точках Земли сверкают молнии более чем 2000 гроз (рис. 20.1). В каждую секунду около 50 молний ударяют в поверхность Земли, и в среднем 1 км^2 поражается молнией около 6 раз в году. Еще Б. Франклин доказал, что

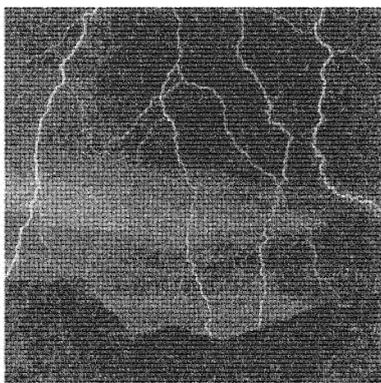


Рис. 20.1

молнии, бьющие в землю из грозовых облаков — это электрические разряды, переносящие на нее отрицательный заряд. При этом каждый разряд снабжает Землю несколькими десятками кулонов, а амплитуда тока при ударе молнии составляет от 20 до 100 кА. Скоростная фотосъемка показала, что разряд молнии длится десятые доли секунды и состоит из нескольких более коротких разрядов. Молнии издавна интересуют ученых, но и в наше время об их природе мы знаем лишь немного больше, чем 250 лет тому назад, хотя смогли их обнаружить даже на других планетах.

Молния — вечный источник подзарядки электрического поля Земли

С помощью измерительных приборов, установленных на атмосферных зондах, в начале XX в. было измерено электрическое поле Земли, напряженность которого у поверхности оказалась равной около 100 В/м , что соответствует суммарному заряду планеты около $400\,000 \text{ Кл}$. Переносчиками зарядов в атмосфере Земли служат ионы, концентрация которых увеличивается с высотой и достигает максимума на высоте 50 км , где под действием космического излучения образовался электропроводящий слой — ионосфера. Поэтому электрическое поле Земли — это поле сферического конденсатора с приложенным напряжением около 400 кВ . Под действием этого напряжения из верхних слоев в нижние все время проходит ток $2\text{--}4 \text{ кА}$, плотность которого составляет $1\text{--}2 \cdot 10^{-12} \text{ А/м}^2$, и выделяется энергия до $1,5 \text{ ГВт}$. И это электрическое поле исчезло бы, если бы не было молний. Поэтому в хорошую погоду электрический конденсатор Земли разряжается, а при грозе заряжается.

Человек не чувствует электрического поля Земли, так как является хорошим проводником. Поэтому заряд Земли находится и на поверхности человека, локально искажая электрическое поле (рис. 20.2). Под грозовым облаком плотность наведенных на земле положительных зарядов может значительно возрасти, а напряженность электрического поля может превышать 100 кВ/м , что в 1000 раз больше ее значения в хорошую погоду. В результате во столько же раз увеличивается положительный заряд каждого волоса на голове человека, стоящего под грозовой тучей, и они, отталкиваясь друг от друга, встают дыбом.

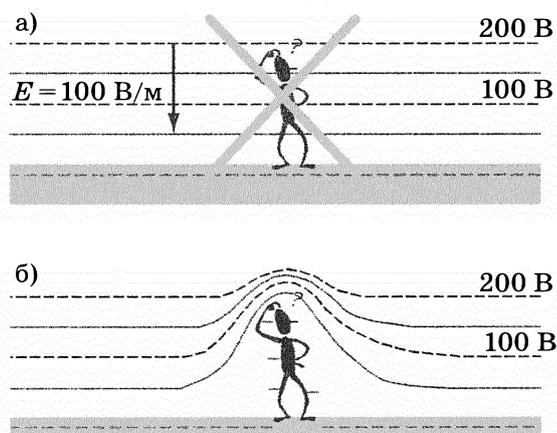


Рис. 20.2. Эквипотенциальные линии электрического поля Земли без человека (а) и их искажение стоящим человеком (б)

Электризация — удаление заряженной пыли

Чтобы понять, как облако разделяет электрические заряды, вспомним, что такое электризация. Легче всего зарядить тело, потеряв его о другое. Электризация трением — самый старый способ получения электрических зарядов. Само слово «электрон» в переводе с греческого означает «янтарь», так как янтарь при трении о шерсть или шелк всегда заряжается (отрицательно). Заряд и его знак зависят от материала трущихся тел.

Считается, что тело, до того как его стали тереть о другое, электро-нейтрально. Действительно, если оставить заряженное тело в воздухе, то к нему начнут прилипать противоположно заряженные частицы пыли и ионы, в результате чего через некоторое время тело окажется электро-нейтральным. Таким образом, на поверхности любого тела находится слой заряженной пыли, нейтрализующий заряд тела. Поэтому электризация трением — это процесс частичного снятия заряженной пыли с обоих тел. При этом результат будет зависеть от того, насколько лучше или хуже снимается заряженная пыль с трущихся тел.

Облако — фабрика по производству электрических зарядов

У тел может быть различная заряженная пыль, даже если они изготовлены из одного и того же материала: достаточно, чтобы микроструктура поверхности различалась. Например, при трении гладкого тела о шероховатое оба будут электризовываться.

Грозовое облако — это огромное количество пара, часть которого конденсировалась в виде мельчайших капелек или льдинок. Верх грозового облака может находиться на высоте 6—7 км, а низ нависать над землей на высоте 0,5—1 км. Выше 3—4 км облака состоят из льдинок разного размера, так как температура там всегда ниже нуля. Эти

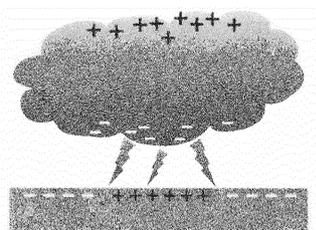


Рис. 20.3. Отрицательно заряженный низ облака поляризует поверхность земли под собой так, что она заряжается положительно, и, когда возникают условия для электрического пробоя, возникает разряд молнии

льдинки находятся в постоянном движении, вызванном восходящими потоками теплого воздуха, поднимающегося снизу от нагретой поверхности земли. Мелкие льдинки легче, чем более крупные, увлекаются восходящими потоками воздуха. Поэтому шустрейшие мелкие льдинки, двигаясь в верхнюю часть облака, все время сталкиваются с крупными. При каждом таком столкновении происходит электризация, в результате чего крупные льдинки заряжаются отрицательно, а мелкие — положительно. Со временем положительно заряженные мелкие льдинки оказываются в верхней части облака, а отрица-

тельно заряженные крупные льдинки — в нижней. Другими словами, верх облака заряжается положительно, а низ — отрицательно. Все готово для разряда молнии, при котором происходит пробой воздуха, и отрицательный заряд с нижней части грозовой тучи перетекает на землю (рис. 20.3).

Молния — привет из космоса и источник рентгеновского излучения

Однако само облако не в состоянии так наэлектризовать себя, чтобы вызвать разряд между нижней частью облака и землей. Напряженность электрического поля в грозовой облаке никогда не превышает 400 кВ/м, а электрический пробой в воздухе происходит при напряженности больше 2500 кВ/м. Поэтому для возникновения молнии необходимо что-то еще, кроме электрического поля. В 1992 г. российский ученый А. Гуревич предположил, что своеобразной зажигалкой для молнии могут быть космические лучи — частицы высоких энергий, обрушивающиеся на Землю из космоса с околосветовыми скоростями.

Тысячи таких частиц каждую секунду бомбардируют каждый квадратный метр земной атмосферы.

Согласно теории Гуревича, частица космического излучения, сталкиваясь с молекулой воздуха, ионизует ее, в результате чего образуется огромное число электронов, обладающих высокой энергией. Попав в электрическое поле между облаком и землей, эти электроны ускоряются до околосветовых скоростей, ионизуя путь своего движения и, таким образом, вызывая лавину электронов, движущихся вместе с ним к земле. В ионизированном канале, созданном этой лавиной электронов, сразу же происходит разряд молнии.

Молния — это не ярко светящаяся прямая, соединяющая облако и землю, а ломаная линия, состоящая из многих ступенек. Каждая из таких ступенек — это место, где разогнавшиеся до околосветовых скоростей электроны вынуждены были остановиться из-за столкновений с молекулами воздуха и изменить направление движения. Доказательством такой интерпретации ступенчатого характера молнии являются вспышки рентгеновского излучения, совпадающие с моментами, когда молния, как бы спотыкаясь, изменяет свою траекторию. Недавние исследования показали, что молния является довольно мощным источником рентгеновского излучения, интенсивность которого может составлять до 250 000 эВ, что примерно в 2 раза выше используемого при рентгене грудной клетки.

Как можно вызвать разряд молнии

Изучать то, что произойдет непонятно где и когда, очень сложно. А именно так в течение долгих лет работали ученые, исследующие природу молний. В древности считали, что грозой на небе руководит Илья-пророк, и людям не дано знать его планы. Однако ученые очень давно пытались создать проводящий канал между грозовой тучей и землей. Б. Франклин для этого во время грозы запускал воздушный змей, оканчивающийся проволокой и связкой ме-

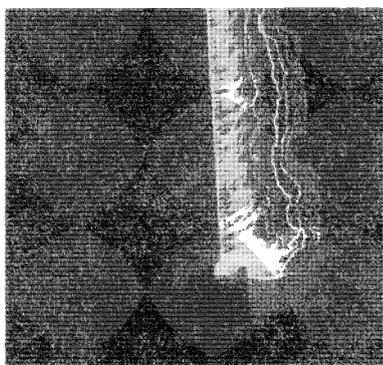


Рис. 20.4. Несколько разрядов молний, вызванных пуском ракеты в грозовую тучу. Самая левая вертикальная прямая — след от запущенной ракеты

таллических ключей, вызывая слабые разряды, стекающие вниз по проволоке. Он первым доказал, что молния — это отрицательный электрический разряд, стекающий с облаков на землю. Опыты Франклина были чрезвычайно опасными, и один из тех, кто их пытался повторить, русский физик, академик Г. В. Рихман, в 1753 г. погиб от удара молнии.

В 1990-х гг. ученые научились вызывать молнии, не подвергая опасности свою жизнь. Один из способов вызвать молнию — запустить с земли небольшую ракету прямо в грозовую тучу. Вдоль всей траектории ракета ионизирует воздух и создает таким образом проводящий канал между тучей и землей (рис. 20.4). И если отрицательный заряд низа тучи достаточно велик, то

вдоль созданного канала происходит разряд молнии, все параметры которого регистрируют приборы, расположенные рядом со стартовой площадкой ракеты. Чтобы создать еще лучшие условия для разряда молнии, к такой ракете присоединяют металлический провод, соединяющий ее с землей.

Молния — подарившая жизнь и двигатель эволюции

В 1953 г. биохимики Стэнли Миллер и Гарольд Юри показали, что кирпичики жизни — аминокислоты могут быть созданы при пропускании разряда молнии через воду, в которой растворены газы первобытной атмосферы Земли (метан, аммиак и водород). Спустя 50 лет другие ученые повторили эти опыты и получили те же результаты. Таким образом, научная теория зарождения жизни на Земле отводит удару молнии основополагающую роль.

При пропускании коротких импульсов тока через бактерии в их оболочке (мембране) появляются поры, через которые внутрь могут проходить фрагменты ДНК других бактерий. Таким образом, гены от одного вида бактерий могут переходить к другому, и это может быть одним из механизмов эволюции.

Фульгурит — след молнии на земле

При разряде молнии выделяется энергия 10^9 – 10^{10} Дж. Большая часть этой энергии тратится на гром, нагрев воздуха, световую вспышку и другие электромагнитные волны, и только малая часть выделяется в том месте, где молния входит в землю. Однако и этого достаточно, чтобы вызвать пожар, убить человека и разрушить здание. Молния может разогревать канал, по которому она движется, до температуры $30\,000\text{ }^\circ\text{C}$, что в 5 раз выше, чем температура на поверхности Солнца.

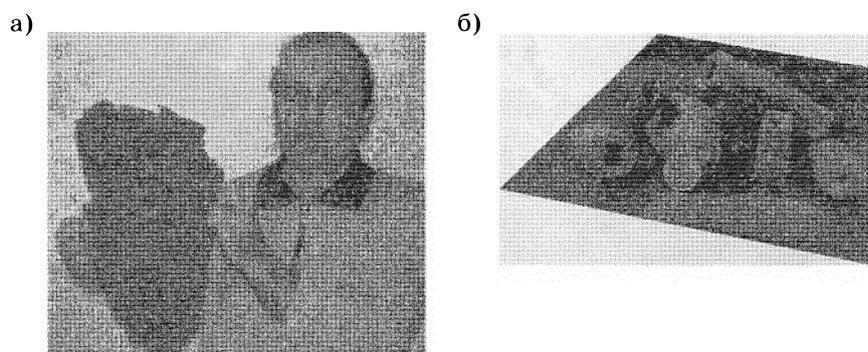


Рис. 20.5. Крупный фульгурит весом 7,3 кг, найденный автором на окраине Москвы (а), и его полые цилиндрические фрагменты, образованные из оплавленного песка (б)

Рис. 20.6. Сосна, расположенная на западных окраинах Москвы. Под сосной находится огромный фульгурит, и поэтому корни сосны уходят в землю на большом расстоянии от ствола. По мнению автора, семечко сосны оказалось внутри полого цилиндра фульгурита, образованного разрядом молнии



Температура внутри молнии гораздо выше температуры плавления песка (1600—2000 °С). Самые мощные молнии вызывают рождение фульгуритов — полых цилиндров, образованных из оплавленного песка (рис. 20.5 и 20.6). Самые длинные из раскопанных фульгуритов уходили под землю на глубину более 5 м.

Почему зимой грозы очень редки

Ф. И. Тютчев писал: «Люблю грозу в начале мая, когда весенний первый гром...» Чтобы образовалось грозовое облако, необходимы восходящие потоки влажного воздуха. Концентрация насыщенных паров растет с температурой и максимальна летом. Разница температур, от которой зависят восходящие потоки воздуха, тем больше, чем выше его температура у поверхности земли, так как на высоте нескольких километров температура воздуха не зависит от времени года. Значит, интенсивность восходящих потоков максимальна тоже летом. Поэтому и грозы в средней полосе чаще всего бывают летом, а на севере, где и летом холодно, грозы довольно редки.

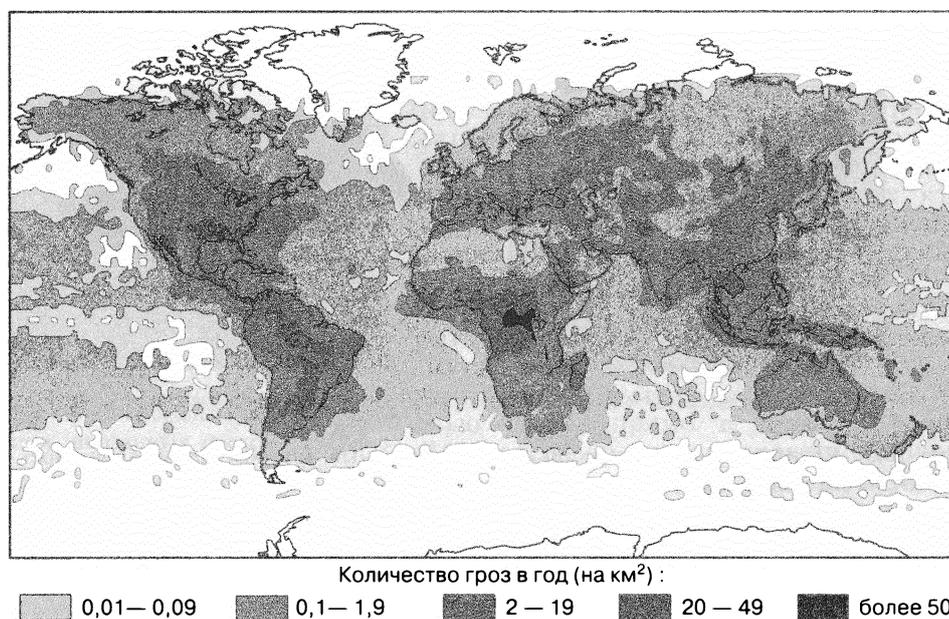


Рис. 20.7. Распределение частоты гроз по поверхности суши и океанов. Самые светлые места на карте соответствуют частотам не более 0,1 грозы в год на квадратный километр, а самые темные — более 50

Почему грозы чаще над сушей, чем над морем

Чтобы облако разрядилось, в воздухе под ним должно быть достаточное число ионов. Воздух, состоящий только из молекул азота и кислорода, не содержит ионов, и его очень сложно ионизировать даже в электрическом поле. А вот если в воздухе много инородных частиц, например пыли, то и ионов тоже много. Ионы образуются при движении частиц в воздухе аналогично тому, как электризуются при трении друг от друга различные материалы. Очевидно, что пыли в воздухе гораздо больше над сушей, чем над океанами. Поэтому грозы и гремят над сушей чаще (рис. 20.7). Замечено также, что особенно часто молнии бьют по тем местам, где в воздухе велика концентрация аэрозолей — выбросов предприятий нефтеперерабатывающей промышленности.

Как Франклин отклонил молнию

К счастью, большинство разрядов молнии происходят между облаками и поэтому не угрожают здоровью людей. Однако известно, что каждый год молнии убивают более тысячи людей по всему миру. Изобретатель первого электрического конденсатора (лейденской банки) Питер ван Мушенбрук (1692—1761) в статье об электричестве, написанной для французской «Энциклопедии», защищал традиционные способы предотвращения молнии — колокольный звон и стрельбу из пушек, которые, как он считал, оказываются довольно эффективными.

Б. Франклин, пытаясь защитить от удара молнии Капитолий столицы штата Мериленд, в 1775 г. прикрепил к зданию толстый железный стержень, возвышающийся над куполом на несколько метров и соединенный с землей. Ученый отказался запатентовать свое изобретение, желая, чтобы оно как можно скорее начало служить людям (рис. 20.8).

Весть о громоотводе Франклина быстро разнеслась по Европе, и его выбрали во все академии, включая и Петербургскую. Однако в некоторых странах встретили это изобретение с возмущением. Сама мысль о том, что человек так легко и просто может укротить главное оружие Божьего гнева, казалась кощунственной. Поэтому в разных местах люди из благочестивых соображений ломали громоотводы. Любопытный случай произошел в 1780 г. в небольшом городке Сент-Омер на севере Франции, где горожане потребовали снести железную мачту громоотвода, и дело дошло до судебного разбирательства. Молодой адвокат построил защиту на том, что и разум человека, и его способность покорять силы природы имеют Божественное происхождение. Все, что помогает спасти жизнь, — во благо, доказывал молодой адвокат. Он выиграл процесс и снискал большую известность. Адвоката звали Максимилиан Робеспьер.



Рис. 20.8. Зонт с громоотводом. Модель продавалась в XIX в. и пользовалась спросом

Как можно защититься от молнии с помощью струи и лазера

Ученые предложили принципиально новый способ борьбы с молниями. Громоотвод будет создан из струи жидкости, которой будут стрелять с земли непосредственно в грозовые облака. Громоотводная

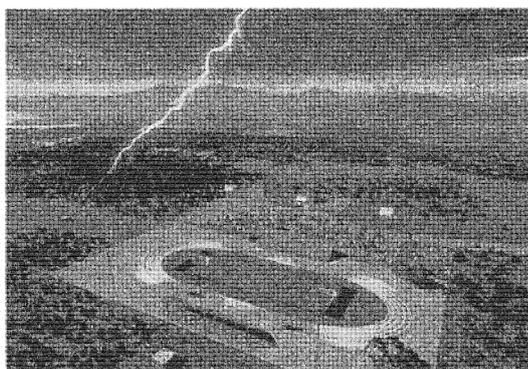


Рис. 20.9. Выстрел жидкостью или лазером по грозовой туче, нависшей над стадионом

жидкость представляет собой солевой раствор, в который будут добавлены жидкие полимеры: соль предназначена для увеличения электропроводности, а полимер будет препятствовать распаду струи на отдельные капельки. Диаметр струи составит примерно 1 см, а максимальная высота 300 м. Когда жидкий громоотвод будет доработан, им оснастят спортивные и детские площадки. Когда напряженность электрического поля будет достаточно высокой, а вероятность удара молнии — максимальной, струя будет включаться автоматически. По струе жидкости с грозового облака будет стекать заряд, делая молнию безопасной для окружающих (рис. 20.9). Аналогичную защиту от разряда молнии можно сделать и с помощью лазера, луч которого, ионизируя воздух, создает канал для электрического разряда вдали от скопления людей.

Может ли молния сбить нас с пути

В известном романе Г. Мелвилла «Моби Дик» описан случай, когда разряд молнии, сопровождающийся сильным изменением магнитного поля, перемагнитил стрелку компаса. Однако капитан судна взял обычную швейную иглу, ударил по ней, чтобы намагнитить, и поставил ее вместо испорченной стрелки компаса.

Может ли поразить молния, если вы в доме или самолете

Ток грозового разряда может войти в дом по телефонному проводу от рядом стоящего столба. Поэтому при грозе старайтесь не пользоваться обычным телефоном. Считается, что говорить по радиотелефону или по мобильному телефону безопаснее. Небезопасно касаться во время грозы труб центрального отопления, которые тоже являются электрическим проводником, соединяющим дом с землей. Из этих же соображений специалисты советуют при грозе выключать все электрические приборы, в том числе компьютеры и телевизоры.

Что касается самолета, то, вообще говоря, самолеты стараются облетать районы с грозовой активностью. И все-таки в среднем раз в год в каждый из самолетов попадает молния. В подавляющем большинстве случаев при попадании молнии ничего не происходит, так как алюминий, покрывающий самолет снаружи, легко пропускает ее вниз к земле.

Глава 21

Как искать братьев по разуму во Вселенной



Ученые считают, что среди более 100 млрд звезд нашей Галактики должно быть около тысячи цивилизаций. Уже около 50 лет исследователи, вооружившись антеннами и чувствительными приемниками радиоволн, пытаются обнаружить сигналы, говорящие о существовании внеземного разума. Однако есть и второй, более активный способ поиска внеземных цивилизаций — соорудить супермощный передатчик и самим послать сигнал во Вселенную, который мог бы быть услышан на расстоянии десятков или даже сотен световых лет, а потом ждать ответа.

Сначала надо выбрать полосу частот, в которой мы собираемся заявить о себе, а впоследствии получить ответ. Если направить радиотелескоп (рис. 21.1) в небо, то окажется, что там есть два вида шума — галактический и атмосферный. Галактический шум относительно низкочастотный, и он не

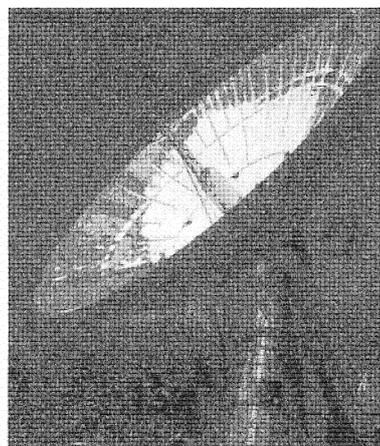


Рис. 21.1. Радиотелескоп

будет мешать нашим переговорам на частоте выше 1 ГГц. Атмосферный шум, состоящий главным образом из спектров испускания молекул воды и кислорода, высокочастотный и будет усложнять связь с другими цивилизациями на частоте выше 10 ГГц. Поэтому радиоволны частотой в несколько гигагерц (длина волны около 1 м) вполне подойдут для межзвездных переговоров, да и технология приема и генерации электромагнитных волн в этой области спектра сейчас очень развита, по крайней мере на Земле, так как все радиотелефоны, микроволновые печи и пейджеры работают как раз в этом диапазоне частот. Кроме того, большинство специалистов, сканирующих радиоволны в поисках иных цивилизаций, почему-то считают, что инопланетяне должны разговаривать с нами на частоте, близкой к основной частоте испускания атома водорода (1,43 ГГц) — простейшего элемента Вселенной.

Итак, диапазон радиоволн, в котором следует искать послания от иных цивилизаций, мы определили. Теперь попробуем построить суперчувствительный приемник, а сначала определим, каким он должен быть. Одно из основных достоинств чувствительного приемника — минимальный собственный шум. Другими словами, если вокруг антенны радиоприемника вообще нет радиоволн данного частотного диапазона (что очень трудно себе представить), то на выходе низкошумящего приемника должен быть нуль или небольшой шум.

К сожалению, все материалы, в том числе и те, из которых сделан усилитель, при температурах выше 0 °К являются источниками электромагнитного излучения, от которого невозможно избавиться. Этот электромагнитный шум очень схож по своим характеристикам с излучением так называемого абсолютно черного тела, для описания свойств которого нужно знать только его температуру. Современные технологии позволяют сделать усилитель гигагерцевых волн с собственным шумом, эквивалентным шуму абсолютно черного тела, имеющего температуру всего несколько градусов Кельвина!

Однако минимизация собственного шума радиоприемника — только одна из задач исследователей внеземных цивилизаций. Вторая — это минимизация внешних электромагнитных шумов, от многих из которых тоже невозможно избавиться (атмосферные шумы, галактические источники радиоволн и космическое излучение). Эти внешние шумы, похожие по свойствам на излучение абсолютно черного тела, суммируясь с внутренними шумами нашего суперусилителя, дают установку на прослушивание радиоволн Вселенной с шумами, эквивалентными шумам с температурой 15 °К.

Попробуем теперь оценить, какой мощности должен быть передатчик, расположенный на расстоянии 100 св. лет от Земли, чтобы наш приемник мог уловить его сигнал. А для этого мощность собственного шума земного суперусилителя радиоволн должна быть меньше мощности сигнала, пришедшего на антенну. Но очевидно, мощность шума зависит от ширины полосы пропускания нашего усилителя. Чем уже полоса, тем меньше шум. Если представитель иной цивилизации захочет передать на Землю в качестве привета свой телевизионный сигнал, то для этого ширина полосы нашего усилителя должна быть около 4,5 МГц. Если же он решит транслировать на всю Вселенную речь своего президента, то полосу можно будет сузить до 2,5 кГц. Ну, а если он, пользуясь азбукой Морзе, со скоростью одна буква в секунду

будет знакомить нас с выдержками из газет, то нашему усилителю будет достаточно и 2,5 Гц. Остановимся на последнем случае, так как в этих условиях шум нашей установки будет минимальным. Так как шум нашей установки аналогичен шуму абсолютно черного тела, то его мощность $P_{\text{ш}}$ можно вычислить по формуле

$$P_{\text{ш}} = kT \cdot \Delta f = 5,2 \cdot 10^{-22} \text{ Вт},$$

где $k = 1,4 \cdot 10^{-23} \text{ Дж} \cdot \text{К}^{-1}$ — постоянная Больцмана, $T = 15 \text{ }^\circ\text{К}$ — эквивалентная температура шума, $\Delta f = 2,5 \text{ Гц}$ — ширина полосы пропускания установки.

Таким образом, если мощность радиоволн на входе нашего суперусилителя будет больше $5,2 \cdot 10^{-22} \text{ Вт}$, то мы различим морзянку инопланетянина. Чтобы сигнал был больше, возьмем антенну-тарелку площадью 1 м^2 . Итак, в принципе мы способны уловить морзянку других цивилизаций, если мощность излучения на поверхности Земли составит более $5,2 \cdot 10^{-22} \text{ Вт/м}^2$.

Теперь мы уже можем вычислить мощность передатчика радиоволн, находящегося на расстоянии 100 св. лет от Земли, интенсивность сигнала от которого на поверхности Земли составляет $5,2 \cdot 10^{-22} \text{ Вт/м}^2$. Пусть радиоволны от передатчика распространяются одинаково во все стороны и их мощность уменьшается обратно пропорционально квадрату расстояния. Тогда простые вычисления дают следующую оценку для мощности радиопередатчика, находящегося на расстоянии 100 св. лет, с которого можно было бы разобрать морзянку на Земле — $6 \cdot 10^{15} \text{ Вт}$! Это в тысячи раз больше, чем мощность всех электростанций России. А это значит, что даже если на всей Земле погаснет свет, то переданная нами морзянка будет услышана лишь на расстоянии, не большем чем 10 св. лет. А звезд на таком малом расстоянии единицы, ведь на расстоянии 100 св. лет около 1000 звезд. Да и 1000 звезд всего лишь одна миллионная часть процента всех звезд Галактики!

И все же не следует отчаиваться. Сейчас мы можем снизить эквивалентную температуру шума приемника радиоволн до $15 \text{ }^\circ\text{К}$. Пройдет несколько лет, и новые технические решения позволят уменьшить ее еще в несколько раз, а новые алгоритмы кодирования информации и огромнейшие антенны (рис. 21.2) сделают возможным то, о чем сейчас только мечтают.

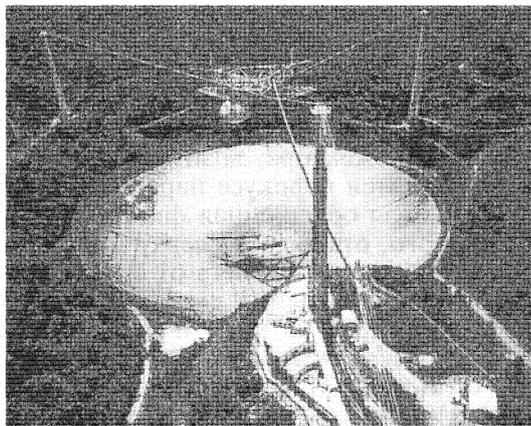
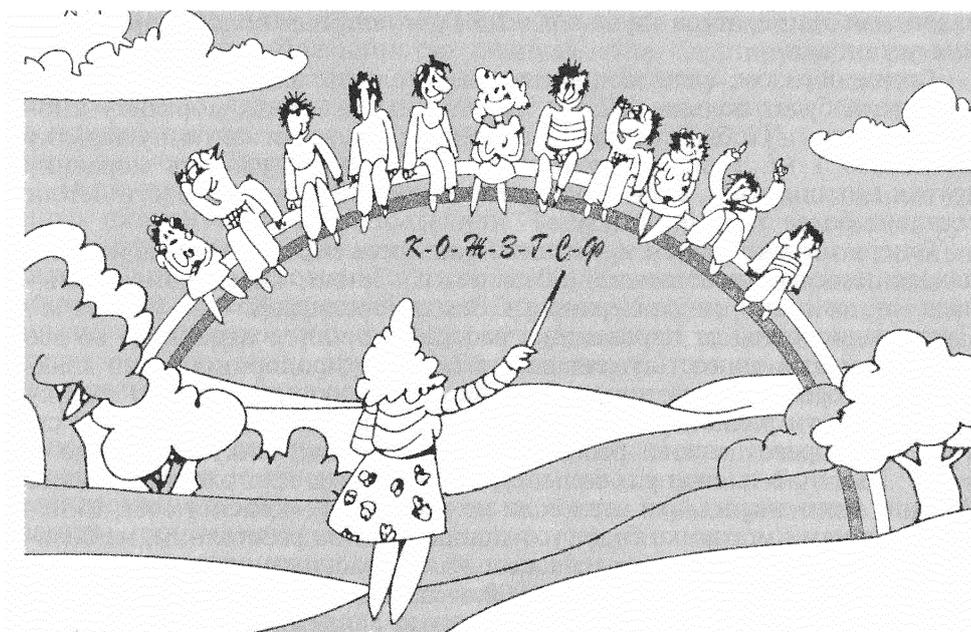


Рис. 21.2. Самый крупный радиотелескоп в мире (Аресибо, о. Пуэрто-Рико) с диаметром зеркала 305 м

Глава 22

Радуга – урок физики на свежем воздухе



Свет делает видимыми предметы вокруг и дает возможность нам ориентироваться. Однако бывают случаи, когда свет как будто хочет привлечь внимание к себе, к тому, что он существует сам по себе. Это игра света.

Игра света — это множество световых явлений, где многократные преломления и отражения световых лучей на поверхностях раздела сред с различной оптической плотностью создают сложную и иногда очень красивую картину сходящихся или расходящихся лучей. Простейшими случаями игры света могут быть:

- собирающая линза, в фокусе которой вспыхивает яркий свет;
- луч прожектора, возникающий, когда точечный источник света находится в фокусе параболического зеркала;
- сложная освещенная фигура (кардиоида), появляющаяся внутри полого, открытого сверху цилиндра (например, чашки) в результате отражения света от его внутренней поверхности (рис. 22.1);
- дрожащие ячейки света, которые можно увидеть, если посмотреть сверху на море или бассейн или, нырнув, открыть глаза и взглянуть снизу на поверхность воды (рис. 22.2);
- солнечные и лунные гало с их «собаками»;
- солнечные и лунные дорожки на водной поверхности;

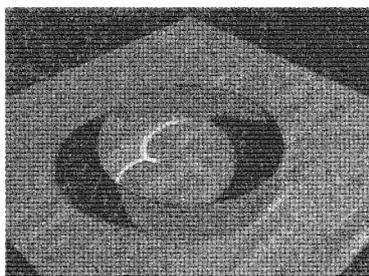


Рис. 22.1. Кардиоида, появляющаяся внутри полого, открытого сверху цилиндра в результате отражения света от его внутренней поверхности

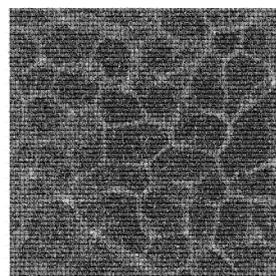


Рис. 22.2. Ячейки света, которые можно увидеть, плавая в бассейне, если, нырнув, открыть глаза и взглянуть снизу на поверхность воды

- столбы света над заходящим солнцем и горящим фонарем;
- радуга на небе.

Как увидеть радугу

Чтобы увидеть радугу, надо после дождя встать спиной к солнцу, так как центр ее дуги находится на продолжении прямой, идущей от солнца к наблюдателю (рис. 22.3).

Угловой размер радуги составляет около 42° , поэтому, когда высота солнца над горизонтом больше 42° , радуга не видна. Когда солнце находится над линией горизонта, большая часть радуги (см. стрелку внизу рисунка 22.3) и центр скрыты от наблюдателя, и только на закате мы можем видеть все полукружье радуги. С вершины горы, под водопадом или из кабины летящего самолета удастся увидеть больше половины радуги, а иногда и весь ее круг.

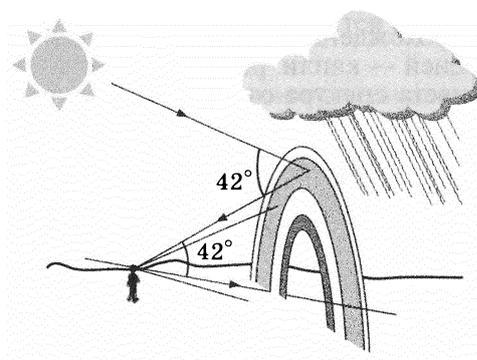


Рис. 22.3. Как увидеть радугу

Как образуется радуга

Одним из первых дал объяснение радуги французский философ, математик, физик и физиолог Рене Декарт в 1637 г. Он считал, что причиной радуги являются маленькие капли (диаметром меньше

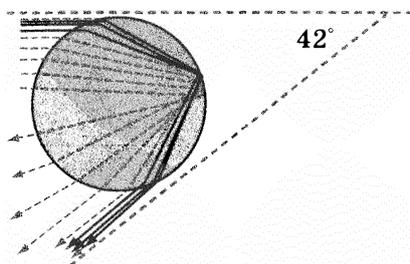


Рис. 22.4. Схематическое изображение хода десяти лучей, падающих горизонтально слева на каплю. Сплошными линиями показаны лучи, отклоняемые каплей приблизительно на один и тот же угол (луч Декарта)

1 мм) только что прошедшего дождя, удерживаемые теплыми восходящими потоками воздуха. Лучи солнца претерпевают в каплях два преломления и одно отражение и возвращаются обратно к наблюдателю под определенным углом.

Проследим путь десяти параллельных лучей красного цвета, падающих на сферическую каплю воды (рис. 22.4), полагая, что коэффициент преломления n на границе вода — воздух составляет 1,32. Оказалось, что небольшая группа лучей (сплошные линии) выходит из капли компактным пучком, образуя угол около 42° с направлением солнечных лучей, все остальные лучи (штриховые линии) расходятся широким веером, иными словами, рассеиваются. В честь первооткрывателя этот компактный пучок лучей называют лучом Декарта. Таким образом, стоя спиной к солнцу, наблюдатель под углом 42° к солнечным лучам увидит многократно усиленный луч красного цвета — красную полосу радуги.

Почему в радуге нижний цвет синий, а верхний красный

Прохождение солнечных лучей через каплю сопровождается дисперсией — капли работают как миниатюрные призмы, разлагая свет на цвета спектра от красного до фиолетового.

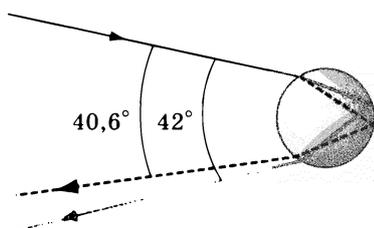


Рис. 22.5. Отклонение красного (сплошная линия) и синего (штриховая) лучей Декарта каплей воды

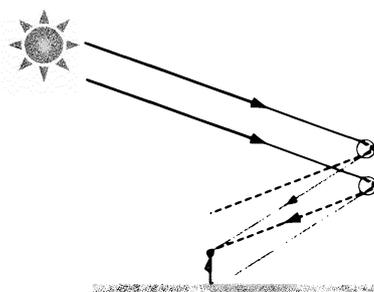


Рис. 22.6. Разные капли посылают нам разные цвета радуги

На рисунке 22.5 показан ход красного ($n = 1,32$) и синего ($n = 1,34$) лучей Декарта в одной из капель. Видно, что капля возвращает синий луч Декарта под углом $40,6^\circ$, а это значит, что синяя полоса в радуге будет находиться ниже, чем красная.

Следует отметить, что разные цвета радуги мы получаем от разных капель (рис. 22.6): красную полосу от капель, висящих выше, а синюю от капель, висящих ниже. Очевидно, что все промежуточные цвета радуги (оранжевый, желтый и зеленый) будут находиться между синей и красной полосами радуги в соответствии с их коэффициентами преломления. Чтобы запомнить порядок цветов в радуге (сверху вниз), достаточно заучить предложение «**Каждый Охотник Желает Знать, Где Сидит Фазан**», в котором первые буквы слов соответствуют первым буквам названий цветов.

Почему небо внутри радуги всегда ярче, чем снаружи

Каждый, кто видел радугу на фоне темного неба, заметил, что она внутри гораздо ярче, чем снаружи. Это легко объяснить, если опять взглянуть на рисунок 22.4 и уточнить, куда уходит большинство солнечных лучей, падающих на каплю. Видно, что все они рассеиваются по направлению к наблюдателю под углами, меньшими чем луч Декарта. Это значит, что лучи, не вошедшие в луч Декарта, освещают углы неба, меньшие 42° — направления, лежащие внутри радуги.

Почему иногда снаружи обычной радуги мы видим вторую, менее яркую, в которой порядок цветов обратный

Иногда на фоне темного неба в самом начале появления радуги, когда она очень яркая, снаружи обычной радуги становится заметной вторая радуга, менее яркая (рис. 22.7).

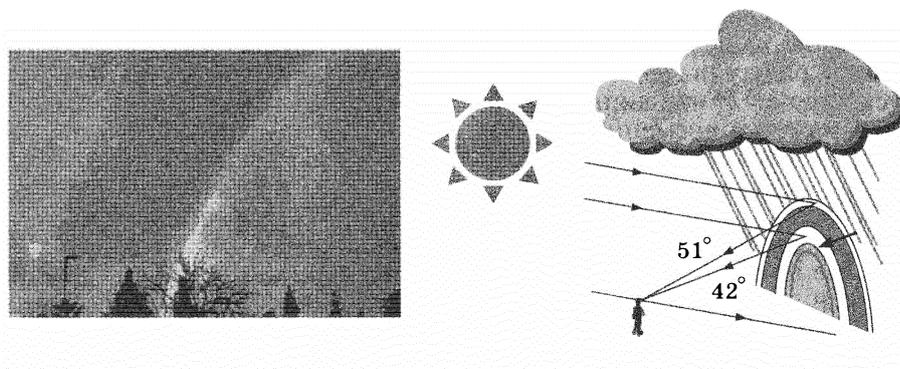


Рис. 22.7. Внешняя (вторая) радуга с обратной последовательностью цветов и схематическое ее изображение (справа)

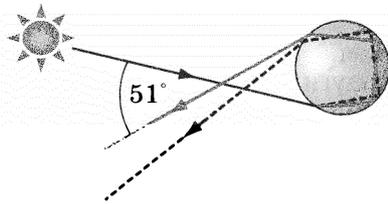


Рис. 22.8. Отклонение красного (сплошная линия) и синего (штриховая) лучей Декарта каплей воды при возникновении второй радуги

верхнюю поверхность, вторая радуга образуется из-за концентрации лучей, ударяющих в нижнюю часть капли, после двух преломлений и двух внутренних отражений (рис. 22.8).

Рисунок 22.8 показывает, как концентрируются при этом лучи красного и синего цвета. Свет, падающий на другие части этих капель, либо просто проходит через них, либо, преломляясь и отражаясь, не образует концентрированных пучков, оставаясь для наблюдателя незаметным. Обратите внимание на то, что последовательность цветов во второй радуге обратна той, которая видна в основной радуге. Происходит это потому, что, в отличие от основной радуги, где красный луч опускается из капли на землю круче, чем синий (см. рис. 22.5 и 22.6), во второй радуге все наоборот (см. рис. 22.8). Поэтому, чтобы перевести взгляд от красной полосы второй радуги к синей, надо посмотреть чуть-чуть повыше. Яркость второй радуги меньше яркости первой из-за того, что оба внутренних отражения не являются полными и часть света выходит из капли.

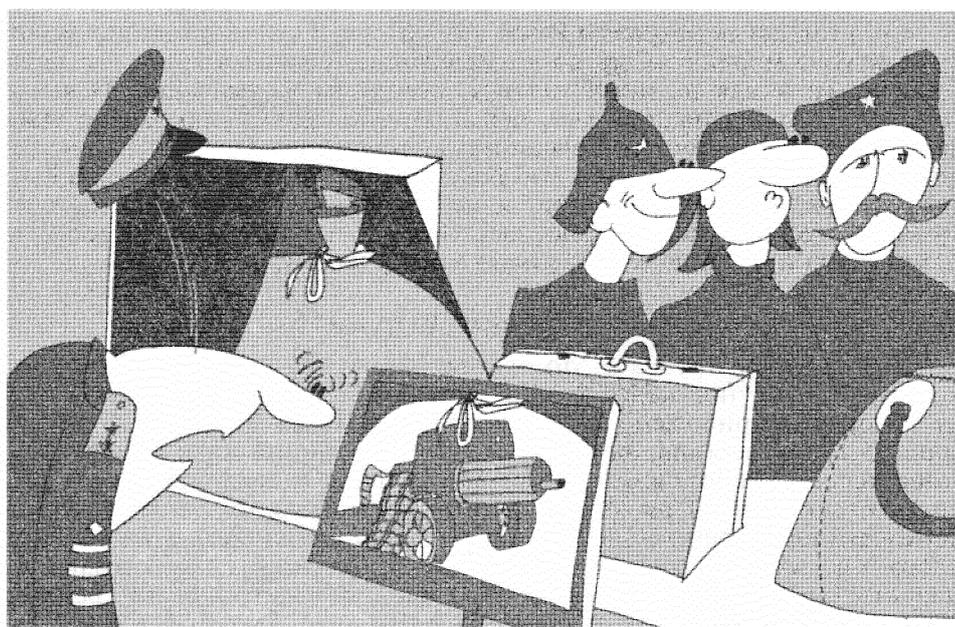
Почему радуга так быстро исчезает

Если бы капли все время висели в воздухе, то можно было бы наблюдать радугу в течение всего промежутка времени, пока солнце опускается с 42° над линией горизонта, и до заката, и в течение такого же промежутка времени после восхода. Ну, а там, где солнце не поднимается выше 42° , радугой можно было бы наслаждаться целый день. Почему же этого не происходит? Да потому, что капли испаряются или, сливаясь друг с другом, падают на землю. На самом деле радуга исчезает задолго до того, как все капельки превратятся в пар. Помните, все построения Декарта и наши были сделаны в рамках геометрической оптики. Как вы знаете, геометрическая оптика справедлива, когда размеры объектов (в нашем случае — капель) гораздо больше длины волны (около 1 мкм). Поэтому, когда диаметр капель становится меньше 10 мкм, теория Декарта перестает работать, а радуга становится слабой и бесцветной и при дальнейшем уменьшении диаметра вообще исчезает.

Угловое расстояние между первой и второй радугами составляет около 9° . Причиной второй радуги, как и первой, служат преломления и отражения света в капельках воды. Однако капельки, дающие начало второй радуге, находятся выше тех, что служат источником первой. Кроме того, лучи солнечного света, перед тем как превратиться во вторую радугу, успевают два раза отразиться от внутренней поверхности каждой капельки. В отличие от основной радуги, где капелька концентрирует пучок лучей (луч Декарта), падающих сбоку на ее

Глава 23

Как рентгеновские лучи помогают увидеть невидимое



Мы знаем, что многие тела вокруг непрозрачны. Фотоны видимого света из-за малой энергии не могут осветить их изнутри. Кроме того, длина волны видимого света (400—700 нм) гораздо больше промежутков между атомами. Поэтому, используя излучение только с очень малой длиной волны, можно сделать непрозрачные тела прозрачными. Такое излучение было открыто немецким физиком В. Рентгеном более века тому назад.

Рентген — первый лауреат Нобелевской премии

В 1895 г. Вильгельм Рентген открыл неизвестные ранее лучи (*X*-лучи), проникающие через различные преграды. Сообщение Рентгена вызвало огромный интерес, и медики сразу осознали значение рентгеновского излучения для диагностики. На время *X*-лучи стали сенсацией, о которой писали газеты и журналы по всему миру. В 1901 г. Рентген стал первым лауреатом Нобелевской премии по физике, хотя об истинной природе *X*-лучей было известно очень мало. При вручении премии было сказано: «Нет сомнения в том, сколь большого успеха достигнет физическая наука, когда эта неведомая раньше форма энергии будет достаточно исследована». Понадобилось около 10 лет для

объяснения волновой природы X -лучей, а впоследствии за работы в области рентгеновских лучей было присуждено еще семь Нобелевских премий. Кроме того, благодаря рентгеновским лучам сделаны такие великие открытия, как расшифровка структуры молекул гемоглобина, дезоксирибонуклеиновой кислоты (ДНК) и белков, ответственных за фотосинтез (премии 1962 и 1988 гг.).

«Вышлите мне немного лучей в конверте»

Через год после открытия Рентгеном X -лучей он получил письмо от английского моряка: «Сэр, со времен войны у меня в груди застряла пуля, но ее никак не могут удалить, поскольку ее не видно. И вот я услышал, что Вы нашли лучи, через которые мою пулю можно увидеть. Если это возможно, вышлите мне немного лучей в конверте, доктора найдут пулю, и я вышлю Вам лучи назад». Ответ Рентгена был следующим: «В данный момент я не располагаю таким количеством лучей. Но если Вам не трудно, вышлите мне свою грудную клетку, я найду пулю и отошлю Вам грудную клетку назад».

Что такое X -лучи

Рентгеновская трубка — это стеклянная колба, из которой откачан воздух до давления менее 0,1 Па. В ней находятся электроды, между которыми приложено постоянное напряжение от 1 до 10 000 кВ (рис. 23.1). Электроны, вылетающие из раскаленной нити катода, разгоняются под действием электрического поля и сталкиваются с поверхностью анода. При этом электрон, столкнувшийся с атомом поверхности анода рентгеновской трубки, либо может быть отклонен его ядром так, как изменяет траекторию кометы притяжение ближайшей планеты (рис. 23.2, *a*), либо вышибает один из электронов внутренней оболочки атома, ионизируя его (рис. 23.2, *б*).

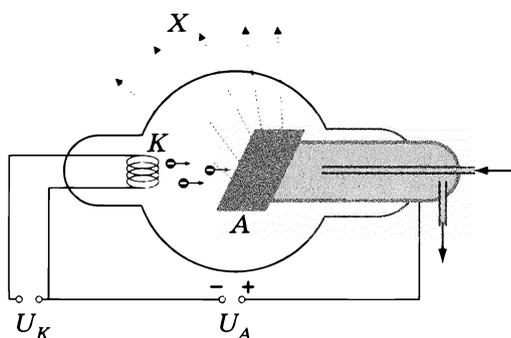


Рис. 23.1. Схематическое изображение рентгеновской трубки, между катодом K и анодом A которой приложено постоянное напряжение U_A , равное от 1 до 500 кВ. Электроны, вылетающие из раскаленной спирали катода, разгоняются под действием электрического поля и сталкиваются с поверхностью анода, в результате чего возникает рентгеновское излучение X . Жирные стрелки в правой части рисунка показывают течение воды, охлаждающей анод

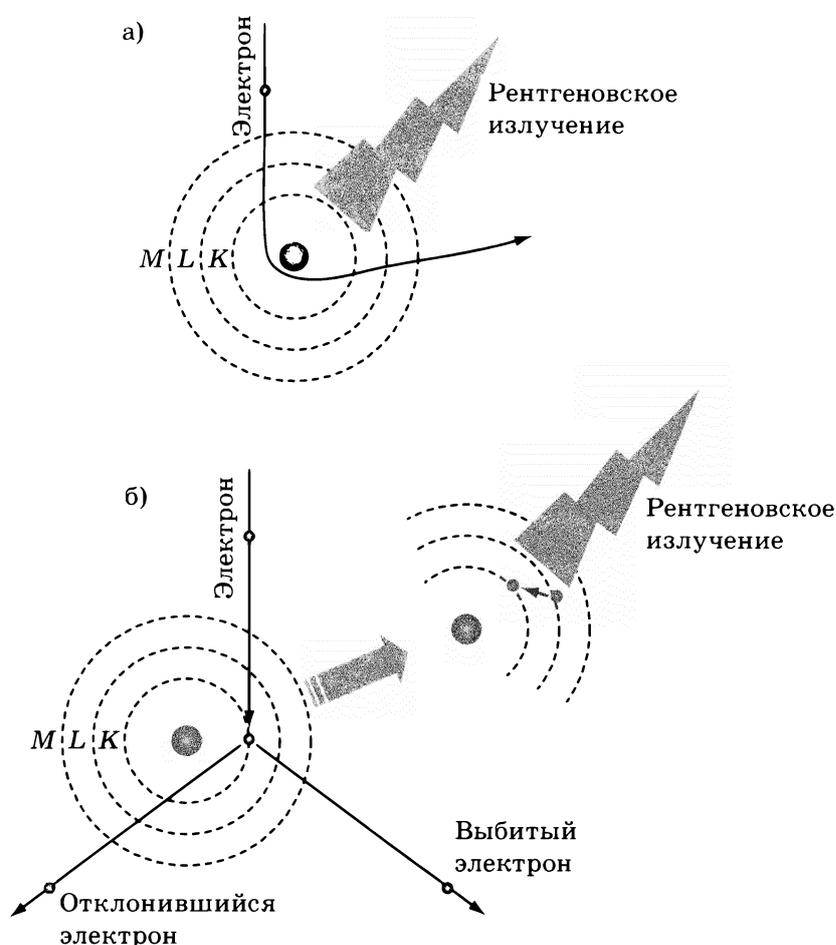


Рис. 23.2. Два механизма генерации рентгеновского излучения: а) отклонение электрона ядром атома; б) ионизация атома с последующей заменой выбитого электрона электроном с более высокой оболочки

В первом случае (см. рис. 23.2, а) замедление электрона приводит к излучению фотона рентгеновского излучения, диапазон длины волны которого составляет от 0,01 до 10 нм (непрерывный спектр). Интенсивность такого излучения пропорциональна атомному номеру (заряду ядра, Z) химического элемента вещества, из которого сделан анод. Чем больше номер элемента, тем быстрее его ядро замедлит летящий электрон и тем большей энергией будет обладать фотон рентгеновского излучения. Ну и конечно, чем большее напряжение приложено между катодом и анодом рентгеновской трубки, тем больше мощность

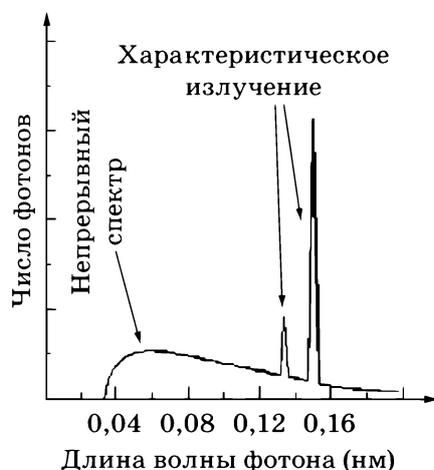


Рис. 23.3. Зависимость мощности рентгеновского излучения медного анода от длины волны (спектр). Пики характеристического излучения соответствуют переходу электронов с *M*- (левый) и *L*- (правый) оболочек на место выбитого электрона *K*-оболочки (см. рис. 23.2, б)

рентгеновских лучей. При этом минимальная длина волны рентгеновского фотона уменьшается, а его энергия с ростом напряжения между электродами увеличивается.

Во втором случае (см. рис. 23.2, б), когда после столкновения с электроном атом ионизуется, место выбитого электрона сразу занимает электрон с более удаленной оболочки, а энергия, выделенная при этом, совпадает с энергией рентгеновского фотона с частотой, соответствующей разнице уровней для данного атома. Так, например, из алюминия ($Z = 13$) выбивают фотоны с длиной волны 0,8 нм, из меди ($Z = 29$) — 0,15 нм, а из платины ($Z = 78$) — 0,02 нм. Эту длину волны назвали характеристической, так как она характеризует материал, из которого сделан анод рентгеновской трубки. Поэтому спектр рентгеновского излучения выглядит как наложение плавной кривой (первый механизм) и пиков, соответствующих характеристической частоте материала анода (рис. 23.3). Согласно закону Мозли, длина волны характеристического излучения уменьшается обратно пропорционально атомному номеру элемента Z .

Из всей мощности, подводимой к рентгеновской трубке, в рентгеновское излучение преобразуется не более 1%, а вся остальная превращается в тепло, разогревающее анод. Поэтому приходится использовать систему охлаждения анода (см. рис. 23.1) и делать его из тугоплавкого металла, например вольфрама.

Что такое рентгеновская спектроскопия

Каждый химический элемент особенно сильно поглощает рентгеновское излучение строго определенной, характеристической длины волны. При этом происходит переход атома из нормального состояния в ионизованное с одним удаленным электроном. Поэтому, измеряя частоту рентгеновского излучения, на которой поглощение особенно

велико, можно сделать вывод о том, какие элементы и в каком отношении входят в состав вещества. Это и составляет основу рентгеновской спектроскопии материалов.

Почему кости останавливают рентгеновские лучи

Проникающая способность рентгеновских лучей, другими словами, их жесткость, зависит от энергии фотонов — фотоны с более короткой длиной волны проникают глубже. Принято называть мягким излучение с длиной волны, большей 0,1 нм, а остальное — жестким. Как следует из таблицы 23.1, для диагностических целей следует использовать жесткое излучение с длиной волны не более 0,01 нм, иначе рентгеновские лучи не пройдут через тело человека.

Зависимость проникающей способности рентгеновского излучения от длины волны

Таблица 23.1

Энергия фотона, пДж	Частота излучения, Гц	Длина волны, нм	Толщина материала, задерживающая половину излучения, мм			
			Бетон	Свинец	Тело человека	Алюминий
0,00016	$2,4 \cdot 10^{17}$	1,24	0,0009	0,0001	0,002	0,002
0,0016	$2,4 \cdot 10^{18}$	0,124	0,15	0,005	0,001	0,1
0,016	$2,4 \cdot 10^{19}$	0,0124	17	0,1	39	15
0,16	$2,4 \cdot 10^{20}$	0,00124	46	9	93	42
1,6	$2,4 \cdot 10^{21}$	0,000124	132	12	298	111

Оказалось, что вещество тем больше поглощает рентгеновское излучение, чем больше плотность материала: $I = I_0 e^{-\mu x}$, где I_0 — первоначальная интенсивность излучения, I — его интенсивность после прохождения через материал плотностью ρ и толщиной x , а μ — коэффициент, зависящий от материала. Более точно поглощение определяется числом атомов в единице объема и пропорционально атомному номеру в кубе (Z^3) в таблице Менделеева. Таким образом, чем больше атомов на своем пути встретит рентгеновское излучение и чем больше электронов будет в оболочках этих атомов, тем больше вероятность поглощения фотона.

Поэтому в теле человека рентгеновские лучи сильнее всего поглощаются в костях, плотность которых относительно большая и в которых много атомов кальция ($Z = 20$). При прохождении лучей через кость интенсивность излучения уменьшается вдвое через каждые 1,2 см, через кровь, мышцы, жир и желудочно-кишечный тракт — через каждые 3,5 см. Ну, а меньше всего задерживает излучение воздух в легких — 192 м. Поэтому кости в рентгеновских лучах на фотопленке образуют тень (рис. 23.4). В остальных местах, где лучам удалось за-

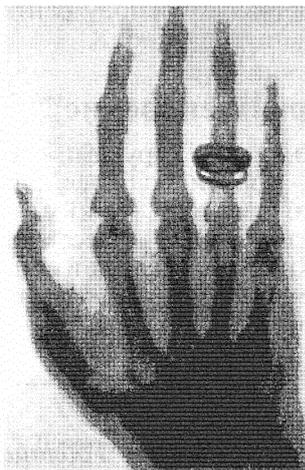


Рис. 23.4. Снимок в X -лучах руки жены В. Рентгена с обручальным кольцом, показанный наряду с другими снимками во время сообщения 28 декабря 1895 г. об открытии X -лучей

светить пленку, она делается темной, что дает возможность врачам видеть пациента насквозь.

Если врачу необходимо увидеть желудок, то пациент выпивает раствор солей бария ($Z = 56$), который сразу же становится заметным на рентгеновском снимке, так как сильно поглощает излучение. Чтобы сделать видимыми для рентгеновских лучей различные кровеносные сосуды человека, вводятся безвредные соли, содержащие атомы с большим Z .

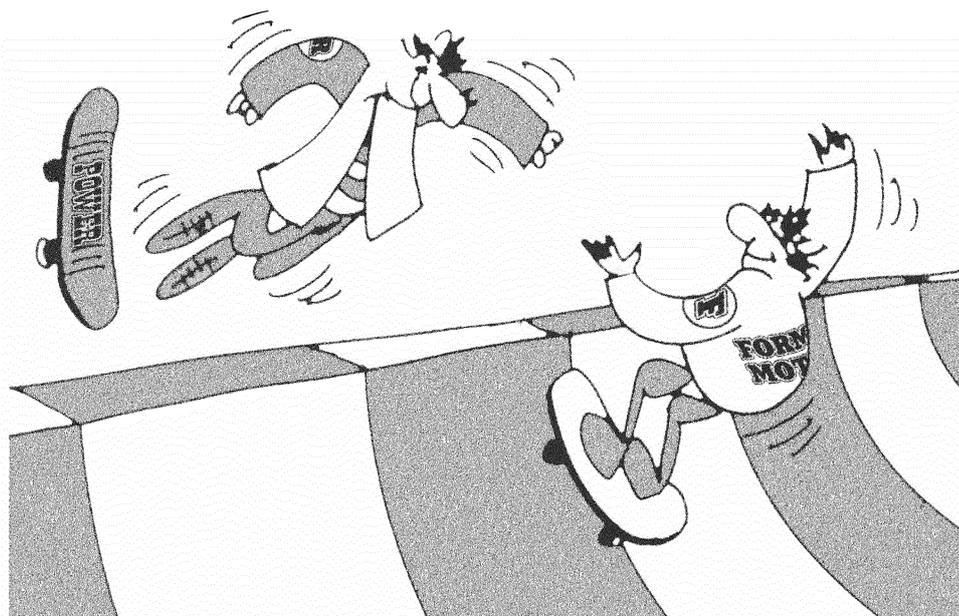
В наше время рентгенологические исследования в большинстве случаев проходят без фотопленки, а прошедшее через пациента излучение делается видимым для человека с помощью специальных люминофоров. Этот метод, называемый флюорографией, при обследованиях позволяет в несколько раз снизить интенсивность излучения и сделать его безопасным.

Как рентгеновские лучи видят легкие атомы

Чем меньше заряд ядра атома, тем больше рентгеновские лучи передают электронам свою энергию. Другими словами, рентгеновское излучение обладает способностью рассеиваться (явление Комптона) в веществе, состоящем из легких атомов. Тяжелые атомы в большей степени поглощают рентгеновское излучение, чем рассеивают его, так как их электроны сильно связаны с ядром. Таким образом, материалы, содержащие только легкие элементы (например, водород, углерод, азот и кислород), часть рентгеновского излучения возвращают обратно, уменьшив его жесткость (увеличив длину волны). Это свойство рентгеновских лучей используют для обнаружения взрывчатки и наркотиков при досмотре багажа.

Глава 24

Законы преломления света и самая быстрая горка



Казалось бы, чем короче путь, тем быстрее доберешься до его конца. Поэтому катиться с вершины горы надо по наклонной плоскости. Но не все так просто. Давно заметили, что шарик скатывается по наклонной плоскости дольше, чем по траектории, имеющей криволинейный профиль (рис. 24.1). Еще в 1696 г. И. Бернулли в журнале *Acta Eruditorum* опубликовал письмо с интригующим заглавием «Новая задача, к решению которой приглашаются матема-

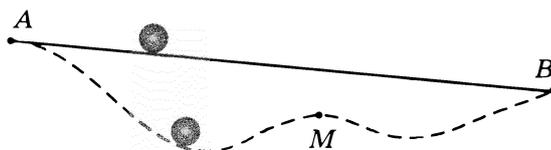


Рис. 24.1. Давно было замечено, что шарик, катящийся по наклонной плоскости из точки A в точку B , тратит на спуск больше времени, чем такой же шарик, спускающийся по криволинейной траектории AMB , имеющей специальный профиль

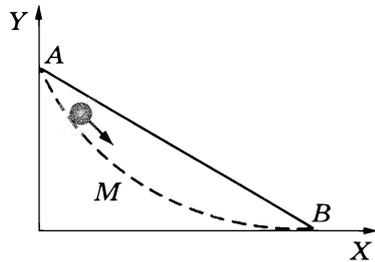


Рис. 24.2. Рисунок к задаче И. Бернулли о поиске брахистохроны. Между точками A и B необходимо найти траекторию скорейшего спуска под действием только силы тяжести. Тонкой линией обозначена наклонная плоскость, соединяющая эти точки, а штриховой — искомая брахистохрона

тики». Условие задачи было следующим: «В вертикальной плоскости даны точки A и B (рис. 24.2). Определить путь AMB , спускаясь по которому под действием собственной тяжести и при отсутствии сил трения тело, начав двигаться из точки A , достигнет точки B в кратчайшее время». И. Бернулли предложил называть кривую, соответствующую скорейшему спуску с горы, «брахистохроной», состоящей из двух греческих слов: $\beta\rho\alpha\chi\iota\sigma\tau\omicron\zeta$ — самое короткое и $\chi\rho\omicron\nu\omicron\zeta$ — время. И. Ньютон, Г. Лейбниц, Г. Лопиталь и Я. Бернулли откликнулись на это письмо, решив задачу разными способами, но получив одинаковый ответ: брахистохрона — это циклоида.

Что такое циклоида

Одним из первых определение циклоиды дал Паскаль, назвав ее кривой, «описываемой в воздухе гвоздем колеса, когда оно катится своим движением с того момента, как гвоздь начал подниматься от земли, до того, когда непрерывное качение колеса не приводит его опять к земле после окончания целого оборота». Сначала попробуем расшифровать данное Паскалем определение циклоиды и вывести ее уравнение, а потом доказать, что она действительно является брахистохроной.

Выберем на плоскости систему координат так, чтобы прямая, по которой катится колесо, совпадала с осью OX , и пусть колесо катится в положительном направлении оси OX (рис. 24.3). Предположим, что в начальный момент времени наблюдаемый гвоздь занимает положение в начале координат $O(0,0)$. Если r — радиус колеса, то его центр C будет двигаться по прямой $y=r$. Через некоторое время гвоздь окажется в точке P , а колесо будет касаться прямой OX в точке B . Пусть PA — перпендикуляр, опущенный на ось OX , а отрезок PD параллелен оси OX ; тогда можно вывести следующие соотношения для координат точек циклоиды:

$$\begin{aligned} x &= OA = OB - AB = OB - PD = r\theta - r \sin \theta, \\ y &= AP = BD = BC + CD = r - r \cos \theta, \end{aligned} \quad (24.1)$$

где θ = угол PCB , который при движении колеса слева направо увеличивается от 0 до 2π . Мы получили так называемое параметрическое задание циклоиды: обе координаты x и y точки P циклоиды являются

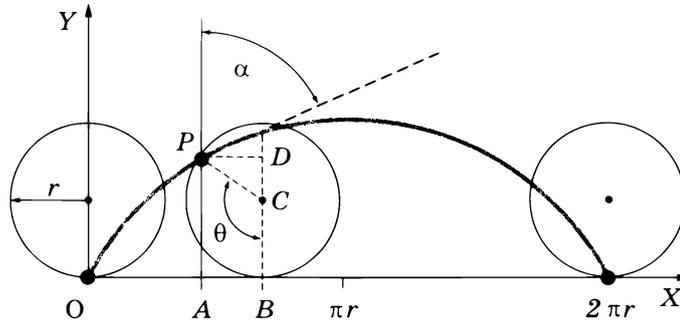


Рис. 24.3. Циклоида — жирная кривая, которую описывает жирная точка (гвоздь), лежащая на границе круга радиусом r , катящегося без скольжения по прямой, совпадающей с осью OX . Остальные обозначения сделаны для вычисления координат точки циклоиды, соответствующей повороту колеса на угол θ . Угол между касательной к циклоиде и вертикалью равен α

функциями от некоторой вспомогательной переменной θ . Исключая θ из системы уравнений (24.1), можно получить уравнение циклоиды:

$$x = r \cdot \arccos\left(1 - \frac{y}{r}\right) - \sqrt{2ry - y^2}. \quad (24.2)$$

Зная уравнение циклоиды, можно вывести выражение для синуса угла α между касательной к ней и вертикалью, которое нам пригодится для доказательства того, что циклоида — это брахистохрона:

$$\sin \alpha = \sqrt{\frac{y}{2r}}. \quad (24.3)$$

Принцип Ферма и геометрическая оптика

И. Бернулли решил задачу о быстром спуске, используя принцип наименьшего действия, сформулированный гениальным математиком XVII в. П. Ферма. В 1650 г. Ферма дал замечательную интерпретацию законов отражения и преломления света на границе двух сред:

$$\frac{\sin(\alpha_{\text{падения}})}{\sin(\alpha_{\text{преломления}})} = n,$$

где n — коэффициент преломления, константа для фиксированной пары сред. Он предположил, что путь распространения света между двумя точками есть такой путь, для прохождения которого свету требуется наименьшее время по сравнению с любым другим путем между этими точками. Теперь это утверждение носит название принципа Ферма. Из принципа Ферма следует, в частности, что поскольку скорость света в однородной среде постоянна, то минимальному времени

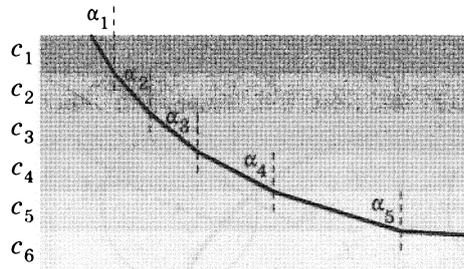


Рис. 24.4. Распространение света сверху вниз через слои с последовательно уменьшающимся коэффициентом преломления. Обозначены углы падения света на границы раздела α_i и скорости света в этих слоях c_i

в пути соответствует минимальное расстояние, а это значит, что свет в однородной среде должен распространяться по прямой.

Использование принципа Ферма в тех случаях, когда свет наталкивается на границу раздела сред с разной скоростью распространения, позволяет вывести известные законы отражения и преломления света на границе раздела, а также в тех случаях, когда среда состоит из горизонтальных слоев, в каждом из которых скорость света постоянна c_1, c_2, c_3, \dots (рис. 24.4). В последнем случае свет будет распространяться по ломаной с вершинами на границах раздела, но для каждой вершины будет соблюдаться равенство:

$$\frac{\sin \alpha_i}{c_i} = \text{const},$$

где α_i — угол, образованный звеном ломаной с вертикалью, лежащим в слое со скоростью света c_i . Если же в некоторой неоднородной оптической среде скорость света меняется непрерывно, но зависит только от значения ординаты y , то в этой среде свет распространяется по кривой S , для которой

$$\frac{\sin \alpha(y)}{c(y)} = \text{const}, \quad (24.4)$$

где $\alpha(y)$ — угол между касательной к кривой S в точке с ординатой y и вертикалью. Отметим, что формула (24.4) была получена из принципа Ферма, полагая, что скорость света зависит только от вертикального положения точки (высоты).

Принцип Ферма и скорейший спуск

И. Бернулли заметил, что скорость тела v , катящегося с горы под действием силы тяжести, тоже зависит только от перепада высоты y :

$$v = \sqrt{2gy}. \quad (24.5)$$

Поэтому все выводы из принципа Ферма, сделанные для распространения света в среде с изменяющейся скоростью света, можно перенести на поиск уравнения для брахистохроны. Другими словами, траектория быстрейшего спуска между точками A и B должна удовле-

творять уравнению (24.4), где вместо $c(y)$ надо подставить выражение (24.5) для v , после чего уравнение для брахистохроны примет вид:

$$\frac{\sin \alpha(y)}{\sqrt{y}} = \text{const.} \quad (24.6)$$

Простое сравнение уравнений (24.3) и (24.6) показывает, что траекторией быстрого спуска должна быть перевернутая циклоида.

Как спуститься быстрее без циклоиды

Чтобы ускорить движение между точками A и B , не обязательно спускаться по циклоиде. Можно, например, заменить путь по наклонной плоскости, соединяющей эти точки, двумя наклонными плоскостями, расположенными чуть ниже. Кстати, такие же эксперименты ставил Галилей, пытаясь найти брахистохрону задолго до И. Бернулли. Простой расчет показывает, что время скольжения по такой ломаной наклонной плоскости будет почти всегда меньше, чем по обычной.

Если вертикальный размер горки h не превышает ее горизонтального размера L , то время спуска по любой ломаной наклонной плоскости, лежащей ниже обычной наклонной плоскости, окажется меньшим. Как показали расчеты, выигрыш во времени (в %) для каждого $\frac{h}{L}$ зависит от того, где находится перегиб и насколько он глубокий. На рисунке 24.5 показаны различные ломаные наклонные плоскости с переломом в начале (a), середине (b) и конце ($в$) горки с $\frac{h}{L} = 0,2$.

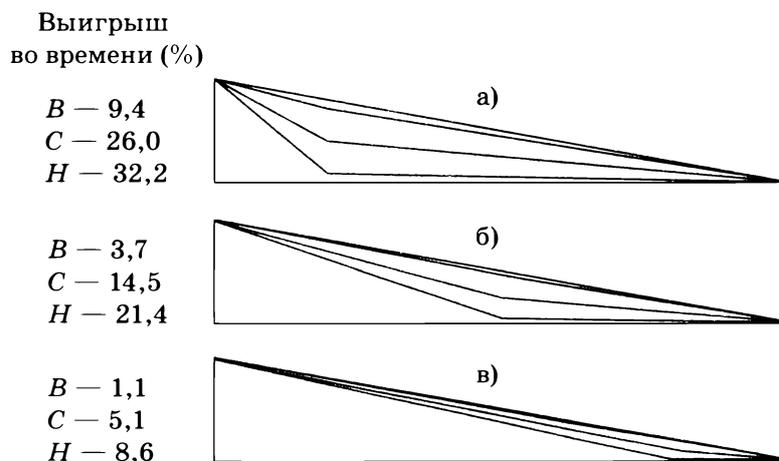


Рис. 24.5. Пологая горка. Выигрыш во времени при спуске по ломаной наклонной плоскости по сравнению с обычным спуском в тех случаях, когда перелом находится ближе к началу (a), в середине (b) и в конце ($в$) горки; B , C и H соответствуют верхней, средней и нижней ломаным в каждой из панелей ($a - в$)

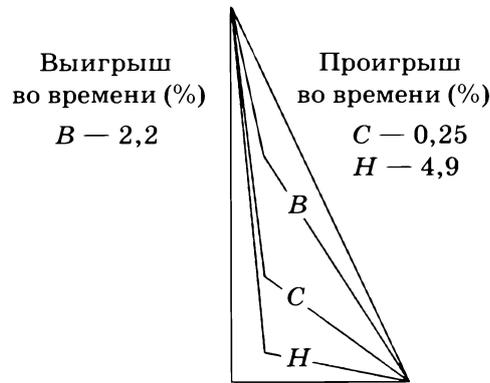


Рис. 24.6. Крутая горка. Выигрыш и проигрыш во времени при спуске по ломаной наклонной плоскости по сравнению с обычным спуском по наклонной плоскости; B , C и H соответствуют верхней, средней и нижней ломаным

Когда горка крутая ($h > L$), то выигрыш от спуска по ломаной наклонной плоскости очень мал и никогда не превышает 7%. Это объясняется тем, что, скатываясь по крутой горке, мы и без излома быстро набираем скорость, а ее излом значительно удлиняет путь. Поэтому максимальный выигрыш для крутых горок соответствует не самому глубокому перелому, а промежуточному. Так, для горки с $\frac{h}{L} = 2$, изображенной на рисунке 24.6, максимальный выигрыш во времени спуска (2,2%) соответствует верхней ломаной B . Когда же изломы при спуске с крутых горок становятся очень глубокими, то спуск по таким ломаными плоскостями становится уже невыгодным (см. ломаные C и H на рисунке 24.6), и вместо быстрого спуска мы слегка запаздываем. Таким образом, спуск по ломаными наклонным плоскостями дает выигрыш во времени только тогда, когда горки пологие ($h < L$).

А может ли быть на быстрой горке гребень

Заменим обычную наклонную плоскость, соединяющую A и B , ломаной, по которой спуск окажется быстрее (рис. 24.7). Пойдем еще дальше и заменим каждый из двух линейных участков такой горки циклоидами, и тогда мы получим горку, с изображения которой и началась эта глава.

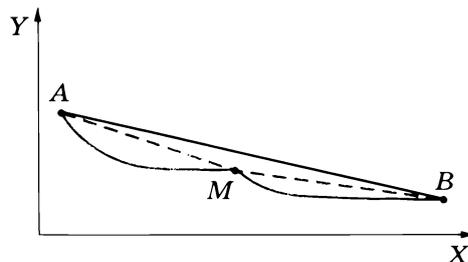
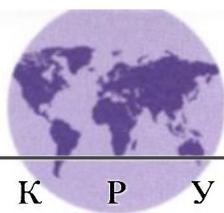


Рис. 24.7. Иногда даже гребень на пути спуска с горы не мешает прийти раньше того, кто просто катится по наклонной плоскости



Т В О Й К Р У Г О З О Р

К. Ю. БОГДАНОВ

Не только о физике яйца

ЭТА КНИГА РАССКАЗЫВАЕТ, КАК НА ОСНОВЕ ЗАКОНОВ ФИЗИКИ РАСКРЫВАЮТСЯ ЗАГАДКИ ЯВЛЕНИЙ ПРИРОДЫ, ПОВСЕДНЕВНОЙ ЖИЗНИ И ЧЕЛОВЕЧЕСКОГО ОБЩЕНИЯ. С ПОМОЩЬЮ ЯЗЫКА ФИЗИКИ ВЫ СМОЖЕТЕ ИССЛЕДОВАТЬ ОКРУЖАЮЩИЙ МИР И ОБЪЯСНИТЬ ТО, ЧТО РАНЬШЕ КАЗАЛОСЬ НЕОБЪЯСНИМЫМ.

«Твой кругозор» – это проверенные временем традиции научно-познавательной литературы для детей. В серию вошли лучшие книги по гуманитарным и естественно-научным предметам, написанные российскими и зарубежными авторами. Книги серии позволят вам расширить кругозор, повысить свой образовательный уровень и стать знатоками в различных областях знаний.

МАТЕМАТИКА РУССКИЙ ЯЗЫК ФИЗИКА ГЕОГРАФИЯ ИСТОРИЯ

ISBN 978-5-09-017170-0



9 785090 171700