

Индекс 70465



Библиотечка КВАНТ



ВЫПУСК

98

ВЫПУСК
98

ПРОГУЛКИ С ФИЗИКОЙ • Библиотечка КВАНТ

ВЫПУСК

98



Библиотечка КВАНТ

К. Ю. Богданов

ПРОГУЛКИ С ФИЗИКОЙ



Б Ю Р О

КВАНТУМ



БИБЛИОТЕЧКА

КВАНТ

ВЫПУСК

98

Приложение к журналу
«Квант» № 6/2006

К.Ю.Богданов

ПРОГУЛКИ С ФИЗИКОЙ



Москва

2006

УДК [001+62]:53(078)
ББК 72+30я7
Б73

Серия
«Библиотечка «Квант»
основана в 1980 г.

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

Б.М.Болотовский, А.А.Варламов, В.Л.Гинзбург,
Г.С.Голицын, Ю.В.Гуляев, М.И.Каганов, С.С.Кротов,
С.П.Новиков, Ю.А.Осипьян (председатель),
В.В.Произволов, Н.Х.Розов, А.Л.Стасенко, В.Г.Сурдин,
В.М.Тихомиров, А.Р.Хохлов,
А.И.Черноуцан (ученый секретарь)

Б73 Богданов К.Ю.

Прогулки с физикой. — М.: Бюро Квантум, 2006. —
192 с. (Библиотечка «Квант». Вып. 98. Приложение к жур-
налу «Квант» № 6/2006.)
ISBN 5-85843-063-5

Книга представляет собой краткое изложение дополнительного курса по физике «Наука и техника для любознательных», прочитанного автором в одной из московских школ. На многочисленных примерах показано, как использование известных законов физики помогает раскрыть загадки явлений природы, повседневной жизни и жизни человеческого общества.

Для учащихся и учителей средних школ, лицеев и гимназий, для членов и руководителей физических кружков и факультативов, а также для всех тех, кому просто интересна физика.

ББК 72+30я7

ISBN 5-85843-063-5

© Бюро Квантум, 2006

ПРЕДИСЛОВИЕ

Обычно физику изучают по учебникам – сначала обо всем понемножку, а в старших классах уже подробнее и по заведенному давным-давно расписанию: механика, тепловые явления, электродинамика, колебания и волны, оптика и, наконец, квантовая физика. Самые талантливые ученые и педагоги непрерывно совершенствуют методику преподавания физики в средней школе, обновляя материал старых учебников и создавая новые.

Физические законы открывают перед нами правила, по которым живет природа, тайны устройств и механизмов вокруг нас. Знание законов и умение решать задачи дает нам возможность исследовать окружающий мир и объяснять то, что раньше казалось необъяснимым. Оглянемся вокруг. На все ли «Почему?» и «Как?» мы можем без труда ответить? Наверняка, нет! Так давайте потрудимся, поразмышляем, сравним возможные варианты и попробуем найти ответы на разные, в том числе «неочевидные», вопросы. Сделав это, мы станем лучше чувствовать физику явлений. Ведь обучаться физике, как и всему другому, можно не только по учебникам, но и исследуя окружающий нас мир. Иностранный язык, например, можно выучить, просто поехав в ту страну, где на нем говорят. А нам повезло, поскольку страна-физика всегда вокруг нас и нам никуда не надо ехать. Так будем же учиться ее языку, 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. Так, правило рычага дает совет, как, не надорвавшись, поднимать большие 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 было бы просто невозможным создание различных технических и электронных устройств, в том числе и компьютеров. Поэтому можно считать, что именно физика в течение тысячелетий толкала человечество по пути прогресса.

Однако физика не только сделала нашу жизнь более комфорт-

ной, но и дала возможность узнать, как устроены мы сами, открыть причины многих болезней и найти методы их лечения. Большинство работ по биологии и медицине, удостоенные Нобелевских премий, были бы невозможны без участия физиков. Физические модели общества позволяют предсказать, каким будет наше общество в будущем, а физические модели биржевых торгов – какими будут цены на акции завтра. Физика соединяет между собой многие отрасли знаний: астрономию, химию, биологию, социологию, экономику, географию, геологию и другие науки в мощное орудие познания.

Предлагаемая вашему вниманию книга представляет собой краткое изложение курса лекций «Наука и техника для любознательных», прочитанных автором ученикам 10–11 классов московской школы 1326 в течение 2003–2006 годов. В книге на многочисленных примерах показано, как использование известных законов физики помогает раскрыть загадки явлений природы, повседневной жизни и человеческого общества. Многие главы книги были до этого опубликованы в научно-популярном физико-математическом журнале для школьников и студентов «Квант» и в газете «Физика» (Издательский дом «Первое сентября»).

Книга может быть использована учителями физики при разработке программ профильного или углубленного изучения предмета, для проведения факультативных и кружковых занятий и чтения дополнительных курсов. Старшеклассники средних школ, лицеев и гимназий смогут воспользоваться материалами книги при выборе тем и при подготовке докладов на школьных или иных научно-практических конференциях. А вообще, книга адресована всем тем, кто считает себя любознательным.

Считаю своим приятным долгом выразить благодарность директору школы 1326 Н.М.Сальникову, который пригласил меня прочесть этот курс лекций. Кроме того, я очень благодарен главному редактору газеты «Физика» Н.Д.Козловой, которая предложила опубликовать несколько лекций моего курса на страницах газеты и этим приблизила рождение данной книги. Особенно хочется отметить полезные замечания заместителя главного редактора журнала «Квант» А.И.Черноуцана, первого читателя многих глав этой книги, и выразить ему мою искреннюю благодарность. Счастливая идея опубликовать эту книгу в серии «Библиотечка «Квант» пришла члену редколлегии «Кванта» Ю.М.Бруку во время долгих телефонных разговоров с ним, за что я его тоже благодарю.

К.Ю. Богданов

ПОСОБИЕ ПО ФИЗИКЕ ДЛЯ ПОКУПАТЕЛЕЙ ЛАМПОЧЕК

Освещенные окна домов и улицы, огни рекламы и проносящихся 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 устраивать ночлег в глубине пещер, где до сих пор находят их наскальные рисунки. Свет факелов сделал рабочий день первобытных людей более продолжительным и продуктивным, способствуя таким образом прогрессу человечества. С тех пор как человек впервые использовал факел для освещения, прошло несколько десятков тысяч лет, но и сейчас, сами того не замечая, мы продолжаем использовать факелы, ведь слово «лампа» происходит от греческого *λαμπτα*, что означает факел.

До конца XIX века искусственное освещение было газовым или керосиновым и всегда сопровождалось копотью, а иногда и искрами, от которых легко мог возникнуть пожар. При горении концентрация кислорода в воздухе помещения уменьшалась, а углекислый газ накапливался – становилось душно. Даже если зажигали много светильников одновременно, света не хватало. Да и горючее стоило дорого.

Научные исследования В.В.Петрова (1761–1834), Г.Дэви (1778–1829), П.Н.Яблочкова (1847–1894), А.Н.Лодыгина (1847–1923) и Т.Эдисона (1847–1931) дали человечеству первую газоразрядную лампочку (свеча Яблочкова) и лампу накаливания, открыв эру электрического освещения – без копоти, газа и дыма. Электрическая лампа была пожаробезопасна, ее не нужно было регулярно открывать, чтобы заправить горючим или подправить фитиль. Годом рождения электрического освещения считают 1880 год, и с тех пор у электрической лампы нет конкурентов.

Известные и неизвестные имена в ламповом семействе. Наступает день, и мы идем в магазин, чтобы выбрать подходящую лампу для дома или офиса. Какую лампу выбрать? 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);

- газоразрядные, свет в которых возникает из-за электрического разряда в лампах, наполненных различными газами.

Однако лампы накаливания бывают разные: аргоновые, криптоновые, ксеноновые, галогенные и кварц-галогенные. В свою очередь, газоразрядные лампы подразделяются на те, где газ внутри находится:

под низким давлением (лампы дневного света, или люминесцентные, ультрафиолетовые и так называемые неоновые лампы рекламных огней);

под высоким давлением (ртутные паросветные лампы, натриевые дуго-разрядные и металлогалогенные лампы).

Газоразрядные лампы высокого давления обладают огромной яркостью и не предназначены для домашних условий. Они широко используются в осветительных установках различных коммерческих помещений, выставок, торговых центров, служебных помещений, гостиниц и ресторанов, для подсветки рекламных щитов и витрин, для освещения спортивных сооружений и стадионов, для архитектурной подсветки зданий и сооружений.

Что касается ламп накаливания (рис.1), то здесь вроде бы все ясно. Через вольфрамовую нить прохо-

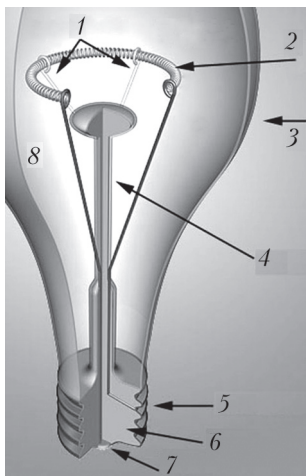


Рис.1. Схематический разрез обычной лампы накаливания: 1 - опоры, фиксирующие положение спирали; 2 - вольфрамовая нить, свернутая в спираль; 3 - стеклянная колба лампы; 4 - стеклянная стойка, поддерживающая опоры спирали; 5 - винтовой электрический контакт; 6 - изолятор; 7 - нижний электрический контакт лампы; 8 - инертный газ, заполняющий лампу накаливания

дит электрический ток, накаляет ее добела, и она становится источником света. Непонятно только, зачем лампы накаливания заполняют то аргоном, то криптоном, а то и галогенами. Названия остальных ламп вызывают еще больше вопросов. То, что разряд молнии может на мгновение осветить все вокруг, доказывать не надо, но как такие же разряды через наполненную паром

лампу могут быть источником постоянного света? И вообще, откуда берется свет?

Свет излучают вещества, доведенные до раскаленного состояния. В пламени свет излучают раскаленные частички сажи, а в лампе накаливания – вольфрамовая нить. Кстати, в первых лампах ток пропускали через хлопковые нити, покрытые угольной пылью, и только в 1915 году американский физик И.Ленгмюр (1881–1957), будущий лауреат Нобелевской премии по химии (1932 г.), предложил изготавливать нити накаливания из самого тугоплавкого металла – вольфрама, что в несколько раз увеличило срок их службы и яркость.

Чем выше температура нити, тем большая часть энергии, подводимой к лампе, излучается в виде света. Но чем ближе температура нити к температуре плавления вольфрама (3380 °С), тем быстрее нить испаряется, а лампочка перегорает. Чтобы замедлить испарение нити, Ленгмюр предложил заполнять лампы накаливания инертным газом. Это увеличивает срок службы ламп до 1000 часов.

Инертный газ внутри ламп накаливания. Почему заполнение ламп накаливания инертным газом замедляет испарение? Представим себе, что одна из молекул вольфрама, находящаяся на поверхности нити, получив от соседей достаточно энергии, чтобы «испариться», покидает поверхность, но сразу же наталкивается «лоб в лоб» на подлетающую к нити молекулу газа. Очевидно, что результатом такого столкновения будет возвращение «блудной» молекулы вольфрама обратно к нити. А значит, присутствие газа в лампе накаливания должно замедлять испарение вольфрама. С другой стороны, чтобы вольфрам не потерял свое уникальное свойство – быть самым тугоплавким металлом, этот газ не должен вступать в химическую реакцию с вольфрамом, т.е. должен быть инертным. Но какой инертный газ выбрать?

К инертным (или благородным) газам относятся шесть элементов – гелий, неон, аргон, криптон, ксенон и радон, находящихся в VIII группе периодической системы Менделеева. Свое название они получили за то, что практически не вступают в химические реакции даже при высоких температурах. Внешняя электронная оболочка их атомов заполнена полностью, что препятствует соединению с другими атомами, делая эти газы инертными.

Первым, в 1868 году, обнаружили гелий, но не на Земле, а на Солнце. Это сделали астрономы, когда стали изучать спектр испускаемого солнечным диском света. Линия в этом спектре

указывала на присутствие неизвестного химического элемента. Его называли гелий – латинское helium от греческого helios, т.е. солнце, считая, что открыли свечение одного из неизвестных металлов, находящихся на поверхности Солнца. Поэтому окончание «ium» в его названии соответствовало металлической природе открытого элемента. Спустя много лет оказалось, что гелий не металл, а самый легкий из инертных газов, но название осталось прежним. Открытие всех инертных газов (кроме радона) было сделано при активном участии У.Рамзая (1852–1916) в самом конце XIX века, и за это ему была присуждена Нобелевская премия по химии (1904 г.). И конечно, все инертные газы (кроме гелия) получили названия, оканчивающиеся на «on», принятые для газов.

Выбирая инертный газ для ламп накаливания, учитывали его свойства и доступность (цену). Радон, являясь продуктом радиоактивного распада радия, сам обладал радиоактивностью и поэтому сразу же был исключен из списка возможных кандидатов. Гелий (относительная молекулярная масса 4) был чересчур легким для того, чтобы отталкивать испаряющиеся атомы вольфрама (относительная молекулярная масса 184) обратно к нити. Неон (относительная молекулярная масса 20), хотя и был тяжелее гелия в 5 раз, но стоил раз в 10 дороже. Следующим в списке был аргон (относительная молекулярная масса 36). Концентрация аргона 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 200000 раз меньше, чем у 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 (относительная молекулярная масса 72) (и ксенона, относительная молекулярная масса 108) относительно дешевым, что позволило использовать криптон вместо аргона при заполнении ламп накаливания. Как и следовало ожидать, срок службы криптоновых ламп увеличился, по сравнению с аргоновыми. Кроме того, криптоновые лампы позволяют увеличить температуру раскаленной вольфрамовой нити, сохраняя тот же срок службы, что и у аргоновых. В результате яркость криптоновых ламп может быть на 10% выше, чем у аргоновых ламп той же мощности.

Галогенная лампа – современный предел для лампы накаливания. Обычная лампа накаливания, даже наполненная криптоном, обладает рядом недостатков. Один из них – относительно

большие размеры, так как стекло лампы может расплавиться, если приблизить его к спирали достаточно близко. Можно, конечно, вместо обычного стекла использовать кварцевое, температура плавления которого гораздо выше. Однако только замена обычного стекла на кварцевое не позволяет получить компактную лампу накаливания. Испаряющийся вольфрам, осаждаясь на меньшую поверхность лампы, быстро затемняет ее, блокируя свет, идущий от раскаленной нити.

В 1958 году в компании «Дженерал электрик» (General Electric) было найдено технологическое решение – так называемый галогенный цикл, с помощью которого можно удалять с внутренней поверхности стекла осевшие там 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 так близко к раскаленной нити, чтобы его температура стала выше 200°C . Галогенный цикл (рис.2) работает следующим образом:

1 – испарившаяся молекула вольфрама движется по направлению к стеклу лампы и осаждается на нем;

2 – находясь на поверхности лампы, молекула вольфрама образует молекулу с атомом брома и переходит в газообразное состояние;

3 – молекула вольфрам-бром движется с конвективными потоками газа и случайно «натывается» на раскаленную спираль лампы;

4 – оказавшись на спирали, соединение вольфрама и брома диссоциирует (распадается) на вольфрам, остающийся на спирали, и бром, уходящий в газ, наполняющий лампу.

Таким образом, галогенный цикл очищает внутреннюю поверхность стекла от осаждающихся там молекул вольфрама и одновременно восстанавливает целостность вольфрамовой нити. Поэтому использование галогенного цикла позволяет уменьшить размеры ламп накаливания, что делает их незаменимыми

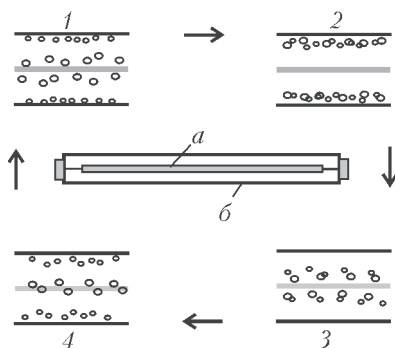


Рис.2. Схема галогенного цикла: 1–4 – последовательные этапы цикла; а – вольфрамовая нить; b – колба лампы, сделанная из тугоплавкого стекла; крупные кружочки – атомы вольфрама, мелкие – галогена

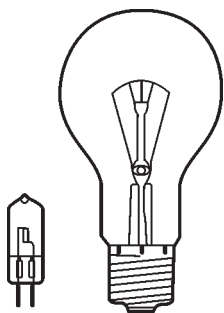


Рис.3. Миниатюрная галогенная лампа (слева) и обычная лампа накаливания (справа)

в качестве источника света, например в автомобильных фарах, и поднять температуру нити с 2500 до 3000 °С. В результате галогенные лампы обладают не только удвоенным ресурсом работы (2000 часов), но и увеличенной на 20% яркостью по сравнению с обычными лампами накаливания такой же мощности. Иными словами, они экономят энергию, расходующую на освещение. Галогенные лампы могут иметь самые различные формы, но их размеры, как правило, меньше, чем у обычных ламп накаливания (рис.3).

Как зажечь свет вдали от электрической розетки. Как правило, мы вспоминаем об электрическом фонарике только тогда, когда у нас дома гаснет свет. Электрический фонарик, работающий на батарейках или аккумуляторах, служит одним из примеров низковольтных источников освещения. А самым распространенным низковольтным источником освещения являются, конечно, автомобильные фары. Кроме того, низковольтное освещение широко используется там, где велика вероятность поражения электрическим током, — при подсветке бассейнов и фонтанов, а также загородных домов (рис.4).

Большинство современных низковольтных ламп накаливания — это галогенные лампы, работающие от напряжения 12 В.



Рис.4. Низковольтная лампа накаливания с параболическим отражателем (слева) и ее использование для локальной подсветки снаружи загородного дома

Низкое электрическое напряжение позволяет сделать эти лампы не только электрически безопасными, но и сверхминиатюрными. И вот почему. Электрический ток через обычную галогенную лампу и низковольтную одинаков, так как его величина определяется только диаметром вольфрамовой нити. С другой стороны, закон Ома требует, чтобы в низковольтных лампочках, где электрическое напряжение уменьшено в 20 раз, сопротивление электрическому току было уменьшено тоже в 20 раз по сравнению с обычными галогенными лампами, предназначенными для напряжения в 220 В. Таким образом, длина нити накаливания в низковольтных лампах приблизительно в 20 раз меньше, что и обеспечивает источнику света очень малые размеры (точечный источник света).

Источники света малых размеров широко используются для получения практически параллельных пучков света, для чего источник помещают в фокусе параболического зеркала. Параллельные пучки света применяют для локального освещения объектов и избранных направлений в окружающем пространстве, что, очевидно, позволяет снизить энергетические расходы на освещение. Поэтому низковольтные лампы накаливания, снабженные параболическим зеркалом, чаще всего используют в тех случаях, когда необходима локальная подсветка.

Еще одно преимущество низковольтных ламп – высокая устойчивость к тряске. Это их свойство опять следует из малой длины и массы их нити накаливания. В результате силы инерции, возникающие при ускорениях лампы и являющиеся основной причиной разрыва нити накаливания, приблизительно в 20 раз меньше, чем у ламп, рассчитанных на 220 В. А значит, и устойчивость низковольтных ламп к тряске во столько же раз выше.

Однако низковольтные лампы не лишены и недостатков. Тем, кто не хочет возиться с батарейками и аккумуляторами, необходимо приобрести трансформатор, понижающий напряжение с 220 В до той величины, для которой предназначена низковольтная лампа. Это несколько удорожает и усложняет установку низковольтного освещения.

Газоразрядная лампа: светит, но не греет. Главным недостатком ламп накаливания является то, что большая часть энергии, расходуемой на освещение, тратится на нагрев ламп. Даже в самых экономичных галогенных лампах только 10% затраченной энергии превращается в свет, а остальные 90% – в тепло. Однако имеется и другой способ сделать свет из электричества – электрический разряд.

Электрический дуговой разряд в воздухе впервые описал Василий Владимирович Петров в 1802 году. Ослепительно яркий свет электрической дуги тогда давал надежду, что со временем люди смогут отказаться от свечей, лучины, керосиновой лампы и даже газовых фонарей. Однако в первых дуговых светильниках приходилось постоянно сдвигать поставленные «носами» друг к другу угольные электроды, и поэтому они достаточно быстро выгорали. В 1875 году Павел Николаевич 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, став первой серийно выпускаемой газоразрядной лампой, обладала двумя преимуществами по сравнению с лампами накаливания Эдисона: во-первых, ее свет был белым, а не желтоватым, как у ламп накаливания, и, во-вторых, она давала большую яркость по сравнению с лампами накаливания той же мощности. Поэтому она, например, в течение многих лет использовалась в качестве лампы кинопроекторов, 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) стало изобретение американского физика П.Хьюита, предложившего в 1903 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. невидимая для глаза человека. Для того чтобы сделать ее видимой, предложили покрывать лампы Хьюита изнутри специальным веществом, люминофором, которое поглощало бы ультрафиолетовое излучение, а взамен излучало видимое. Сначала для этого выбрали бериллий, но он оказался очень токсичным (особенно вредным для легких), а потом остановились на фосфоре. Покрытые изнутри фосфором, лампы Хьюита получили название люминесцентных и стали широко использоваться в освещении с 1938 года. 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 шесть 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 сожалению, у люминесцентных ламп, как и у всех газоразрядных, есть и недостатки – они дороже, их невозможно 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. Многие неслучайно отзываются о лампах дневного света, считая, что мигание при включении и гудение при работе делают их использование дома весьма проблематичным. Однако это неверно, так как современные модели люминесцентных ламп лишены этих недостатков. Но сначала разберемся, как работает обычная люминесцентная лампа, имеющая форму длинной цилиндрической трубки. Как видно (рис.5), лампа дневного света, вообще

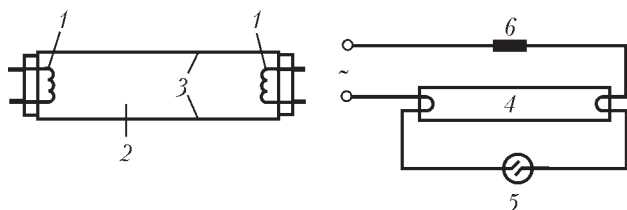


Рис.5. Как устроена люминесцентная лампа (слева) и как она подключается к сети (справа): 1 – вольфрамовые спирали; 2 – смесь паров ртути и аргона, заполняющая лампу; 3 – люминофор (фосфор), покрывающий внутреннюю поверхность лампы; 4 – лампа в схеме подключения; 5 – стартер; 6 – дроссель

говоря, не лампа, а электрический прибор, состоящий из собственно лампы (4), которая светится, когда внутри нее происходит электрический разряд, стартера (5), разогревающего электроды лампы перед возникновением разряда, и дросселя (6), ограничивающего величину электрического тока через лампу.

Чтобы в газоразрядной лампе возник электрический разряд, напряжения сети (220 В) между ее электродами недостаточно, так как газ внутри нее, 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 нагреется, часть

электронов испарится с его поверхности и под действием электрического поля начнет двигаться к противоположному электроду, время от времени натываясь на атомы газа. Столкновение летящего электрона с нейтральным атомом газа вызывает ионизацию последнего, в результате чего количество свободных электрических зарядов лавинообразно увеличивается, в лампе возникает электрический разряд, а столкновение заряженных частиц с атомами ртути сопровождается ультрафиолетовым свечением. После возникновения электрического разряда подогревать электроды уже не нужно, так как электрический разряд сам поддерживает необходимый уровень ионизации.

Стартеры, хотя и могут являться самыми различными устройствами, представляя собой тумблер (замыкатель), на короткое время замыкающий два контакта. На рисунке 6 показано

внутреннее устройство самого распространенного стартера, которым оснащены большинство ламп дневного света. Как видно, стартер — это параллельное соединение неоновой лам-

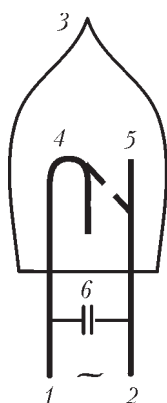


Рис.6. Схематическое изображение внутреннего устройства стартера люминесцентной лампы: 1, 2 — электрические контакты стартера; 3 — неоновая лампочка; 4 — электрод неоновой лампочки, изогнутый в виде перевернутой буквы U; 5 — другой электрод неоновой лампочки; 6 — электрический конденсатор. Пунктирной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

почки (3) и электрического конденсатора (6). Левый электрод неоновой лампочки (4) изогнут в виде перевернутой буквы «U» и представляет собой биметаллическую пластинку, т.е. спаян из двух металлов с разными коэффициентами теплового расширения. А это значит, что при нагревании этот электрод может разгибаться, принимая форму, близкую к «Г». При включении лампы в электрическую сеть все напряжение (220 В) прикладывается к неоновой лампочке, а так как расстояние между электродами лампочки всего около 1 мм, то даже без предварительного нагрева электродов в ней возникает электрический разряд. Сразу после начала разряда левый электрод (4) неоновой лампочки, разогреваясь, начинает разгибаться и, наконец, касается правого электрода (5). Как только это происходит, неоновая лампочка гаснет, и ток из электрической

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

Если бы в лампе дневного света не было дросселя (индуктивного 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 частотой 50 Гц 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;
- плохим состоянием электродов лампы, когда их нагрев не приводит к достаточному испарению электронов из них;
- неисправностью стартера, когда, например, электроды неоновой лампочки 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 показывает простой расчет, эксплуатация ламп, обладающих в шесть раз большим рабочим ресурсом и гораздо меньшими энергозатратами, быстро окупает расходы на их приобретение.

Компактные люминесцентные лампы — рекомендация специалистов. Человека очень тяжело убедить сменить освещение в своем доме со старого, использующего лампы накаливания, на

новое – с люминесцентными лампами, даже если они не мигают и не гудят при работе. Для этого нужно выбрасывать и покупать новые люстры, бра и настольные лампы – ведь все эти осветительные приборы содержат так называемый патрон, который годится только для ламп накаливания. Казалось бы, модернизация освещения требует очень больших затрат времени и денег. Однако, есть выход.

В начале 1980-х годов были разработаны компактные люминесцентные лампы, обладающие всеми достоинствами ламп дневного света, но устроенные так, что их можно ввинчивать в



Рис.7. Внешний вид нескольких компактных люминесцентных ламп, содержащих электронный пускорегулятор и оканчивающихся таким же винтовым контактом, как и у обычных ламп накаливания

патрон для обычной лампы накаливания (рис.7). 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 нашего дома.

Светодиоды – лампы будущего. Незаметно для многих из нас происходит, можно сказать, революционные события – к власти приходят полупроводниковые осветительные устройства, светодиоды. Раньше светодиоды использовали только в качестве зеленых и красных индикаторных лампочек, дающих

возможность следить за работой различных электронных устройств. Сейчас же они начинают конкурировать с лампами накаливания и люминесцентными лампами. Происходит это потому, что светодиоды гораздо более эффективно преобразуют электрическую энергию в световую.

Схема, иллюстрирующая строение светодиода и его работу, показана на рисунке 8. Так, например, уже сейчас светоотдача (отношение световой энергии к расходуемой электрической) 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

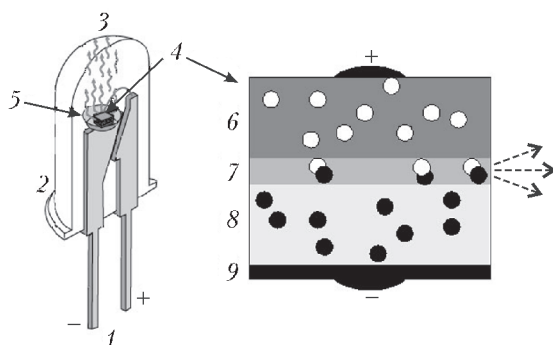


Рис.8. Светодиод в разрезе (слева) и строение полупроводникового чипа, испускающего свет (справа): 1 – металлические контакты для подключения к источнику постоянного тока; 2 – прозрачный кожух светодиода; 3 – свет, испускаемый светодиодом; 4 – полупроводниковый чип, слои которого схематически показаны справа; 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 справа обозначены черными кружками, а «дырки» – белыми. Электрическое напряжение, приложенное между n- и p-слоями полупроводникового чипа, приводит к движению электронов из n-слоя (8) в активный слой (7). Одновременно туда же под действием приложенного напряжения движутся «дырки» из p-слоя (6). В активном слое «дырки» и электроны встречаются и уничтожают друг с другом, и при этом часть энергии выделяется в виде света (пунктирные стрелки)

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, более половины выпускаемых в Европе автомашин используют красные светодиоды в качестве «высокого» стоп-сигнала, а также указателей поворота и габаритных огней. Увеличивается с каждым годом процент светофоров, работающих на светодиодах, при этом 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 100000 часов. Правда, есть и недостатки у светодиодных осветительных устройств – они стоят дороже да и светят не так ярко, как хотелось бы. Но оба эти недостатка можно объяснить «молодостью» светодиодных лампочек – ведь Нобелевскую премию по физике одному из их «родителей», российскому физiku Жоресу Ивановичу Алферову, дали только в 2000 году. Об интенсивности работ в области светодиодного освещения говорит тот факт, что за последние 10 лет светоотдача диодных лампочек выросла в 10 раз, а это значит, что если научно-исследовательские работы будут продолжаться такими же темпами, то уже через несколько лет их светоотдача превысит даже показатели лучших флуоресцентных ламп.

Ну, а дальше дело за производством и рекламой, и, действуя сообща, они в конце концов убедят нас сделать выбор в пользу светодиодов, которым, как считает Ж.И.Алферов, принадлежит будущее.

ПОЧЕМУ ЛИСТЬЯ КАПУСТЫ И ЛОТОСА ВСЕГДА ЧИСТЫЕ?

Непростые отношения существуют между жидкостью и поверхностью твердого тела или между двумя соприкасающимися твердыми поверхностями. 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 каплям не удастся. Не равнодушны друг к другу и твердые материалы, и это определяет как легко их можно спаять, сварить, склеить или покрасить. Оказывается, «взаимные чувства» материалов зависят 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 и являющееся результатом 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 твердой поверхности, а мерой смачивания служит краевой угол θ между поверхностями твердого тела и жидкости в месте контакта (рис.9). Когда $\theta < 90^\circ$, говорят, что жидкость смачивает поверхность, а когда $\theta > 90^\circ$ – не смачивает.

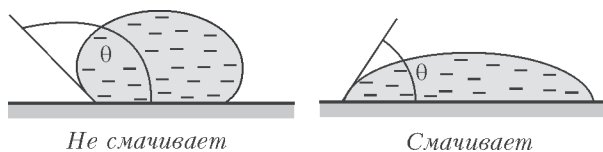


Рис.9. Краевой угол, когда капля жидкости смачивает или не смачивает поверхность твердого тела

Краевой угол зависит от соотношения сил сцепления молекул жидкости с молекулами 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 ка-

пельку. 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 величину угла 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. Хорошее смачивание необходимо, например, при стирке, крашении, склеивании, пайке, создании гидроизоляционных материалов. На явлении смачивания основана флотация – один из основных методов обогащения минеральных руд. Эффективными регуляторами смачивания являются поверхностно-активные вещества.

Коэффициент поверхностного натяжения определяет смачиваемость. Так как с величиной поверхности жидкости связана потенциальная энергия поверхностного натяжения, то жидкость, стремясь к минимуму потенциальной энергии, всегда старается сделать эту поверхность как можно меньше. Известно, что шар обладает минимальной поверхностью 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 невесомости. И чем больше коэффициент поверхностного натяжения жидкости, тем активнее 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 границах «тело – жидкость» и «тело – газ». Таким образом, когда капля жидкости попадает на поверхность твердого тела, задачу о минимизации потенциальной энергии приходится решать им втроем: твердому телу (τ), жидкости (ж) и газу (г). Если адгезия жидкости и 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 расплющивается вдоль поверхности твердого тела. Это продолжается до тех пор, пока дальнейшее растекание капли становится уже энергетически невыгодным.

При наступившем равновесии соблюдается баланс горизонтальных сил, растягивающих и сжимающих поверхность капли (рис.10), который позволяет вычислить величину краевого угла θ по известным значениям коэффициентов поверхностного натяжения $\sigma_{\text{тж}}$ и $\sigma_{\text{тг}}$:

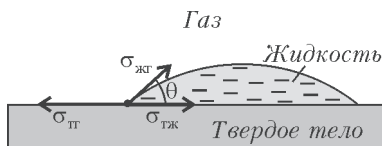


Рис.10. К вычислению краевого угла по балансу сил поверхностного натяжения

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

Пайка со знанием дела. Пайка возможна только в том случае, когда 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.

Флотация: силы поверхностного натяжения за работой.

Большую роль играют силы поверхностного натяжения во флотации – широко распространенном способе обогащения разнообразных руд. Метод флотации основан на использовании различной смачиваемости 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 поверхность 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.

Смачиваемость зависит от микроструктуры поверхности: эффект лотоса. Лотос (рис.11) – одно из прекраснейших водных растений на нашей планете. Его цветки не только изумительно красивы, но и чисты даже тогда, когда вода вокруг



Рис.11. Лотос орехоносный, или индийский (*Nelumbo nucifera*)

мутная и грязная. Листья и цветки не смачиваются водой, поэтому капли воды скатываются с них, как шарики ртути, смывая с них всю грязь. Даже каплям 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.

Оказывается, вся поверхность листьев лотоса густо покрыта микропупырышками высотой около 10 мкм, а сами пупырышки, в свою очередь, покрыты микроворсинками еще меньшего размера (рис.12). Исследования показали, что все эти микропупырышки и ворсинки сделаны

из воска. Известно, что воск действительно плохо смачивается водой, но только наличие воска на поверхности листьев лотоса не может объяснить то, что соответствующий краевой угол составляет более 160° . Для листьев магнолии, например, которые тоже покрыты воском, краевой угол равен лишь 54° . Следовательно,

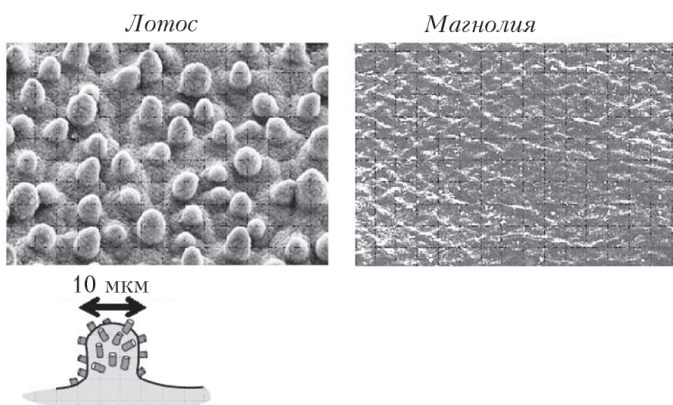


Рис.12. Микрофотографии поверхности листьев лотоса и магнолии. Внизу слева схематически показан один микропупырышек

именно пупырчатая структура поверхности листьев лотоса значительно уменьшает их смачиваемость, в три 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. Ведь для того чтобы проникнуть между микропупырышками, капле надо увеличить свою поверхность, а это энергетически невыгодно. Поэтому капля «парит на пуантах», между которыми находятся пузырьки воздуха, что значительно уменьшает силы адгезии между каплей и поверхностью листа лотоса. Это значит, что капле становится невыгодно растекаться и смачивать «колючую» поверхность листа лотоса, и она сворачивается в шарик, демонстрируя очень высокий краевой угол, как это изображено на рисунке 13.

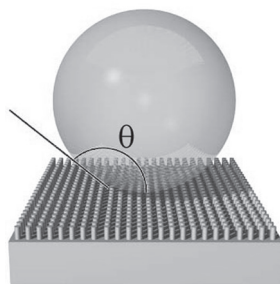


Рис. 13. Капля воды на «массажной микрощетке»

Поверхность, аналогичная массажной микрощетке, уменьшает адгезию не только капель воды, но и любых частичек размером более 10 мкм, так как они касаются такой поверхности 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: намокнув, они потеряли бы способность летать.

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, 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 покрасить снаружи дом краской, к которой грязь не прилипает. У таких технологий большое будущее.

ТРЕНИЕ: ДРУГ ИЛИ ВРАГ?

С трением мы сталкиваемся на каждом шагу, но без трения мы не сделали бы и шага. Невозможно представить себе мир без сил трения. В отсутствие трения многие кратковременные движения продолжались бы бесконечно. Земля подвергалась бы непрерывным землетрясениям, 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 на свете 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 около от 2 до 10% национального валового продукта.

Классический закон трения. 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 интересоваться это явление.

Первая формулировка законов трения принадлежит великому Леонардо да Винчи (1519 г.), который 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 г.). До сих пор формула

$$F_{\text{тр}} = \mu N,$$

где $F_{\text{тр}}$ – сила трения, N – составляющая силы прижатия, нормальная к поверхности контакта, а μ – коэффициент трения, полностью определяющий силу трения для любой пары контактирующих материалов, является единственной формулой, выражающей закон трения Амонтона – Кулона, которую можно найти в учебниках по физике. В течение двух столетий этот эксперимен-

тально доказанный закон никто не смог опровергнуть, и до сих пор он звучит так, как 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 величины поверхности соприкосновения.

3) Сила трения не зависит от скорости скольжения.

4) Сила трения покоя всегда больше силы трения скольжения.

5) Силы трения зависят только от двух материалов, которые скользят друг по другу.

Потираем руки и проверяем основной закон трения. Сила трения – диссипативная сила. Это означает, что вся работа, расходуемая на ее преодоление, переходит в тепло. Значения коэффициента трения, приводимые в инженерных справочниках (см. таблицу 1), позволяют оценивать этот нагрев в проектируемых приборах и устройствах. Ну, а мы попробуем найти количество теплоты, выделяющееся, когда мы, разогреваясь, потираем руки.

Допустим, что мы сжимаем ладони с силой 0,5 Н, а коэффициент трения кожи об кожу составляет 0,5. Тогда сила трения, которую мы преодолеваем при скольжении одной ладони по поверхности другой, будет равна 0,25 Н. Если считать, что, разогреваясь, мы за одну секунду совершаем четыре движения ладоней и каждое из них по 0,1 м, то мощность, расходуемая на преодоление силы трения, составляет 0,1 Вт. За 10 секунд такого разогрева в области контакта ладоней выделится 1 Дж тепла. Пусть все это тепло идет на разогрев участка поверхности кожи площадью $0,01 \text{ м}^2$ и толщиной 0,001 м, который имеет массу около 10^{-5} кг и удельную теплоемкость, близкую к теплоемкости воды, т.е. $4,2 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$. Значит, наши действия приведут к нагреву этого участка на 25 градусов. Видно, что оценка нагрева получилась явно завышенной. Большая часть тепла от разогрева, конечно, уходит в ткани, расположенные под кожей, и разносится по телу с кровотоком, но и оставшейся части тепловой энергии оказывается достаточно, чтобы поднять температуру кожи на несколько градусов.

Что такое тормозной путь? Две машины столкнулись на перекрестке. Повреждения небольшие, так как каждый успел почти полностью затормозить машину перед аварией. Поэтому и виноватым себя считать никто не хочет. Приехавший инспектор

Таблица 1

Коэффициенты трения для различных пар материалов

Коэффициент трения покоя	Коэффициент трения скольжения	Гладкие обезжиренные поверхности материалов при нормальных условиях	
14		Резина	Твердые тела
	0,5–0,8	Резина	Сухой асфальт
	0,2–0,7	Резина	Мокрый асфальт
1	1	Мягкая сталь	Свинец
1,1	0,2	Чугун	Чугун
1,0	0,3	Медь	Чугун
0,9	0,4	Стекло	Стекло
0,8	0,6	Стекло	Никель
0,8	0,4	Твердая сталь	Твердая сталь
0,7	0,6	Мягкая сталь	Мягкая сталь
0,6	0,5	Алюминий	Мягкая сталь
0,6	0,5	Кожа	Дуб (вдоль волокна)
0,5	0,4	Медь	Мягкая сталь
0,5	0,4	Мягкая сталь	Латунь
0,5–0,3	0,3–0,2	Дерево	Дерево
0,1	0,05	Лыжи со смазкой	Снег
0,1–0,5	0,02–0,1	Лед	Лед
0,04	0,04	Тефлон	Тефлон
0,04	0,04	Тефлон	Сталь
0,01	0,01	Суставы человека	Суставы человека

решил, что виноват тот, у кого длина тормозного пути – черного следа от колес – больше (рис.14). Почему?

Пусть машина выезжала на перекресток со скоростью v и ее водитель, увидев другую машину, стал тормозить, оставив на дороге след длиной L . Если считать, что к моменту столкновения вся кинетическая энергия автомобиля перешла в работу по преодолению силы трения (в тепло), то

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

где m – масса автомобиля, а g – ускорение свободного падения.



Рис.14. Длина черного следа, оставленного колесами машины после торможения, помогает оценить скорость автомобиля

Отсюда следует, что длина тормозного пути пропорциональна квадрату скорости автомобиля. Значит, тот автомобиль, который подъезжал к перекрестку с большей скоростью, имеет и большую длину тормозного пути. Например, для $\mu = 0,7$ длина тормозного пути в 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, что превращает ее в эластичный и прочный материал. Так как частички угля черные и их относительно много (около 25% по массе), то и резина становится черной. Чем больше добавлять при вулканизации угольной пудры, состоящей практически из одного углерода, тем более жесткой, прочной и менее прилипчивой будет резина.

Как нажимать на газ и на тормоз? Некоторые водители, увидев, что на светофоре зажегся зеленый свет, вдавливают педаль газа до самого пола, пытаясь как можно быстрее набрать максимальную скорость. Свидетели такого старта слышат свист проскальзывающих относительно дороги шин. Со стороны это выглядит действительно очень впечатляюще. Но как на самом деле? Неужели для того чтобы машина приобрела наибольшее

ускорение, надо заставлять колеса скользить по дорожному покрытию? Конечно, нет.

Известно, что движущей силой автомобиля служит сила трения его колес о дорожное покрытие. Если резко нажать на педаль газа, вызвав проскальзывание шин относительно асфаль-

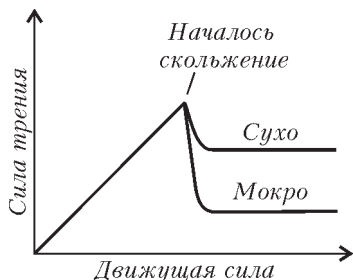


Рис.15. Зависимость силы трения, действующей на тело, от силы, которая может привести или приводит к движению тела для сухого и мокрого дорожного покрытия

та, то максимальное ускорение будет пропорционально силе трения скольжения, которая всегда меньше максимальной силы трения покоя (рис.15). Поэтому быстрее ускоряется не тот, кто сжигает резину покрышек, а тот, кто использует силу трения покоя (т.е. не допускает скольжения) в 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 авто-

мобиль, — ведь тормозящей силой является тоже 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 нужен рисунок на шинах автомобиля? Если машина 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 машина становится неуправляемой. Вот почему на покрышках автомобильных шин находятся канавки, помогающие воде выбираться из-под колеса, что помогает резине шин даже в лужах быстро находить контакт с покрытием дороги (рис.16). Зимой большинство водителей обувают свои машины в зимнюю резину. Если ездить на летних покрышках зимой, то узкие канавки быстро забьются снегом, а он, превратившись в лед, сделает из автомо-



Рис.16. Покрышки автомобильных шин, предназначенные для летних дорог (слева), зимних дорог (в центре) и бездорожья (справа)

бия 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. Если же предстоит ехать по бездорожью, то покрышки должны быть глубоко рифлеными, так как грязь, имеющая большую вязкость, просто не пролезет через узкие канавки, когда будет двигаться под весом наезжающего колеса.

Гонки «Формулы 1» – война шин. Каждый пилот гоночного болида хочет иметь хорошее сцепление с дорогой, чтобы обеспечить быстрый старт. Но это значит, что шины его автомобиля должны хорошо прилипать к дорожному покрытию. Но такая шина всегда будет оставлять на дороге след из частичек, прилипших навсегда к дорожному покрытию. Другими словами, износ шин с высоким сцеплением тоже высок. Поэтому на гонках «Формулы 1» средний ресурс шины всего 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 на шинах с несколькими очень неглубокими канавками (рис.17). Канавки в шинах гоночных машин не нужны, так как они увеличивают сцепление с дорогой только тогда, когда она мокрая. А при мокрой дороге гонки отменяются.

Для производства шин гоночных автомобилей используется специальная липкая резина. Поэтому сила трения этих шин на сухой дороге растет с увеличением площади контакта, вступая, таким образом, в противоречие с классическим законом, справедливым для трения твердых и неэластичных поверхностей. Чтобы обеспечить максимальную силу трения, шины колес

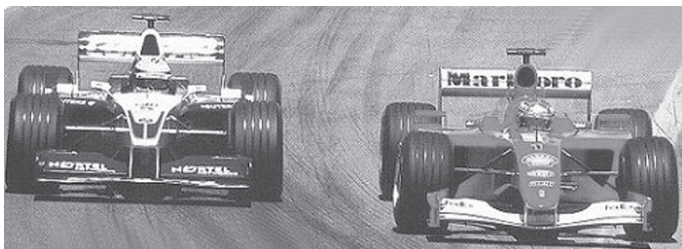


Рис.17. Шины гоночных болидов «Формулы-1» – очень широкие и совсем «лысые»

гоночных автомобилей делают очень широкими (до 0,38 м), что также позволяет лучше рассеивать тепло, выделяющееся 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°C , очищая ее поверхность и обеспечивая хорошее прилипание к дорожному покрытию. Кстати, шины гоночных автомобилей иногда надуют 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, близка к одному миллиону долларов. Есть несколько теорий возникновения этого шума. Одна из них считает, что шум возникает из-за колебаний деформированных участков внешней части покрышки. Другая теория связывает появление шума с отлипанием резины от дороги. Ну, а самая романтическая гипотеза объясняет шум тем, что воздух двигается по канавкам автомобильных покрышек, как по трубам органа, и поэтому поет.

Классики не всегда правы. Уже в XIX веке стало ясно, что закон Амонтона – Кулона не всегда дает правильное описание силы трения, а коэффициенты трения отнюдь не являются универсальными характеристиками. Прежде всего, было отмечено, что коэффициенты трения зависят не только от контактирующих материалов, но и от того, насколько гладко обработаны соприкасающиеся поверхности. Выяснилось, например, что сила

трения в вакууме всегда больше, чем при обычных условиях (см. таблицу 2). Как отмечает лауреат Нобелевской премии по физике (1965 г.) Р.Фейнман в своих лекциях, «...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».

Таблица 2

**Зависимость коэффициента трения
от окружающей среды**

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

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 таких куска меди просто слипнутся, и коэффициент трения покоя начнет расти со временем, прошедшем с начала контакта поверхностей. По тем же причинам коэффициент трения скольжения будет зависеть от скорости (расти 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: спрашиваем у ученых. Сложность изучения трения заключается в том, что место, где этот процесс происходит, скрыт от исследователя со всех сторон. 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 очень шероховатые, даже если они были отполированы (рис.18).

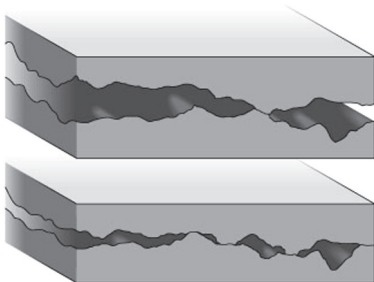


Рис.18. Схематическое изображение места контакта скользящих поверхностей при малой (вверху) и большой (внизу) сжимающей их силе

Поэтому скольжение двух поверхностей друг по другу может напоминать фантастический случай, когда перевернутые Кавказские горы трут, например, о Гималаи.

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 расходуется энергия. 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 Г.Биннигом и Г.Рорером атомно-силовой микроскопии, за что в 1986 году им 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.19) служит микрозонд, обычно сделанный из кремния и представляющий собой тонкую пластинку-консоль – ее называют кантилевером (от английского 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 атомов. 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.

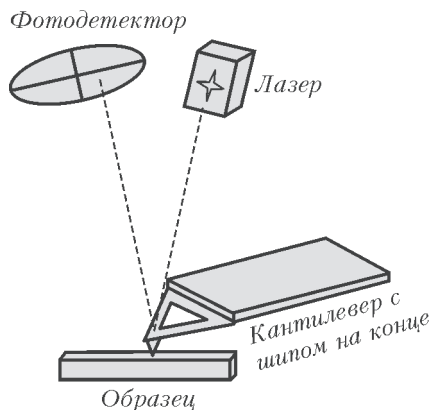


Рис. 19. Принцип устройства атомно-силового микроскопа

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 поверхности (рис.20).

С помощью АСМ с начала 1990-х годов проводятся систематические исследования силы трения микрозондов при их скольжении вдоль различных поверхностей и зависимости этих сил от силы прижатия. Оказывается, что для обычно используемых зондов, сделанных из кремния, микроскопическая сила трения скольжения составляет около 60–80% от прижимающей силы (рис.21, левый график). Как и следовало ожидать, сила трения скольжения растет с размером микрозонда, так как количество атомов, одновременно притягивающих его, увеличивается (рис.21,

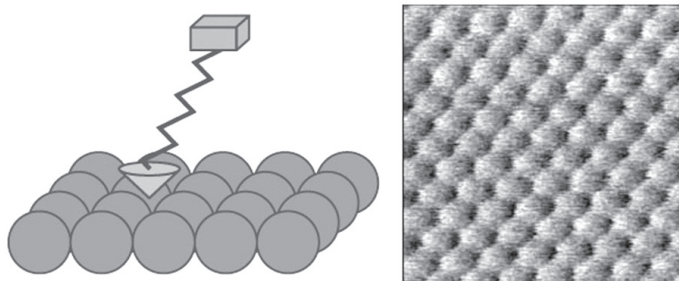


Рис.20. Схематическое изображение микрозонда атомно-силового микроскопа, скользящего над атомами поверхности на постоянной высоте (слева), и изображение поверхности NaF (2×2 нм), полученное с помощью этого микроскопа (справа)

правый график). Таким образом, сила трения скольжения микрозонда зависит от площади его контакта с поверхностью, что противоречит классическому закону трения. Выяснилось также,

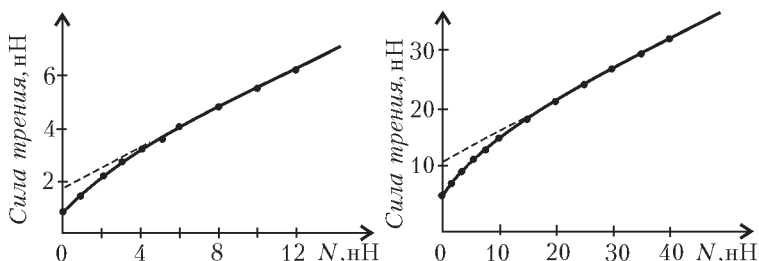


Рис.21. Зависимость силы трения скольжения микрозонда от внешней силы N , прижимающей его к графитовой поверхности. Левый график соответствует радиусу кривизны зонда 17 нм, правый — радиусу 58 нм. При малых N зависимость криволинейная, а при больших она приближается к прямой (обозначенной пунктиром)

что сила трения скольжения не становится нулевой при отсутствии силы, прижимающей микрозонд к поверхности. Да это и понятно — 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 — тоже не соблюдается в нанотрибологии.

Однако все эти расхождения между основным законом и данными нанотрибологии, полученными с помощью АСМ, легко

устраняются. При увеличении силы, прижимающей скользящее тело, увеличивается количество микроконтактов, а значит, увеличивается и суммарная сила трения скольжения. Поэтому никаких противоречий между только что 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, а для того чтобы сломать эти неоднородности, и нужна сила трения. Поэтому старые представления часто связывают возникновение силы трения 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 возникать даже в тех случаях, когда они не повреждаются. Причиной такой силы трения служат постоянно возникающие и рвущиеся адгезионные связи между атомами.

Почему лед скользкий? Узнать, почему можно скользить по льду, ученым удалось только сейчас. А началось все давным-давно. В 1849 году братья Джеймс и Уильям Томсоны (последнему впоследствии за большие заслуги было присвоен титул лорда Кельвина) выдвинули гипотезу, согласно которой лед под нами под давлением плавится, и мы скользим уже не по льду, а по образовавшейся пленке воды на его поверхности.

Действительно, если увеличить давление на лед, то температура плавления льда понизится. Происходит это вот почему. Известно, что плотность льда меньше, чем у воды, и когда лед сжимают, он, пытаясь уменьшить деформацию, вызванную ростом давления, понижает температуру плавления. Это одно из проявлений 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 увеличить давление до 121 атм (12,2 МПа). Попробуем оценить, какое давление оказывает спортсмен на лед, когда скользит по нему на одном коньке длиной 20 см и толщиной 0,3 см. Если считать, что масса спортсмена 75 кг, то его давление на лед составляет около 12 атм. Таким образом, стоя на коньках, мы едва ли сможем понизить температуру плавления льда даже на 1 °С. Значит, объяснить скольжение по льду на коньках или, тем более, в обычной обуви, опираясь на

принцип Ле Шателье, невозможно, если температура за окном, например, -10°C .

Когда стало ясно, что понижением температуры плавления скользкость льда не объяснить, Ф.Бауден и Т.Хьюз в 1939 году предположили, что тепло, необходимое для плавления льда под коньком, дает сила трения. Однако эта теория не могла объяснить, почему так тяжело бывает даже стоять на скользком льду. С начала 1950-х годов 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 годов изучение того, как рассеивает лед рентгеновские лучи, действительно показало, что поверхность льда не является упорядоченной кристаллической структурой, а скорее похожа на жидкость (рис.22).

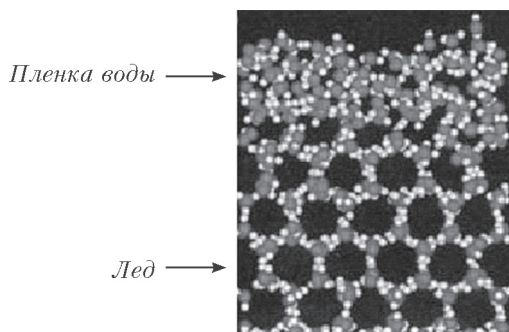


Рис.22. Схематическое изображение поперечного среза льда. Беспорядочное расположение молекул воды на поверхности соответствует пленке жидкости, а гексагональная структура в толще — твердому льду. Серые кружки — атомы кислорода, белые — водорода

Ученые объяснили это тем, что расположенные на поверхности льда молекулы воды пребывают 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 у многих других кристаллов.

Толщина жидкой пленки растет с ростом температуры, так

как более высокая тепловая энергия молекул вырывает из гексагональных решеток большее число поверхностных слоев. Наличие примесей (молекул, отличных от воды) тоже мешает поверхностным слоям образовывать строгие 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.

Трение качения – это совсем другое. В идеальном случае, когда диск, сделанный из несжимаемого материала, по инерции катится по гладкой недеформируемой поверхности, никакие силы трения на него не действуют (рис.23). Диск, касаясь поверхности в одной точке, вращается вокруг этой точки, потом точкой касания и центром вращения становится другая точка и так далее. При этом сила трения скольжения отсутствует.

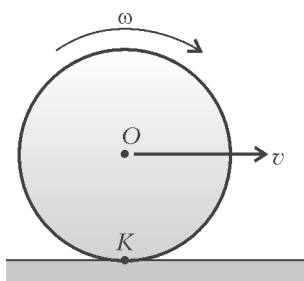


Рис.23. Качение несжимаемого диска радиусом R по несжимаемой поверхности; K – точка касания и мгновенный центр вращения диска с угловой скоростью ω , результатом которого является движение центра диска O со скоростью $v = \omega R$

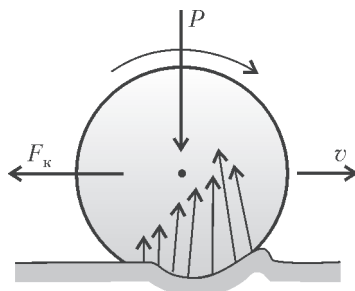


Рис.24. Возникновение силы трения при качении твердого диска по мягкой дороге со скоростью v ; из-за деформации поверхности дороги перед диском образуется бугорок, ответственный за силу трения качения

Однако в реальных условиях дорожное покрытие и материал, из которого сделан диск колеса, не являются абсолютно жесткими. Если поставить колесо на мягкую поверхность, надавить сверху силой P и пытаться, вращая колесо, продвинуть его вперед со скоростью v , то мы столкнемся с силой трения качения F_k . Колесо деформирует поверхность под собой так, что впереди появляется бугорок, который все время приходится преодолевать (рис.24). Горизонтальная составляющая сил реакции этого бугорка и представляет собой силу трения качения F_k . Так как

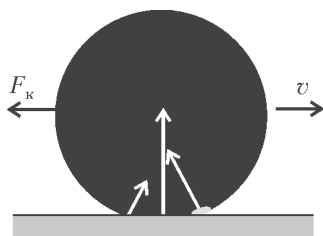


Рис.25. Возникновение силы трения при качении мягкого колеса по жесткой дороге. Деформация его передних участков больше, чем задних, что приводит к появлению силы трения качения

высота бугорка пропорциональна весу автомобиля, то и сила трения качения тоже пропорциональна весу автомобиля, равному силе реакции со стороны дороги N :

$$F_k = \mu_k N .$$

При качении мягкого колеса по твердой дороге на переднюю часть соприкасающейся с дорогой поверхности колеса все время «наезжают» (рис.25). Поэтому она сжимается больше, чем задняя, и сила реакции, действующая на переднюю часть колеса и направленная противоположно движению, оказывается

тоже больше. Сила трения качения равна разности горизонтальных составляющих сил реакции от передней и задней частей колеса. Так как сжатие колеса пропорционально весу машины, или силе реакции опоры, то

$$F_k = \mu_k N .$$

Силы трения качения определяются жесткостью материалов колеса и дорожного покрытия. Чем больше жесткость, тем меньше величина 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 очень жесткими колесами пассажиры будут ощущать все неровности дороги. В результате его шины деформируются больше, и соответственно увеличивается сила трения качения.

Сила, необходимая для преодоления трения качения, пропорциональна весу автомобиля и, вообще говоря, не зависит от скорости его движения. Чтобы измерить эту силу, поместите машину на горизонтальный участок дороги, поставьте рычаг переключения скорости в нейтральное положение (отсоедините колеса от двигателя) и выключите зажигание. После этого привяжите к автомобилю трос, а к нему – пружинные весы, как это изображено на рисунке 26. Прикладывая к тросу силу, постарайтесь сдвинуть машину с места и равномерно тянуть ее. Одновременно с этим ваш помощник должен смотреть на пока-

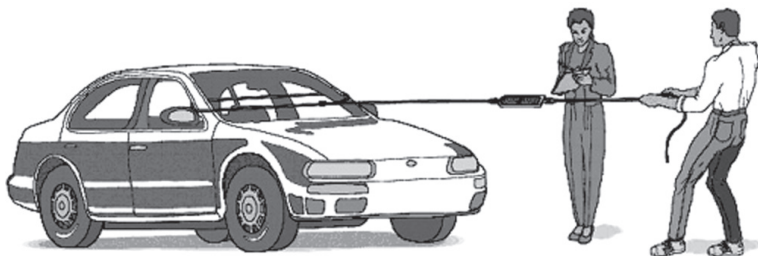


Рис.26. Измерение силы трения качения с помощью пружинных весов

зания весов и записывать их. Если нет пружинных весов, можно использовать так называемые весы для ванн комнат, которые предназначены для взвешивания человека. Такими весами можно толкать машину, используя их в качестве прокладки. Сила трения качения для автомобиля массой 1000 кг составляет в среднем около 100 Н.

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

Таблица 3

Различия коэффициентов трения качения и скольжения

Поверхности	Коэффициент трения качения	Коэффициент трения скольжения
Колесо пассажирского автомобиля на асфальте	0,015	0,8
Колесо грузовика на асфальте	0,008	0,8
Железнодорожное колесо на рельсе	0,001	0,1

Для сравнения трения качения и трения скольжения в таблице 3 приведены несколько значений соответствующих коэффициентов трения.

ВОДА В ВОЗДУХЕ: ПАР, ТУМАН И ОБЛАКА

Что такое пар и сколько его на Земле? Воздух всегда соприкасается с какими-нибудь водоемами, а в них при любой температуре найдутся такие шустрые молекулы, которые сумеют покинуть жидкость и образовать водяной пар. Одновременно с испарением возникает и обратный процесс – конденсация, т.е. возвращение молекул из пара в жидкость. Если испарение происходит в закрытом сосуде, то, очевидно, сначала концентрация пара будет расти, но потом наступит момент, когда число молекул, покидающих жидкость, окажется равным числу молекул, возвращающихся обратно. Такой пар называют насыщенным, так как его концентрация в воздухе соответствует максимально возможной при данных условиях (давлении и температуре).

Очевидно, что чем выше температура воздуха, тем интенсивнее испаряется вода и тем больше водяных паров может содержать единица его объема, а значит, давление насыщенных паров тоже растет с температурой (рис.27). Поэтому, например, концентрация водяных паров в тропических широтах в сто раз выше, чем у полюсов. Если бы весь пар, содержащийся в воздухе, внезапно вылился дождем, то вблизи эквато-

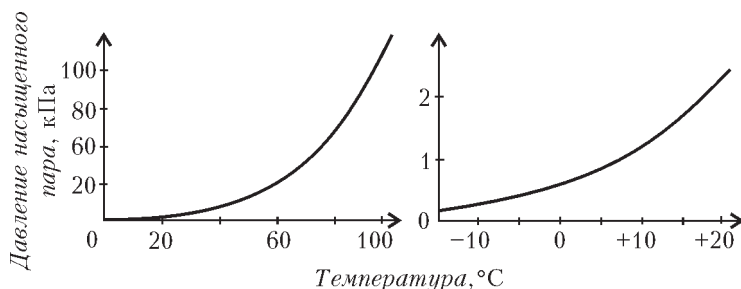


Рис.27. Зависимость давления насыщенных водяных паров от температуры: слева — при нормальном атмосферном давлении, справа — для диапазона температур воздуха средней полосы России. Область над кривой соответствует образованию тумана и облаков, а под кривой — их исчезновению

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

Как измеряют влажность на расстоянии? Чтобы предсказать погоду, надо узнать, откуда и куда движется влажный воздух. Для этого надо уметь определять влажность воздуха на расстоянии. Делают это, например, с помощью установленных на спутниках датчиков, измеряющих интенсивность инфракрасного излучения Земли. Водяные пары очень сильно поглощают этот тип излучения, и поэтому на фотографиях Земли, сделанных со спутника, яркость изображения зависит от концентрации водяных паров, находящихся над данной точкой поверхности планеты (рис.28).

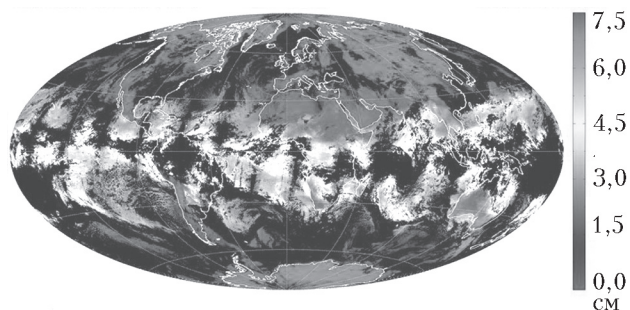


Рис.28. Распределение количества водяного пара в атмосфере Земли 30 января 2005 года. Значения закодированы в цвете и соответствуют толщине слоя осадков (в см) в случае, если бы весь пар сконденсировался и выпал на землю в виде дождя

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. Чересчур влажный воздух с влажностью более 60% в помещении создает идеальные условия для роста плесени и размножения так называемых пылевых клещей, что может вызывать аллергию у лиц, склонных к этим заболеваниям. 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 4, увеличение влажности с 50 до 70% при температуре 32 °С приводит к кажущемуся росту температуры окружающего воздуха с 36 до 41 °С. Наоборот, когда влажность нулевая, те же 32 °С ощущаются нами как 28 °С. Поэтому, если вам стало зябко в холодной комнате, поставьте на пол таз с теплой водой – скоро влажность воздуха увеличится, и вам станет теплее. Считается, что условиям комфорта соответствует температура 20–22 °С при относительной влажности воздуха 45–50%.

Таблица 4

Зависимость кажущейся температуры воздуха (курсив) от его реальной температуры и относительной влажности

Влажность, %	Температура воздуха, °С										
	21	24	27	29	32	35	38	41	43	46	49
0	<i>18</i>	<i>21</i>	<i>23</i>	<i>26</i>	<i>28</i>	<i>31</i>	<i>33</i>	<i>35</i>	<i>37</i>	<i>39</i>	<i>42</i>
10	<i>18</i>	<i>21</i>	<i>24</i>	<i>27</i>	<i>29</i>	<i>32</i>	<i>35</i>	<i>38</i>	<i>41</i>	<i>44</i>	<i>47</i>
20	<i>19</i>	<i>22</i>	<i>25</i>	<i>28</i>	<i>31</i>	<i>34</i>	<i>37</i>	<i>41</i>	<i>44</i>	<i>49</i>	<i>54</i>
30	<i>19</i>	<i>23</i>	<i>26</i>	<i>29</i>	<i>32</i>	<i>36</i>	<i>40</i>	<i>45</i>	<i>51</i>	<i>57</i>	<i>64</i>
40	<i>20</i>	<i>23</i>	<i>26</i>	<i>30</i>	<i>34</i>	<i>38</i>	<i>43</i>	<i>51</i>	<i>58</i>	<i>66</i>	
50	<i>21</i>	<i>24</i>	<i>27</i>	<i>31</i>	<i>36</i>	<i>42</i>	<i>49</i>	<i>57</i>	<i>66</i>		
60	<i>21</i>	<i>24</i>	<i>28</i>	<i>32</i>	<i>38</i>	<i>46</i>	<i>56</i>	<i>65</i>			
70	<i>21</i>	<i>25</i>	<i>29</i>	<i>34</i>	<i>41</i>	<i>51</i>	<i>62</i>				
80	<i>22</i>	<i>26</i>	<i>30</i>	<i>36</i>	<i>45</i>	<i>58</i>	<i>69</i>				
90	<i>22</i>	<i>26</i>	<i>31</i>	<i>39</i>	<i>50</i>	<i>66</i>	<i>77</i>				
100	<i>22</i>	<i>27</i>	<i>33</i>	<i>42</i>	<i>56</i>	<i>74</i>					

Известно, что зимой воздух в доме становится таким сухим, что иногда даже першит в горле. Объяснением этой сухости холодного воздуха может служить зависимость парциального давления насыщенного водяного пара от температуры – ведь в теплую комнату воздух поступает снаружи, где парциальное давление водяных паров очень мало. Например, если на улице 0 °С и 50% влажности, то такой воздух после нагрева до 20 °С будет иметь относительную влажность всего 13%, т.е. в 4 раза меньше, чем необходимо для комфортных условий. Ну а когда за окном мороз, то влажность воздуха в доме становится еще меньше, и приходится прибегать к помощи увлажнителей. Поэтому же, например, многие комнатные растения зимой рекомендуют поливать чаще, чем летом.

Почему продукты быстро высыхают в холодильнике? В холодильной камере самое холодное место – испаритель – находится сверху, откуда холодный и поэтому более тяжелый воздух опускается вниз. Соприкасаясь с более теплыми продуктами и стенками холодильника, воздух нагревается, а его относительная влажность уменьшается, так как нагретый воздух в состоянии поглотить больше влаги, чем холодный. Таким образом, холодный воздух, нагревшись, сразу становится сухим и отбирает часть влаги у продуктов. Потом теплый, а значит, и более легкий воздух поднимается вверх к испарителю, где охлаждается до первоначальной температуры, но влажность его оказывается выше 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. Так 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 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 (см. рис.27) следует, что воздух с влажностью 50%, нагретый до 20 °С, начнет конденсироваться на поверхностях, если их температура ниже 10 °С. Поэтому, когда мы входим с мороза в помещение, у нас сразу запотевают очки, а маска для подводного плавания быстро запотевают изнутри при погружении в воду. Автомобилисты же часто жалуются на запотевание окон внутри неразогретых еще машин. Чтобы не дать образоваться скоплению мельчайших капелек на холодном стекле, необходимо уменьшить поверхностное натяжение воды, из которой они состоят. Тогда капелькам станет энергетически выгодно сливаться друг с другом, образуя пленку воды, которая снова делает окна (или очки) прозрачными. Чтобы понизить величину поверхностного натяжения, можно просто натереть куском мыла поверхность стекла, а потом сделать ее опять прозрачной, растерев какой-нибудь тряпочкой. Таким же образом работают и фирменные антизапотеватели, цена которых часто зависит от фантазии и корысти их производителей. Кроме того, следует помнить, что в прохладную погоду окна автомобиля изнутри не будут потеть, если воздух у внутренней поверхности стекла постоянно движется и когда стекла изнутри уже теплые.

Почему самолет в небе оставляет белый след? Ответ очевиден – по той же причине, по которой при дыхании на морозе появляется туман или иней. В турбинах самолета сгорает углеводородное топливо, а одним из продуктов горения является вода, точнее – ее пар, нагретый до высокой температуры. Горячие водяные пары, вылетая из сопла турбины, сразу начинают конденсироваться, образуя нитеобразное облако, состоящее из мельчайших капелек воды или кристалликов льда, так как температура на такой высоте ниже –40 °С (рис.29). Иногда воздух на высоте бывает перенасыщен влагой, которая



Рис.29. Белый след за летящим самолетом

не может конденсироваться только из-за отсутствия так называемых ядер конденсации – мельчайших частиц, например пыли. В таких случаях пролетающий самолет, оставляя за собой частицы сажи – продукт неполного сгорания топлива, вызывает конденсацию перенасыщенных паров атмосферы. Поэтому по интенсивности белого следа от летящего самолета можно судить о влажности воздуха в верхних слоях тропосферы, а значит, и о предстоящей погоде. Быстро исчезающий или едва заметный след говорит о том, что воздух на высоте сухой, а погода будет безоблачной. А если белый след тянется через все небо, то следует ждать ухудшения погоды.

На фотографиях, сделанных со спутников, Земля во многих местах накрыта плотной белой сеткой следов от пролетевших самолетов (рис.30). Было показано, что в некоторых случаях



Рис. 30. Сделанная со спутника над территорией США фотография, на которой видна сетка белых следов от пролетевших самолетов

следы от летящего самолета превращаются в облака площадью от 4000 до 40000 квадратных километров, оказывая влияние на климат. Поэтому, например, прекращение на три дня полетов над территорией США после трагедии 11 сентября 2001 года резко увеличило прозрачность атмосферы, и в результате разница между средней дневной и ночной температурой выросла на 1 °С. Таким образом, белые следы от самолетов служат одним из факторов глобального «затемнения» планеты, противодействующего ее глобальному потеплению.

Чем опасны и чем полезны для человечества водяные пары? Опасны они тем, что относятся к так называемым парниковым газам. В отличие от остальных молекул воздуха (N_2 , O_2 и CO_2), молекула воды асимметрична и поэтому имеет постоянный дипольный момент, что делает ее спектр поглощения очень густым и сложным и дает возможность поглощать инфракрасное излучение в широком спектре частот (рис.31).

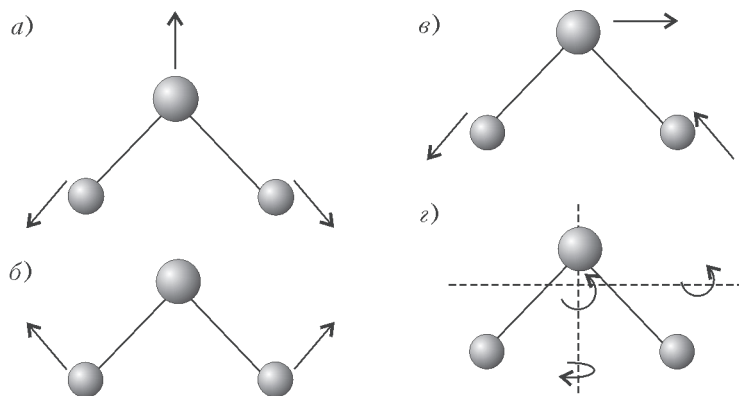


Рис.31. Различные типы колебательных (а-в) и вращательных (г) движений молекулы воды. Стрелками схематически показаны направления движений атомов при этих движениях

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 по величине с парниковым эффектом углекислого газа. Многие, однако, считают, что если бы эффекта водяных паров не было, то наша планета никогда бы не отогрелась от космического холода, температура на ее поверхности составляла бы всего 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 водяной 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 (10 – 100 мкм) капелек переохлажденной воды и кристалликов льда при температуре меньше -10°C . Чтобы уничтожить облако, необходимо вызвать появление крупных капель (больше 1 мм) и кристаллов льда в тумане, состоящем из мельчайших капелек воды и микрокристалликов льда, так как образовавшиеся крупные капли и кристаллы упадут на поверхность земли, и облако исчезнет. Для этого в облаках распыляют микрочастицы, которые служат так называемыми ядрами для образования крупных капель и кристаллов. В качестве таких частиц часто используют йодид серебра, кристаллическая структура которого очень похожа на гексагональную структуру кристаллов льда, из-за чего адгезия кристаллов льда и капелек воды к частичкам йодида серебра велика. Поэтому в облаке к кристалликам йодида серебра прилипают молекулы воды и, став тяжелыми от прилипшей воды, начинают падать на землю, унося с собой часть облака.

Еще один способ осаждения облака – его охлаждение. Для этого в облака забрасывают кристаллы «сухого льда» (CO_2), которые, охлаждая облако, вызывают 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.

Как искусственный туман помогает сельскому хозяйству?

Наиболее эффективной технологией выращивания растений является метод зеленого черенкования, которым можно размножать различные 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 и питание они могут получить только через листья. Поэтому выращивают саженцы в теплицах, где время от времени распыляется вода, подаваемая под давлением несколько десятков атмосфер, образуя туман, состоящий из капелек размером не более 30 мкм (рис.32). Туман из более крупных капелек быстро оседает.



Рис.32. Искусственный пар в теплице

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

ОГОНЬ

Что мешает изучать горение на земле? Процесс горения — один из основных физико-химических процессов, который сопровождает человечество на всем пути его прогресса: «Явления, наблюдающиеся при горении свечи, таковы, что нет ни одного закона природы, который при этом не был бы так или иначе затронут» (из книги М. Фарадея «Истории свечи», 1861 г.).

Горение обеспечивает энергией автомобили и теплоэлектростанции, нагревает наши дома и еду и, конечно, рождает пожары и делает нашу атмосферу грязной, приближая глобальное потепление. Изучение процесса горения необходимо для более эффективного расходования углеводородного топлива и защиты от опустошительных пожаров. Несмотря на такую важную роль в нашей жизни, горение изучено явно недостаточно по сравнению с остальными процессами. И для этого есть веская причина — притяжение Земли, из-за которого при горении возникает конвекция (движение воздуха) — нагретый воздух становится легче и устремляется вверх, а холодный воздух приходит ему на смену. Этот поток воздуха приводит к значительному изменению температуры вдоль пламени (рис.33) и значительно усложняет исследование процесса горения. Поэтому изучать горение легче в условиях невесомости.

Как горит падающая свеча? Еще в 1940 году советский ученый Я.Б.Зельдович предложил математическую модель



Рис.33. Схематическое изображение пламени свечи и распределение температур в различных точках пламени при горении в обычных условиях

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 шарик лишь посредством диффузии, и поэтому температура горения в невесомости должна быть ниже, чем в обычных условиях. Только в начале 1990-х годов 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.34). Как только начиналось

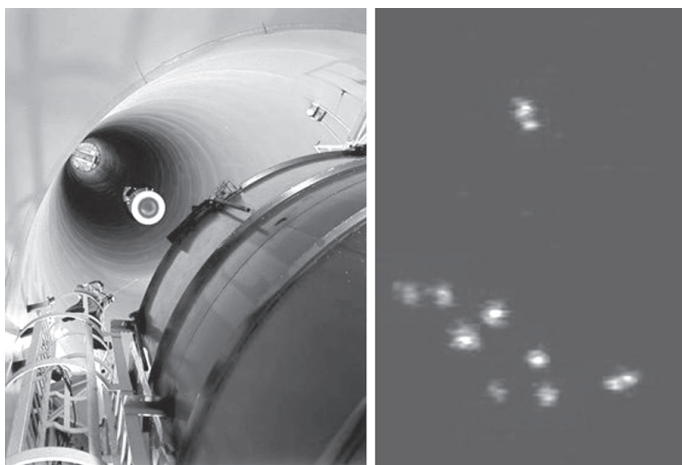


Рис.34. Слева: падение капсулы с горючей смесью внутри вертикальной трубы; справа: мельчайшие горящие газовые шарики, на которые рассыпается пламя в невесомости

падение, длящееся около 5 с, в капсуле с горючей газовой смесью загоралось пламя, рассыпающееся на множество шариков диаметром от 1 до 10 мм, горение которых фиксировали с помощью находящихся внутри видеокамер. Это шарообразное пламя до сих пор служит незаменимой 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? Несмотря на то что экспериментировать с огнем на космических аппаратах очень опасно, в 1996 году на космической станции «Мир» были сожжены 80 свечей, и оказалось, что свеча, полностью сгорающая на Земле за 10 минут, может гореть на станции в течение 45

минут. Однако пламя было очень слабым и голубоватым, и его даже нельзя было заснять на видеокамеру. Поэтому, чтобы доказать его существование, пришлось вносить в это пламя 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 прекратить процесс, не оставив 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.

Желто-оранжевый 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 свежего воздуха, содержащего кислород), поэтому сажи очень мало (она не образуется при температуре меньше 1000°C). Но даже если бы ее было достаточно, то из-за низкой температуры она светила бы инфракрасным светом, а значит, цвет у пламени в невесомости всегда голубоватый.

Из-за того что в невесомости нет восходящего движения воздуха, пламя имеет шарообразную форму (рис. 35). По той же причине свеча в невесомости горит практически без дыма. Опять же из-за низкой температуры горения при невесомости образуется меньше паров стеарина (или парафина), поэтому свеча дает меньше света и быстрее сгорает фитиль. Таким образом, свеча в невесомости должна быть сделана из ве-

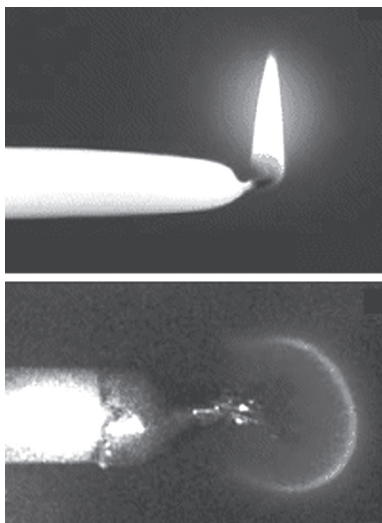


Рис.35. Горение свечи на Земле (вверху) и в невесомости (внизу)

щества, имеющего более низкую температуру плавления, и иметь несгораемый фитиль, например из асбеста.

Изучение процессов горения было продолжено на космических челноках, где продемонстрировали, что шарики из газовой смеси горят, выделяя такую малую мощность (меньше 1 Вт), что горение каждого из них может продолжаться несколько часов. При этом потери энергии на тепловое излучение компенсируются выделением энергии 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 его больше. А в 1997 году на станции «Мир» случился пожар, который, к счастью, удалось потушить. И все-таки, на международной космической станции, кружащей сейчас вокруг Земли, тоже 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 и подниматься (рис.36). Этого не происходит, если спичку держать вертикально. Причиной изгиба сгоревшей

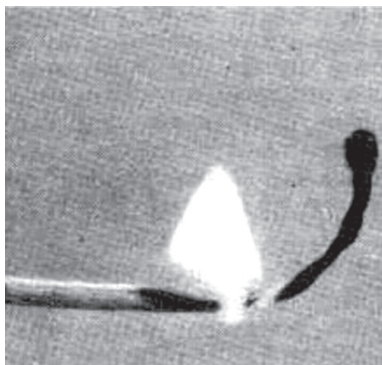


Рис. 36. Горизонтально расположенная спичка при горении загибается вверх

спички служит вертикальное движение воздуха в области горения, в результате которого устанавливается направленный снизу вверх температурный градиент. Поэтому верхняя часть горящей 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 горящей спички укорачивается в большей степени, чем нижняя, и сгоревшая часть спички загибается

вверх. Этому также способствует поток воздуха, направленный всегда снизу вверх вблизи горящей спички.

От чего зависит цвет пламени? Цвет пламени зависит от того, какие элементы «сгорают» в нем. Высокая температура пламени дает возможность атомам перескакивать на некоторое время на более высокие энергетические уровни, а потом, 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 объясняется наличием солей натрия в древесине. Поэтому, если вы хотите сделать пламя газовой горелки желтым, посыпьте его обычной солью. Атомы меди придают пламени ярко-зеленый цвет, который иногда воспринимается нами как белый. Чтобы это увидеть, достаточно «посолить» пламя газовой горелки медной стружкой, которую легко получить из медного провода с помощью напильника. Алюминий и железо не обладают выраженной способностью окрашивать пламя.

Как обнаружить пожар? Суть любого метода предотвращения 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 где хранятся легковоспламеняющиеся жидкости (автомобильные гаражи, например), очевидно, не следует пользоваться детекторами дыма для предотвращения пожара, так как они будут давать много ложных сигналов. Поэтому в таких местах более уместен температурный датчик, обычно настроенный на 60 °С. Как правило, такие датчики представляют собой биметаллический контакт, замыкающийся при нагревании и включающий таким образом 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 опасности. Дымовые датчики исполь-

зуют ионизацию или фотоэлектрический принцип для обнаружения дыма в воздухе.

В ионизационных детекторах дыма основным элементом является источник радиоактивного (альфа) излучения (как правило, америций-241, ^{241}Am), ионизирующий воздух в пространстве между металлическими пластинами-электродами, электрическое сопротивление между которыми постоянно измеряется с помощью специальной схемы (рис.37). Оказывающиеся между пластинами микрочастицы дыма связываются с ионами,

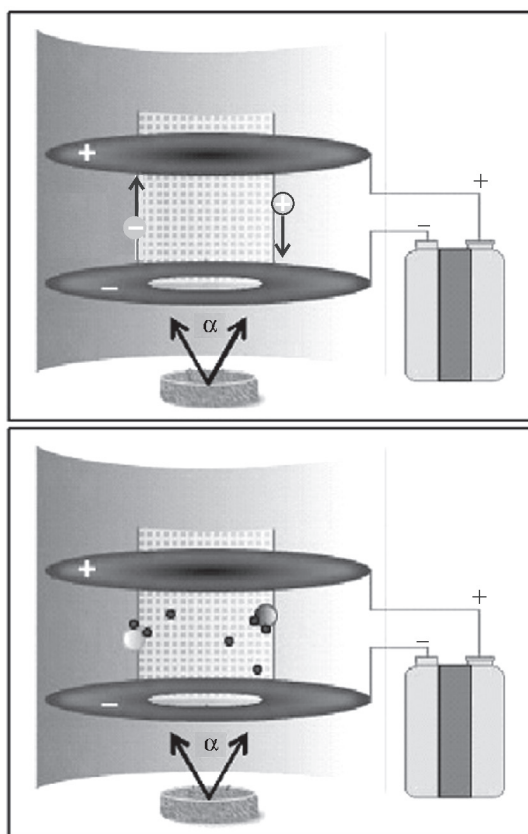


Рис.37. Работа ионизационного датчика дыма. Вверху: в отсутствие дыма ионы воздуха движутся между электродами; внизу: частицы дыма (черные маленькие кружки), связываясь с ионами, нейтрализуют их заряд, увеличивая сопротивление между электродами

нейтрализуют их заряд и увеличивают таким образом сопротивление между электродами, на что реагирует электрическая схема, подавая сигнал тревоги. Датчики, устроенные на этом принципе, 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 несколько сантиметров.

Известно, что при увеличении влажности растет электропроводность воздуха. Поэтому недостатком ионизационного детектора является его чувствительность к влажности окружающего воздуха. Этого недостатка лишен самый распространенный датчик дыма — оптический, использующий тот факт, что частицы дыма рассеивают свет, проходящий через воздух (рис.38). Поэтому интенсивность рассеянного света может служить показателем задымленности воздуха.

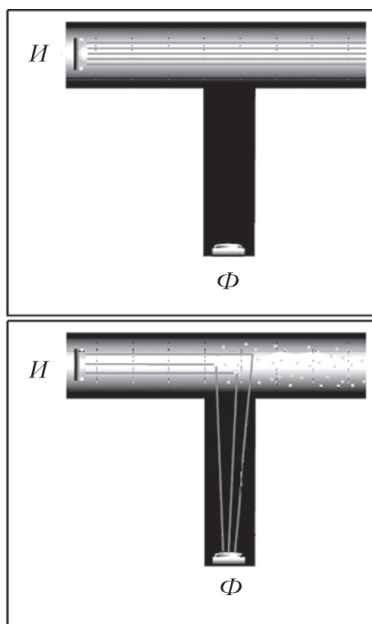


Рис.38. Работа оптического датчика дыма. Вверху: в отсутствие дыма лучи света распространяются от источника (И) прямолинейно; внизу: частицы дыма (серые точки) рассеивают лучи света, поворачивая часть из них на 90° , что регистрируется фотодетектором (Ф)

ВЕТЕР: ЭНЕРГИЯ ИЗ НИЧЕГО

За счет каких источников человечество собирается покрывать все возрастающие затраты энергии? Мир рано или поздно столкнется с тем, что запасы невозобновляемых сырьевых ресурсов – нефти, газа и угля – будут исчерпаны. По расчетам специалистов, при нынешних объемах добычи угля на Земле хватит лет на 400 – 500, а нефти и газа – максимум на столетие. К тому же, опустошение земных недр и сжигание топлива уродуют планету и год от года ухудшают ее экологию. Одним словом, перед человечеством стоит задача освоения экологически чистых, возобновляемых, или, как их еще называют, нетрадиционных источников энергии.

Сколько энергии дает нам Солнце? Почти все источники энергии на Земле обязаны своим происхождением солнечной радиации – энергии, которую Земля получала, получает и будет получать от Солнца. Исключениями являются энергия геотермальных вод, а также приливов и отливов. Мощность солнечного излучения, падающего на Землю, составляет $1,74 \cdot 10^{17}$ Вт. Очень малая часть этой энергии, примерно 0,01%, запасается растениями в виде различных химических соединений, которые потом можно использовать для еды или топлива. Нефть, газ, уголь, торф и древесина – все это солнечная энергия, припасенная для нас различными растениями. Гораздо больше, около 1 – 2%, солнечной энергии, падающей на Землю, преобразуется в энергию ветров. Однако добывать энергию из ветра оказалось непросто. Только сейчас, когда все заговорили об экологически чистых и возобновляемых источниках энергии, люди вспомнили о ветре – вечном двигателе на Земле.

Первой лопастной машиной, преобразующей энергию ветра в движение, был парус. Ему уже почти 6000 лет (под парусом ходили еще древние египтяне), но до сих пор это древнее изобретение обладает наивысшим коэффициентом полезного действия среди всех известных ветроагрегатов. Позже появились ветряные мельницы, которые служили человечеству несколько столетий, вплоть до середины прошлого века (рис.39). Они качали воду, поднимали камни, вращали мукомольные жернова. Пришедшие им на смену ветроэнергетические станции сейчас



Рис. 39. Старинная мельница и парк современных ветроэлектростанций, каждая из которых, обладая мощностью 1 МВт, способна удовлетворить бытовые потребности в электричестве 750 семей

вырабатывают электрическую энергию. В странах северной Европы все большая часть электроэнергии добывается с помощью ветрогенераторов. Например, в Дании уже сейчас 20% всей вырабатываемой электроэнергии отнимается у ветра, а США планируют к 2010 году довести мощность ветроустановок до 80000 МВт, что соответствует 5% от общей мощности всех электростанций.

Сколько ветра на Земле? Исследователи из Станфордского университета (США) в 2005 году составили «ветровую» карту мира, нанеся на нее значения среднегодовой скорости ветра в 8199 местах на высоте 80 м (на этой высоте обычно располагают современные ветроэлектрогенераторы) от поверхности Земли. Оказалось, что скорость ветра в 13% всех исследованных областей такова, что, если разместить ветряные генераторы в этих точках, они перекроют потребности человечества в электроэнергии в пять раз, вырабатывая мощность 72 ТВт ($1 \text{ ТВт} = 10^{12} \text{ Вт}$). Следует отметить, что современные модели ветряных электростанций становятся эффективными, когда скорость ветра превышает 25 км/ч (6,9 м/с). Однако мощь земных ветров была явно недооценена, поскольку измерения скорости ветра, например, на побережье Северного Ледовитого океана, а также в центральных районах Африки в карту включены не

были. А истинная способность ветра снабжать энергией человечество гораздо выше сделанных сегодня оценок.

Как солнечная энергия рождает ветер? Ветер в атмосфере возникает тогда, когда в ней появляются области низкого и высокого давления. Основная причина появления таких зон это неодинаковый нагрев поверхности Земли Солнцем – вблизи экватора очень сильно и чуть-чуть около полюсов. В результате этого воздух на экваторе бывает раскален до $+40^{\circ}\text{C}$, а в Арктике его температура всегда ниже 0°C .

Таблица 5

Зависимость плотности воздуха и насыщенных водяных паров от температуры при нормальном атмосферном давлении

Температура, $^{\circ}\text{C}$	Плотность воздуха, кг/м^3	Плотность насыщенных паров, кг/м^3
-25	1,423	
-20	1,395	
-15	1,368	
-10	1,342	
-5	1,317	
0	1,292	0,005
5	1,269	0,007
10	1,247	0,009
15	1,225	0,013
20	1,204	0,017
25	1,184	0,023
30	1,165	0,030
35	1,146	0,039
40	1,127	0,051

Из таблицы 5 следует, что плотность воздуха вблизи поверхности Земли на экваторе на 20% меньше, чем в приполярных районах с температурой около -25°C . А это значит, что «вес» атмосферы над экватором должен быть тоже меньше, чем у полюсов. Таким образом, атмосферное давление на экваторе всегда ниже, чем в приполярных областях. Неодинаковый нагрев воздуха – основной ветряной движитель, но не единственный. Он определяет глобальную картину ветров, дующих на высотах свыше 1000 м (рис.40).

Вращение Земли – вечный источник ветров. Земля, вращаясь вокруг своей оси, пытается закрутить воздух вокруг себя в ту

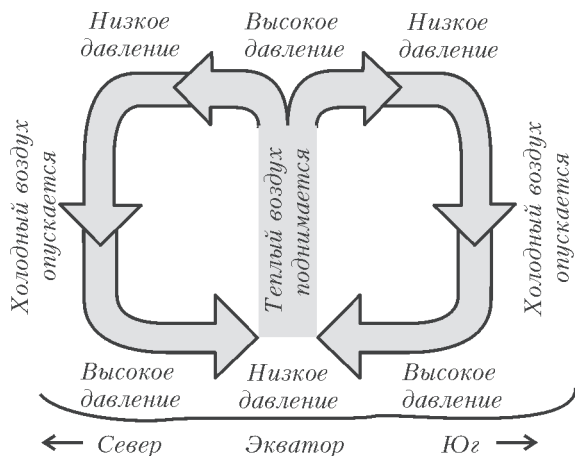


Рис.40. Неодинаковый нагрев Земли солнечным излучением приводит к тому, что влажный воздух над более нагретыми областями (экватор) поднимается на высоту, где его водяные пары конденсируются, что сопровождается выделением тепла. В результате поднявшийся и обезвоженный воздух опять нагревается, образуя область высокого давления, что приводит к циркуляции воздуха – образованию глобальной картины ветров

же сторону. Однако Земле удастся вовлечь в эту круговерть только касающиеся поверхности планеты слои воздуха. Чем выше находятся слои, тем больше их движение отстает от вращения Земли. Это отставание воздуха от Земли, вращающейся на восток, воспринимается нами как ветер, постоянно дующий на запад. Таким образом, вращающаяся Земля порождает целую систему ветров, являясь главным фактором образования погоды. Поэтому изменения вращения Земли, вызванные многими причинами (в том числе и землетрясениями), могут приводить к изменению картины ветров и погоды. Должно существовать и обратное влияние – изменения погоды и ветров могут изменять скорость вращения Земли.

Оказывается, есть силы, которые не дают воздуху двигаться по прямой из области высокого давления в область низкого давления, если эти области находятся на разных географических широтах.

Сила Кориолиса. Пусть, например, масса воздуха, находящаяся вблизи Северного полюса в зоне высокого давления, начинает двигаться на юг (рис.41). Как только это произойдет, масса воздуха будет отклоняться на запад все больше и больше.

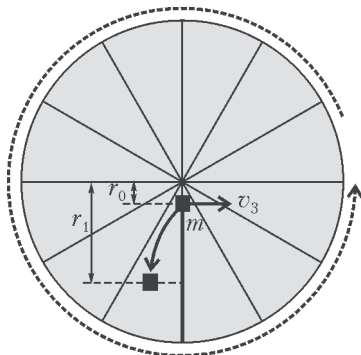


Рис.41. Схематическая иллюстрация действия силы Кориолиса (вид на северное полушарие Земли из космоса)

И вот почему. Эта масса воздуха, находясь вблизи полюса и вращаясь вместе с Землей вокруг ее оси, обладает некоторым моментом импульса – векторной величиной, численно равной произведению линейной скорости вращения поверхности Земли в данной точке $v_з$ на массу воздуха m и на расстояние r_0 до оси вращения Земли. Закон сохранения момента импульса требует, чтобы при перемещении с полюса на юг, где расстояние r_1 до оси вращения больше r_0 , проекция скорости воздуха в на-

правлении запад-восток стала несколько меньше, компенсируя увеличение расстояния до оси вращения. Чтобы объяснить этот эффект, находясь в неинерциальной системе координат, каковой является поверхность вращающейся вокруг оси Земли, вводят силу Кориолиса, названную в честь французского физика и инженера Г.Кориолиса (1792 – 1843). Таким образом, в северном полушарии вращение Земли заставляет поворачивать все ветра правее, и они движутся к области низкого давления по спирали, закручиваясь против часовой стрелки, если смотреть на это из космоса. Наоборот, в южном полушарии сила Кориолиса закручивает ветра в противоположном направлении.

Испарение и конденсация водяных паров. К возникновению ветров могут приводить также испарение и конденсация воды. Известно, что летом днем с озера на берег дует прохладный ветерок – бриз. Происходит это из-за того, что воздух над озером нагрет меньше, чем над сушей. Большая часть солнечного излучения, падающего на воду, отражается или идет на испарение. Кроме того, удельная теплоемкость воды в несколько раз больше, чем у почвы. Поэтому днем давление насыщенного влагой и прохладного воздуха над озером больше, чем над сушей. Ночью – все наоборот. Из-за меньшей теплоемкости почвы она и воздух над ней быстрее остывают, чем вода в озере. Влага в воздухе над озером конденсируется, образуя туман, а выделяющаяся при этом энергия нагревает воздух над ночным озером. Очаг низкого давления над озером притягивает к себе ветер, дующий ночью с берега к воде.

Выделение тепла при конденсации теплых водяных паров над океанами, прогретыми до 30°C , служит основным источником энергии возникающих ураганов. Теплый воздух, насыщенный водяными парами, поднимается выше и выше и, наконец, достигает высоты, где его температура падает настолько, что начинается конденсация пара. При этом выделяется тепло, которое опять нагревает уже обезвоженный воздух, и он поднимается еще выше. Таким образом, наличие водяных паров и их последующая конденсация позволяют создать над поверхностью океана стабильную зону низкого давления – движитель разрушающих ураганов.

Интересно оценить энергию, выделяющуюся при конденсации насыщенных водяных паров, содержащихся в 1 км^3 воздуха. Так как при конденсации 1 кг водяного пара выделяется $2,26\text{ МДж}$ тепла, то при конденсации $3 \cdot 10^7\text{ кг}$ паров, содержащихся в 1 км^3 воздуха, выделится $7 \cdot 10^{13}\text{ Дж}$ тепла, что эквивалентно половине энергии атомной бомбы, сброшенной в 1945 году на Хиросимой. Следует отметить, что при формировании урагана и его движении конденсируются сотни кубических километров водяного пара, а разрушительных последствий, сравнимых с атомным взрывом, не происходит только потому, что энергия эта выделяется в течение нескольких дней, а то и недель. На рисунке 42 показан снимок из космоса тайфуна, на котором видно, что сила Кориолиса закрутила его в спираль против часовой стрелки.

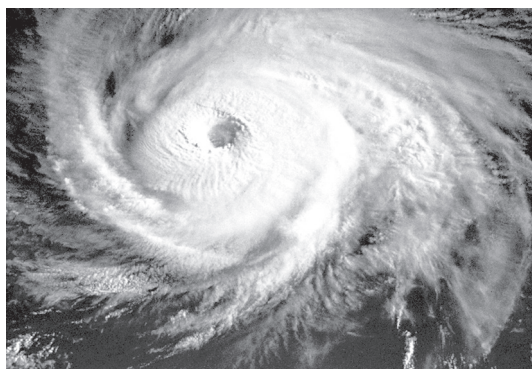


Рис.42. Закрученный против часовой стрелки тайфун в Карибском море

Скорость ветра и структура поверхности. Воздух – вязкая среда, и поэтому у самой поверхности Земли скорость ветра всегда очень мала. При удалении от поверхности скорость постепенно растет. На высотах до 100 м, где обычно находятся лопасти ветрогенераторов, скорость ветра сильно зависит от структуры поверхности. Лес и города значительно замедляют скорость ветра, а спокойная поверхность моря практически не влияет на его интенсивность. Кроме того, сила ветра над морем подвержена меньшим колебаниям по сравнению с ветром, дующим над сушей, так как температура воды более стабильна. Поэтому для увеличения мощности ветроэлектростанций их рекомендуют устанавливать на мелководье. Евросоюз планирует довести количество ветрогенераторов, установленных на мелководье, до 13000. Так, например, вблизи Лондона в 25 км от берега скоро появится парк из 270 ветрогенераторов с суммарной мощностью 1000 МВт, что соответствует 1% всех потребностей Великобритании в электроэнергии.

Мощность ветра. Как известно, мощность численно равна энергии, расходуемой в единицу времени. Поставим на пути ветра перпендикулярно вектору его скорости v поверхность с площадью S . Тогда за единицу времени воздух передаст этой поверхности свою механическую энергию, содержащуюся в объеме vS . Кинетическая энергия этого объема воздуха плотностью ρ составит $(\rho vS) v^2/2 = \rho S v^3/2$. Таким образом, мощность P , которую можно отнять у ветра, пропорциональна кубу его скорости (рис.43), плотности, а также площади поверхности, останавливающей ветер.

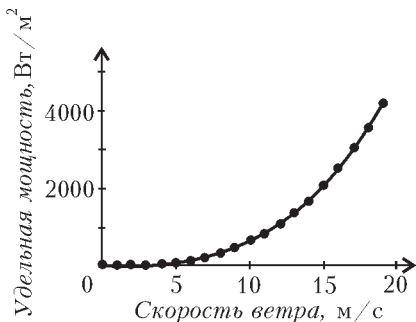


Рис.43. Зависимость удельной (деленной на поперечную площадь потока) мощности воздуха от его скорости при нормальном атмосферном давлении и температуре 15 °С

Отсюда следует, что влажный воздух может нести на несколько процентов больше энергии, чем сухой, а лопасти ветрогенераторов необходимо делать как можно больше. Длина лопастей современных ветрогенераторов с мощностью 1 МВт составляет около 50 м, что соответствует площади потока воздуха, у которого они отнимают энергию, равной 2300 м².

Принимая решение об установке того или иного

ветрогенератора, необходимо знать, какая максимальная мощность вам нужна. Например, вы хотите использовать ветер, чтобы поднимать воду из колодца, для чего не требуется большой мощности, но нужно, чтобы генератор работал при малом ветре. Для этих целей подойдет ветряк с большим количеством лопастей и невысокой стойкой (рис.44). Если же поставлена задача – как можно больше энергии извлечь из ветра, то необходимо поднимать лопасти ветрогенератора высоко и делать их такими, чтобы сильный ветер не опрокинул всю конструкцию.



Рис.44. Ветряк малой мощности, предназначенный для умеренного ветра

Кроме того, для оценки максимальной мощности будущей ветроэлектростанции необходимо знать не только среднегодовую скорость ветра в данном месте, но и то, как часто встречается та или иная его величина скорости. Другими словами, надо знать, например, сколько дней в году в этом месте средняя скорость ветра лежит в диапазонах от 0 до 0,5 м/с, от 0,5 до 1 м/с, от 1 до 1,5 м/с и т.д. до интервала от 12,5 до 13 м/с. Полученный набор чисел носит название «распределения» (или гистограммы) значений скорости ветра за год. Пусть в трех воображаемых местах на земле распределения значений скорости ветра различны по форме, но имеют одно и то же среднегодовое значение 6,75 м/с. В первом месте ветер дует с неизменной скоростью, и, значит, его среднегодовая удельная мощность там равна 188 Вт/м^2 . Во втором случае (рис.45,а) во всех 26 вышеперечисленных интервалах скорость ветра была по 14 дней в году. Если посчитать среднегодовую мощность ветра, соответствующую этому случаю, то она окажется в два раза больше, а именно 363 Вт/м^2 . В третьем случае (рис.45,б) чаще всего скорость ветра была между 6 и 7 м/с (52 дня), а безветренные дни (меньше 0,5 м/с), равно как и очень ветреные (больше 12,5 м/с), были всего 4 дня в году. Подсчет для этого случая дает среднегодовую мощность ветра 282 Вт/м^2 .

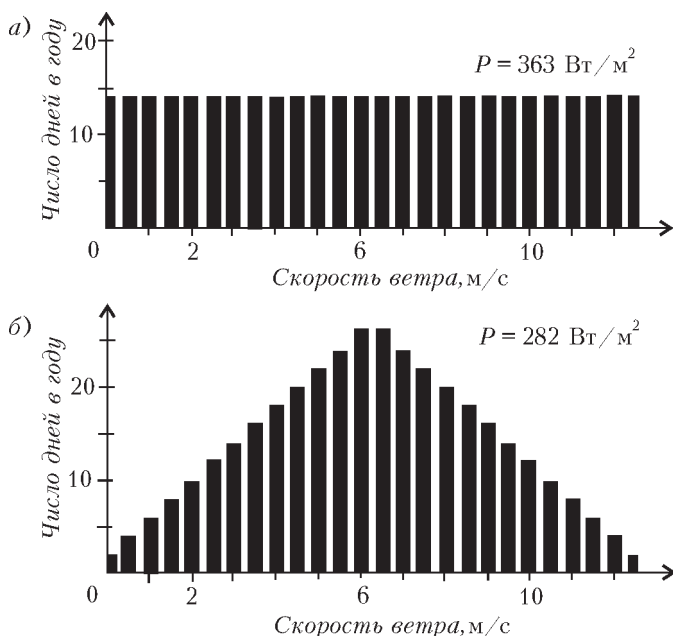


Рис.45. Два разных случая изменения скорости ветра в течение года с одинаковыми среднегодовыми значениями (6,75 м/с)

Таким образом, несмотря на то что среднегодовая скорость ветра была одинакова во всех этих случаях, его среднегодовая удельная мощность сильно различалась и была выше там, где дней с более высокими скоростями было относительно больше. Вызвано это тем, что мощность ветра пропорциональна третьей степени его скорости.

Воздух замедляется, двигая лопасти ветряка. Как следует из закона сохранения энергии, скорость ветра за вращающимися лопастями ветрогенератора всегда будет меньше, чем перед ними. Таким образом, цилиндрический поток воздуха, движущийся на ветряк со скоростью v_1 , должен превратиться в такой же поток, но движущийся с меньшей скоростью v_2 . Так как плотность воздуха до ветряка и после него одна и та же, из закона сохранения массы следует, что поперечное сечение потока воздуха после ветряка должно быть в v_1/v_2 раз больше. Образование большой безветренной зоны после ветряка следует учитывать при расчете мест рядом стоящих ветряков – иначе один ветряк может попасть в «тень» от работы другого ветряка.

Сколько энергии можно отнять у ветра? Из закона сохранения энергии вытекает, что если мы отнимем у ветра всю его энергию, то воздушный поток остановится, и поэтому мы не сможем отнять энергию у следующей его части. Значит, отнимать энергию у ветра надо с умом, замедляя его скорость до такой степени, чтобы процент извлечения ветровой энергии был максимальным. Немецкий физик А.Бец в 1919 году доказал, что ветряк может извлечь не более $16/27$ мощности ветра. Вот как выглядит это простое доказательство.

Допустим, что через лопасти ветряка воздух движется со средней скоростью, равной полусумме скоростей v_1 до и v_2 после ветряка, т.е. $(v_1 + v_2)/2$. Тогда за единицу времени через ветряк с поперечной площадью S проходит масса воздуха, равная

$$m = \rho S \frac{v_1 + v_2}{2},$$

где ρ – плотность воздуха. При этом мощность, отбираемая ветряком у ветра, равна

$$P = m \frac{v_1^2 - v_2^2}{2} = \frac{\rho S}{4} (v_1^2 - v_2^2) (v_1 + v_2),$$

а отношение этой мощности к мощности ветра $P_0 = \rho S v_1^3 / 2$ составляет

$$\frac{P}{P_0} = \frac{1}{2} \left(1 - \left(\frac{v_2}{v_1} \right)^2 \right) \left(1 + \frac{v_2}{v_1} \right).$$

Легко построить график зависимости доли извлекаемой мощности ветра от отношения скоростей воздуха после и до ветряка и убедиться, что А.Бец был прав, утверждая, что максимальная эффективность ветряка (59%) соответствует тому случаю, когда скорость ветра за ветряком уменьшается в три раза (рис.46).

Почему ветер вращает лопасти ветряка?

Чтобы вращать лопасти, можно использовать либо составляющую силы сопротивления ветра, либо подъемную

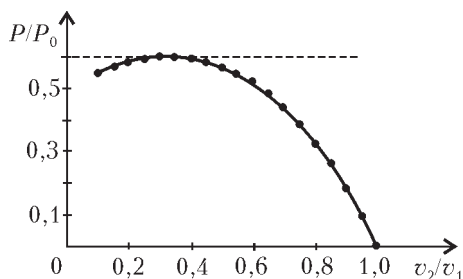


Рис.46. Зависимость доли извлекаемой мощности ветра от отношения скоростей воздуха после и до ветряка

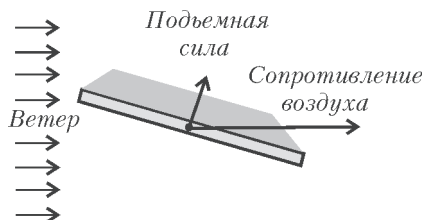


Рис.47. Подъемная сила лопасти с прямоугольным профилем – перпендикулярная составляющая силы сопротивления воздуха

силу, аналогичную той, которая держит самолет в воздухе. При малой силе ветра имеет смысл использовать первый способ, так как он относительно дешев, а соответствующие лопасти, имеющие один и тот же профиль по всей длине, можно изготовить из простых досок, как это и делали давным-давно (рис.47).

При больших скоростях ветра лопасти, аналогичные старинным, начнут дрожать, ломаться и просто перестанут работать. Поэтому для получения силы, закручивающей лопасти ветряка, используют подъемную силу, возникающую при обдуве лопасти, имеющей профиль, аналогичный профилю крыла. Подъемная сила возникает из-за того, что крыло, как видно на рисунке 48, отклоняет набегающий на него воздух вниз, придавая этой массе воздуха соответствующий импульс. В результате, в соответствии с третьим законом Ньютона, воздух действует на крыло с равным, но противополо-

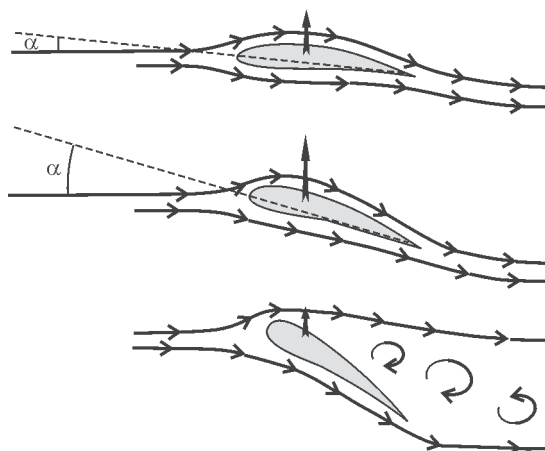


Рис.48. Подъемная сила крыла (вертикальная стрелка) растет при увеличении угла атаки α и достигает максимума при $\alpha \approx 25^\circ$. При дальнейшем росте α подъемная сила крыла резко падает из-за возникновения вихрей и разрыва потока над крылом (см. круговые стрелки на нижней части рисунка)

ложно направленным импульсом, который и создает подъемную силу крыла.

Однако, в отличие от крыла самолета, которое движется поступательно навстречу воздуху, лопасть ветряка вращается, и поэтому относительная скорость ветра различна для областей лопасти вблизи и вдали от оси вращения. Поскольку подъемная сила крыла максимальна при некотором угле атаки, то, чтобы все части лопасти давали максимальный вклад в крутящий момент, необходимо делать лопасть с профилем, изменяющимся с удалением от оси вращения. Вот почему профиль лопасти современных ветряков закрученный (винтовой), а не постоянный, как у крыла самолета.

Может ли быть ветряк без лопастей? Оказывается, может

(рис.49). Установленный на вертикальном валу S-образный ротор хорош тем, что такой ветродвигатель не надо выводить на ветер и его крутящий момент не зависит от направления ветра.

Сколько в России ветра? Сегодня Россия значительно отстает от развитых стран в использовании экологически чистых возобновляемых энергоресурсов, в том числе и ветра. У нас сейчас действуют всего несколько десятков небольших ветроэлектростанций. Их вклад в энергетику страны ничтожен – возобновляемые источники энергии все вместе дают менее 0,1% вырабатываемой в стране энергии. А ветроэлектростанций на огромных пространствах России могло бы быть гораздо больше, ведь наша страна обладает мощным ветроэнергетическим потенциалом, оцениваемым в 40 млрд кВт·ч электроэнергии в год. Такие районы, как Обская губа, Кольский полуостров, большая часть прибрежной полосы Дальнего Востока, по мировой классификации относятся к самым ветреным зонам, где среднегодовая скорость ветра на высоте 80 м составляет 11–12 м/с. Поэтому ветроэнергетике в нашей стране должно принадлежать будущее.



Рис.49. Роторные (карусельные) ветроэлектростанции вращаются вокруг вертикальной оси и работают при любом направлении ветра, они тихходные и малошумные

КАКАЯ ГОРКА САМАЯ БЫСТРАЯ?

Казалось бы, чем короче путь, тем быстрее доберешься до цели. Поэтому катиться с вершины горы надо по наклонной прямой, соединяющей начальную и конечную точки. Но не все так просто...

Еще в 1696 году И. Бернулли в журнале «Acta Eruditorum» опубликовал письмо с интригующим заглавием «Новая задача, к решению которой приглашаются математики». Условие задачи

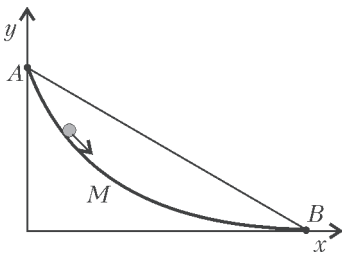


Рис. 50. Рисунок к задаче И. Бернулли о поиске брахистохроны

было таким: «В вертикальной плоскости даны точки A и B (рис. 50). 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 (от двух греческих слов $\beta\rho\alpha\chi\iota\sigma\tau\omicron\varsigma$ – самое короткое и $\chi\rho\omicron\nu\omicron\varsigma$ – 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». Попробуем сначала расшифровать это 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, совпала с осью Ox , и пусть колесо катится в положительном направлении этой оси (рис. 51). Предположим, что в начальный момент времени наблюдаемый «гвоздь» занимает положение в начале координат O $(0, 0)$. Если r –

шее время по сравнению с любым другим путем между этими точками. Теперь это утверждение носит название принципа Ферма. Из этого принципа следует, в частности, что поскольку в однородной среде скорость света постоянна, то минимальному времени 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 разными скоростями распространения, позволяет легко 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. В последнем случае свет будет распространяться по ломаной с вершинами на

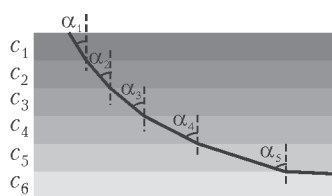


Рис.52. Распространение света сверху вниз через слои с последовательно уменьшающимся коэффициентом преломления

границах раздела, но для каждой вершины будет соблюдаться равенство (рис.52)

$$\frac{\sin \alpha_i}{c_i} = \text{const} ,$$

где α_i – угол, который звено ломаной, лежащее в слое со скоростью света c_i , образует с вертикалью. 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, для которой

$$\frac{\sin(\alpha(y))}{c(y)} = \text{const} ,$$

где $\alpha(y)$ – угол между касательной к кривой в точке с ординатой y и вертикалью. Отметим, что эта формула 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, катящегося с горы под действием силы тяжести, тоже зависит только от перепада высот y :

$$v = \sqrt{2gy} .$$

Поэтому все выводы из принципа Ферма, сделанные для распро-

странения света в среде с изменяющейся скоростью света, можно перенести на поиск уравнения для брахистохроны. Другими словами, траектория скорейшего спуска между точками A и B должна удовлетворять такому уравнению:

$$\frac{\sin(\alpha(y))}{\sqrt{y}} = \text{const}.$$

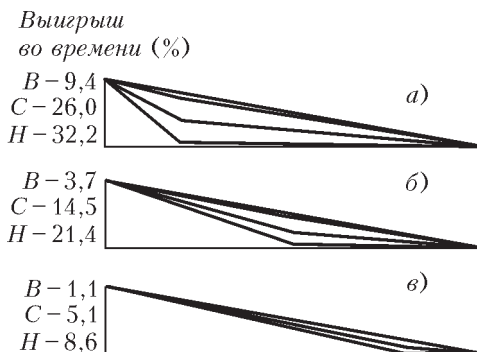
Простое сравнение этой формулы с полученной ранее формулой

$\sin \alpha = \sqrt{\frac{y}{2r}}$ показывает, что траекторией скорейшего спуска должна быть перевернутая циклоида.

Как спуститься быстрее без циклоиды? Для того чтобы ускорить движение между точками A и B , не обязательно спускаться по циклоиде. Можно, например, заменить путь по наклонной плоскости двумя наклонными плоскостями, расположенными чуть ниже. Кстати, такие эксперименты ставил еще Галилей, пытаясь найти брахистохрону задолго до И.Бернулли. Простой расчет, который мы предлагаем сделать самостоятельно, 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 меньше. Как показали расчеты, выигрыш во времени (в %) для каждого h/L зависит от того, где находится перегиб и насколько он глубокий. На рисунке 53 показаны различные ломаные наклонные плоскости с переломом в начале, середине и конце горки с $h/L = 0,2$. Если мы с самого начала заменяем пологий спуск очень крутым, то быстро разгоняемся до максимальной скорости, а потом уже по инерции преодолеваем вто-

Рис.53. 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 (а), в середине (б) и в конце горки (в); В, С и Н соответствуют верхней, средней и нижней ломаным в каждом случае



рую, почти горизонтальную часть пути до точки B . Поэтому неудивительно, что максимальный выигрыш (32,2%) соответствует тому случаю, когда перелом глубокий и находится в начале горки.

Когда горка крутая ($h > L$), 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 излом значительно удлиняет путь. Поэтому максимальный выигрыш для крутых горок соответствует не самому глубокому перелому, а промежуточному. Так, для горки с $h/L = 2$, изображенной на рисунке 54, максимальный выигрыш во времени спуска (2,2%) соответствует верхней ломаной. Когда же изломы при спуске с крутых горок становятся очень глубокими, спуск по таким ломаным плоскостям становится уже невыгодным (см. ломаные C и H на рисунке 54), и вместо ускорения спуска мы слегка запаздываем.

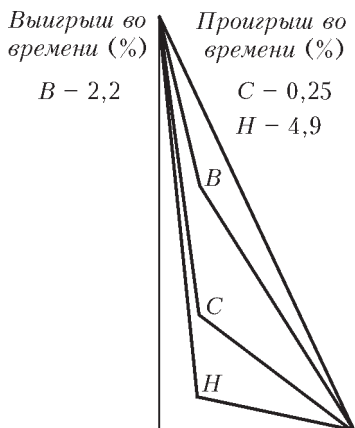


Рис. 54. Крутая горка: выигрыш и проигрыш во времени при спуске по ломаной наклонной плоскости, по сравнению с обычным спуском по наклонной плоскости

Таким образом, спуск по ломаным наклонным плоскостям дает выигрыш во времени только тогда, когда горки пологие.

А может ли быть на «быстрой» горке горб? Да, может, и это легко объяснить.

Сначала заменим обычную наклонную плоскость ломаной, по

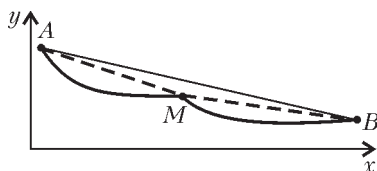


Рис. 55. Иногда даже горб на пути спуска с горы не мешает прийти раньше того, кто просто катится по наклонной плоскости

которой спуск окажется быстрее (пунктирная линия на рисунке 55). А потом пойдем еще дальше — заменим каждый из двух линейных участков такой горки циклоидами и получим «быструю» горбатую горку.

КАК МЫ ПЛАВАЕМ

Если спросить у любого, как он плавает, то следует, по-видимому, ожидать два варианта ответов. В первом случае вам начнут объяснять, каким стилем и как быстро они преодолевают водные преграды. Во втором – скажут, что садятся в лодку, катер или на корабль. Вряд ли среди спрашиваемых найдется человек, который после вашего вопроса станет объяснять физические основы нашей 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? Хорошо умеющих плавать обидит такая форма вопроса. Однако твердо 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 кончатся силы, и он перестанет выполнять плавательные движения, за счет которых он 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 6 показывает, из чего мы состоим на самом деле и какова плотность различных составляющих (тканей) нашего организма.

Таблица 6

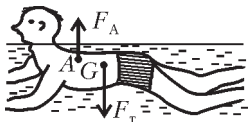
Плотность различных тканей человека

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

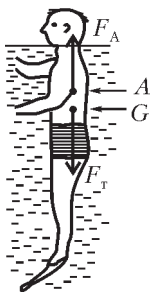
Большую часть нашего тела составляют мышцы. Так как их плотность больше, чем у воды, то при плавании они должны тянуть нас на дно. Еще больше, как следует из таблицы 6, тянут на дно наши кости. Кажется, что только жировая прослойка может спасти нас от быстрой гибели. Однако это не совсем верно.

Внутри каждого человека есть воздушный мешок – легкие. Объем воздуха в легких человека может изменяться от 1 литра (при глубоком выдохе) до 6 литров (при глубоком вдохе). Так как плотность воздуха приблизительно в 800 раз меньше, чем у воды, то каждый литр воздуха в наших 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 вдохе до 1010–1070 кг/м³ при полном выдохе.

Голова – всему помеха! Оценивая плавучесть человека, необходимо учитывать, что голова человека, объем которой составляет около 7% объема его 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 величин архимедовой силы F_A и силы тяжести F_T , действующих на человека в воде:



$$\frac{F_A}{F_T} = 0,93 \frac{\rho_{\text{в}}}{\rho_{\text{ч}}},$$



где $\rho_{\text{в}}$ и $\rho_{\text{ч}}$ – плотности воды и человека соответственно. Отсюда следует, что даже при самом глубоком вдохе архимедовой силы не хватит для полной компенсации силы тяжести плывущего человека. Но даже если бы архимедова сила и была равна силе тяжести человека, он не смог бы неподвижно лежать в воде, находясь в горизонтальном положении. Это вызвано тем, что архимедова сила и сила тяжести приложены к разным точкам тела: F_A приложена в центре масс вытесненной телом жидкости (точка А на рисунке 56), а F_T – в центре масс тела (точка G на рисунке 56). Вторая точка из-за наличия воздуха в легких всегда находится дальше от головы, чем первая. В результате F_A и F_T образуют пару сил,

Рис.56. Изменение положения тела в воде из горизонтального в вертикальное под действием силы тяжести F_T и выталкивающей архимедовой силы F_A

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

Легко ли плыть в вертикальном положении? Итак, если считать, что в вас достаточно жира и воздуха, чтобы сразу не утонуть, то можно утверждать, что вскоре после того, как вас бросят в воду, вы примете вертикальное положение. Однако каждому ясно, что плыть вперед, находясь в вертикальном положении, очень трудно – мешает огромное сопротивление жидкости, которое, как известно, пропорционально площади поперечного сечениядвигающегося тела. Интересно, что одним из требований, предъявляемых к пловцам первого разряда на флоте царской России, было умение проплыть стоя без помощи рук 20 сажень (1 сажень = 2,13 м). Оценка показывает, что площадь поперечного сечения тела человека на уровне пояса почти в 10 раз меньше, чем площадь сечения 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 . Силы сопротивления жидкости (или газа) движению тел зависят от их скорости. При малых v почти все частицы жидкости перед движущимся на них телом имеют достаточно времени, чтобы отойти в сторону, не приобретая при этом импульса в направлении скорости тела, за исключением тех частиц, которые коснулись тела, – они приобретают его скорость. Эти частицы, двигаясь вместе с телом, будут в свою очередь увлекать очень тонкий слой жидкости, с которым они соседствуют. Чем крепче связаны между собой частицы жидкости, или, что одно и то же, чем больше вязкость жидкости, тем больше сила сопротивления, действующая на тело. В этом случае сила сопротивления прямо пропорциональна величине v , среднему размеру тела в плоскости, перпендикулярной движению, и вязкости жидкости.

Точную формулу для силы сопротивления при малых v можно получить, например, для тела, имеющего форму шара. Эта формула, называемая формулой Стокса, имеет такой вид:

$$F_1 = 3\pi\eta Dv,$$

где D – диаметр шара, а η – коэффициент вязкости, равный для воды 0,001 Па·с. Таким образом, если скорость движения тела невелика, то на него будет действовать сила, по величине прямо пропорциональная скорости и противоположная ей по направлению.

Пусть теперь скорость тела возросла, и частицы жидкости, находящиеся на его пути, уже не успевают отходить в сторону и увлекаются вперед. В этом случае за время t тело успеет натолкнуться на массу жидкости, равную $vtS\rho_{\text{в}}$, где S – площадь поперечного сечения тела. Всей этой массе жидкости тело сообщит скорость v и импульс $v^2tS\rho_{\text{в}}$. Поэтому силу сопротивления, действующую на тело со стороны жидкости при больших скоростях, которую часто называют силой лобового сопротивления, можно вычислить по следующей формуле:

$$F_2 = v^2 S \rho_{\text{в}}.$$

Конечно, и при больших скоростях сила сопротивления зависит от вязкости. Чтобы оценить, как изменяется вклад «вязких» сил сопротивления с увеличением скорости тела, найдем отношение F_2 к F_1 для шара диаметром D :

$$\frac{F_2}{F_1} = \frac{1}{12} \frac{D v \rho_{\text{в}}}{\eta}.$$

Выражение $D v \rho_{\text{в}} / \eta$, являющееся безразмерной величиной, называется числом Рейнольдса и обозначается Re . Из последнего соотношения следует, что при $Re > 100$ вязкостью среды можно пренебречь, а силу сопротивления вычислять по формуле для F_2 . Наоборот, при малых числах Рейнольдса, $Re \ll 1$, следует

учитывать только вязкость жидкости, а вычисление силы сопротивления проводить по формуле для F_1 .

Русалка с ластой 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 одну ласту, надетую на обе ноги, как у русалки, а тело русалки заменим полужатопленным поленом, к нижнему концу которого и прикреплена подвиж-

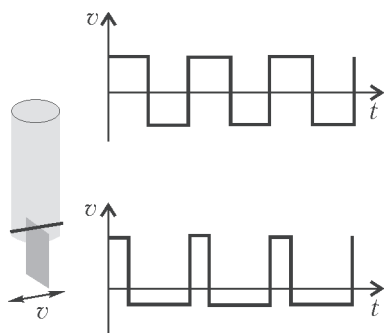


Рис. 57. Слева представлена модель русалки, пытающейся перейти из вертикального положения в горизонтальное, двигая ластой. Справа показаны графики изменения скорости ласты v от времени t при симметричном (вверху) и несимметричном (внизу) движении

ная лапа с площадью поверхности S , способная двигаться в горизонтальном направлении (рис.57). Будем также считать, что лапа не деформируется при движении, а ее масса пренебрежимо мала по сравнению с массой полена, чтобы не учитывать перемещений суммарного центра масс при изменении положения лапы относительно полена.

Пусть частота болтания лапой составляет 1 Гц, а амплитуда равна 0,25 м. Тогда средняя скорость ее движения будет 0,5 м/с. Считая, что «размер» лапы около 0,2 м, а вязкость воды 0,001 Па·с, получаем $Re = 100000$. Таким образом, при болтании ногами «вязкими» силами можно пренебречь, а силу сопротивления надо вычислять, используя формулу для F_2 .

Симметрично или нет? Пусть сначала график изменения скорости лапы от времени выглядит симметрично, т.е. и скорость и интервалы движения лапой влево и вправо одинаковы. Очевидно, что в этом случае сила сопротивления воды, а также ее средний импульс при движении влево и вправо тоже будут одинаковы, а значит, тело русалки так и останется вертикальным.

Попробуем теперь двигать лапу влево с большей скоростью v_1 , чем вправо со скоростью v_2 (см. нижний график на рисунке 57). Так как расстояния, проходимые лапой при ее движениях влево и вправо, должны быть равны, то $v_1 t_1 = v_2 t_2$, где t_1 и t_2 — длительности движения лапы влево и вправо соответственно. Легко показать, что при таких «несимметричных» движениях лапы средняя сила, действующая на русалку и направленная вправо, будет равна

$$F_{\text{ср}} = v_1^2 S \rho_{\text{в}} \frac{t_1 t_2 - t_1}{t_2 t_1 + t_2}.$$

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 10000 раз больше, чем у воды. Поэтому двигать лапами, находясь в бочке с медом, очень трудно. Даже если предположить, что скорость наших движений в таких условиях уменьшится только в 10 раз (от 0,5 м/с до 0,05 м/с), то отношение силы лобового сопротивления к вязкой силе составит менее 1/10. Это значит, что основными силами, действующими при движении лапы в меде, являются силы вязкости F_1 . Попробуем теперь получить выражение для $F_{\text{ср}}$ в случае несимметричных движений. Как легко показать, при любых v_1, t_1 и v_2, t_2 , для которых справед-

ливо равенство $v_1 t_1 = v_2 t_2$, средняя за цикл сила, действующая на ласту, 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 для отношения F_2/F_1 , очень малые существа, даже плавая в воде, могут сталкиваться с такими же трудностями, что и мы в воображаемом медовом озере. Известно, что бактерии, размер которых около 1 мкм, плавают в воде со скоростью 0,1 мм/с. Легко посчитать, что число Рейнольдса для таких движений бактерий близко к 10^{-4} , заставляя их использовать при плавании только силы вязкого трения. Каким же образом двигают бактерии своими жгутиками, чтобы сдвинуться с места?

Диаметр жгутика чуть больше 100 Å, и он, конечно, лишен мускулатуры, поэтому бактерия не может по своему желанию согнуть жгутик или пустить вдоль него волну деформаций, как делают змеи или некоторые рыбы для своего движения. 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

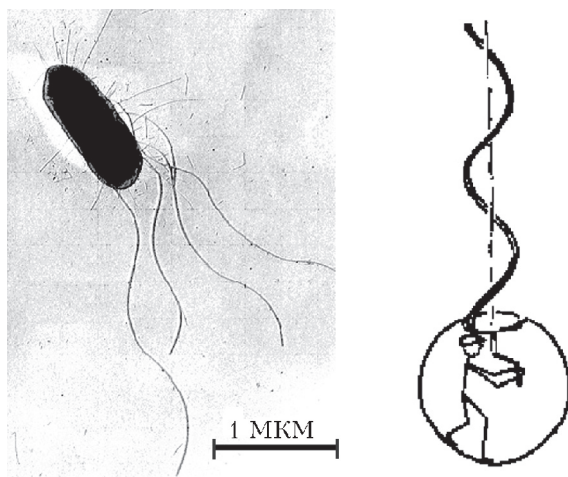


Рис.58. Фото бактерии кишечной палочки и схематическое изображение принципа ее движения с помощью закручивания жгутика

частотой несколько герц, часто меняя направления движения (рис.58).

Все знают, что круговые движения штопора продвигают его либо вперед, либо назад в зависимости от того, против или по часовой стрелке мы крутим рукоятку. То же самое происходит и с бактерией, когда она крутит свой жгутик. Он «вкручивается» или «выкручивается» из жидкости, которая для него является очень вязкой ($Re < 10^{-5}$), двигая бактерию вперед или назад.

Как плыть быстрее? Для этого 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 для F_2 , сила лобового сопротивления воды пропорциональна площади поперечного сечения тела S , но это выражение дает завышенное значение для силы, так как не все частицы воды при столкновении с телом приобретут его скорость. Однако этой формулой можно пользоваться, если в правой части добавить безразмерный коэффициент C_D – коэффициент лобового сопротивления:

$$F_2 = \frac{1}{2} C_D v^2 S \rho_v .$$

Как показывают эксперименты, C_D сильно зависит от формы тела (рис.59). Большие различия в C_D возникают из-за того, что

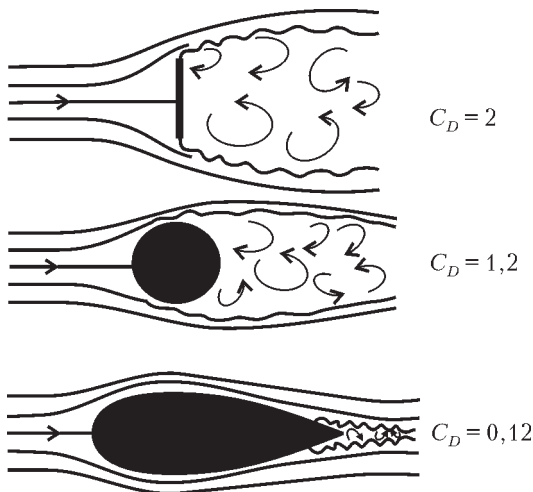


Рис.59. Линии тока жидкости при обтекании диска, шара и капле-видного тела одной и той же площади поперечного сечения

вода по-разному обтекает различные тела. За диском и шаром, например, образуется зона вихрей. А это значит, что, двигая эти тела вперед, мы должны тратить энергию не только на преодоление вязкого трения, но и на возникновение 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.

Как плавают рыбы? Число Рейнольдса для небольших рыб составляет более 100, поэтому вращать «штопор», как это делают бактерии, им невыгодно. Рыбы используют, по крайней мере, два типа плавания – волнообразные движения всего тела или движения только хвоста (рис.60). Рыбы, имеющие змееоб-

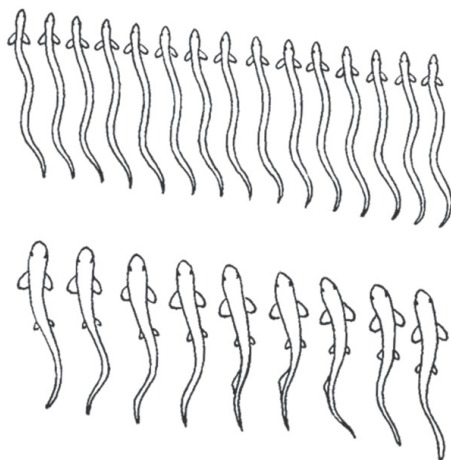


Рис.60. Два вида плавания рыб – волнообразное и использующее только движение хвоста

разную форму (например, угорь), применяют первый тип плавания, изгибая тело так, что этот изгиб движется от головы к хвосту, отталкивая назад воду, 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 до сих пор не могут ответить на вопрос, как многие рыбы и дельфины умудряются двигаться в воде со скоростями, недоступными иногда даже для птиц, летящих в воздухе. Меч-рыба, например, плывет со скоростью до 130 км/ч, тунец – до 90 км/ч. Если изготовить муляж меч-рыбы и определить

коэффициент лобового сопротивления C_D , то окажется, что, для того чтобы набрать такую скорость, рыбе необходимо развить мощность автомобильного мотора – порядка 100 лошадиных сил. Энергия живых существ – это энергия окислительных процессов. Но рыбы – существа холоднокровные, их температура ненамного выше температуры воды. Поэтому такие мощности для них просто недостижимы. Остается предположить, что рыбы каким-то образом «умеют» очень сильно снижать сопротивление воды.

При быстром движении обычного предмета в воде вихри образуются только позади тела. Согласно закону Бернулли, давление в области вихрей падает, что оказывает на тело тормозящее действие. Одна из гипотез, объясняющих резкое снижение сопротивления воды у меч-рыбы, состоит в том, что меч, находящийся спереди, служит генератором вихрей. В результате рыба движется, со всех сторон окруженная вихрями – областями пониженного 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? Общеизвестна поговорка: «На то и щука в море, чтобы карась не дремал». Каждому ясно, что щука всегда догонит карася, если он, конечно, 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?

Сила сопротивления, которую преодолевает рыба, двигаясь в воде, пропорциональна площади поперечного сечения рыбы и квадрату скорости ее движения. Поэтому выражение для мощности N , которую затрачивает рыба при движении, имеет вид

$$N = k_1 v^3, \text{ где } k_1 = \frac{1}{2} C_D S \rho_v.$$

Оценим, как связаны между собой максимальная мощность, развиваемая мышцей животного, и ее размеры. Известно, что максимальная сила каждой мышцы пропорциональна площади ее поперечного сечения, а каждый см^2 мышцы способен развить силу около 50 Н. Мышца, развивая усилие, укорачивается, и максимальная величина этого укорочения не может быть больше 50% ее исходной длины. Таким образом, укорочение мышцы

пропорционально ее длине. Значит, максимальная работа, производимая каждой мышцей и равная произведению максимальной силы на максимальное укорочение, должна быть пропорциональна ее объему. Так как механизм сокращения всех мышц один и тот же, то и максимальная мощность также должна быть пропорциональная объему мышцы.

Если считать, что большие и маленькие рыбы подобны, используют один и тот же стиль плавания и аналогичные мышцы, то максимальная мощность, развиваемая этими рыбами, должна быть прямо пропорциональна объему мышц, занятых в движении, а значит, и объему каждой рыбы:

$$N = k_2 Q ,$$

где Q – объем рыбы, а k_2 – постоянный коэффициент, зависящий от стиля плавания и типа рыбы. Приравнивая два последних выражения для мощности, получаем

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

где C_2 – коэффициент, не зависящий от размеров рыбы. Пусть v_1 , v_2 , Q_1 , Q_2 , S_1 , S_2 – скорости, объемы и площади поперечного сечения большой и маленькой рыб соответственно. Тогда имеем

$$\left(\frac{v_1}{v_2} \right)^3 = \frac{Q_1}{Q_2} \frac{S_2}{S_1} .$$

Считая формы рыб подобными, а их длины равными L_1 и L_2 , можно утверждать, что $Q_1/Q_2 = (L_1/L_2)^3$, а $S_1/S_2 = (L_1/L_2)^2$. Поэтому последнее выражение можно переписать в виде

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

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

Заметим, что рост известных пловцов – выше среднего. Так, 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 (рис.61). При этом количество рыб в косяке может быть от нескольких штук до миллионов. Плыть в косяке не только безопаснее, но и энергетич-

чески выгоднее, если держаться точно за вилующим впереди хвостом, который оставляет после себя завихрения, подталкивающие плывущих сзади вперед. Двигаться так, чтобы оказаться точно меж-



Рис.61. Косяк мелкой рыбы и кольца завихрений в нем, облегчающие рыбам движение вперед

ду 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 воды. Вязкость воды в 50 раз, а плотность в 800 раз больше, чем у воздуха. Это и является основной причиной того, что самолеты летают в десятки, а иногда и в сотни раз быстрее, чем плывут обычные подводные лодки и торпеды (их скорость не более 130 км/ч).

Но тормозят движение в воде не только ее большая вязкость и плотность, но и зоны низкого давления (турбулентности и вихри), возникающие на хвосте подлодок и торпед. В тех местах, где давление падает ниже давления насыщенных паров воды (0,023 атм при нормальных условиях), образуются пузырьки пара. Другими словами, когда давление падает, его не хватает, чтобы держать молекулы воды вместе, и они разбегаются, образуя пар. Такие пузырьки пара называют кавитационными пузырьками, а процесс их образования – кавитацией. Последующее схлопывание кавитационных пузырьков рождает ударные волны, которые являются причиной акустического шума подводных лодок и эрозии их гребных винтов. Поэтому когда раньше конструировали обычные торпеды и подводные лодки, то всегда боролись с возникновением кавитационных пузырьков пара.

Что нам мешает, то нам и поможет! Еще в начале 1960-х годов перед советскими учеными была поставлена задача разработать принцип движения под водой со скоростями, близкими к скорости звука. И тогда возникла идея превратить заклятого врага – кавитацию – в помощника. Если не бороться с кавитацией, а, наоборот, создать все условия для нее, тодвигающееся 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 ее газовом пузыре. А это значит, что резко уменьшается сила сопротивления и, соответственно, увеличивается скорость движения под водой. Однако очевидно, что сила тяги гребного винта в условиях суперкавитации падает, так как со всех сторон он окружен газовыми пузырьками, поэтому для источника тяги в таких условиях больше подходит ракетный двигатель.

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

ЧТО ТЯНЕТ ГОЛЬФСТРИМ НА СЕВЕР?

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, солености воды, ее температуры, топографии океанского дна и силы Кориолиса, вызванной вращением Земли вокруг оси.

Гольфстрим (в переводе с английского – поток из залива) – теплое поверхностное течение, несущее около 150 млн кубических метров воды в секунду из Мексиканского залива в Северную Атлантику и достигающее берегов Западной Европы, где оно меняет свое название на Северо-Атлантическое течение (рис.62). Оно смягчает климат северо-запада Европы и остывает с приближением к полюсу. 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 идет на север (Гольфстрим), а другое – на юг (Бразильское). Между Кубой и Флоридой Гольфстрим имеет скорость около 5 км/ч, ширину около 70 км, глубину



Рис.62. Карта Атлантического океана; жирной стрелкой, обозначен Гольфстрим

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 километров в день.

Для сравнения, самая полноводная река в мире Амазонка несет в Тихий океан лишь около 0,2 млн кубических метров воды в секунду – в 10000 раз меньше, чем Гольфстрим. Что касается Амазонки, как впрочем и всех остальных рек, вода в них 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, всплывает на поверхность, нагревается солнцем и опять с Гольфстримом несется к Гренландии.

Круговорот воды в Атлантике напоминает картину конвективных потоков воды в кастрюле, центральная часть дна которой подогревается газовой горелкой (рис.63). 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 какие-нибудь маленькие частички (фильтровальной бумаги или промочашки) или добавить в нее несколько капель краски. Объяснить

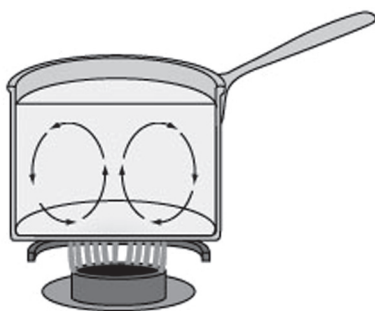


Рис. 63. Схематический разрез кастрюли с водой, стоящей на газовой горелке

движение воды в кастрюле, стоящей на огне, довольно просто. Вода, нагретая у дна кастрюли, имеет меньшую плотность и поднимается вверх, а ей на смену приходит остывшая у стенок вода, имеющая большую плотность.

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 по глубине – от поверхности до дна. Оказывается, что в январе разница температур в Мексиканском заливе и у берегов Гренландии составляет около 30°C , а глубинные воды Атлантики (на глубине более 3000 м) имеют одну и ту же температуру – около 3°C . Температуры же глубинных и поверхностных вод у берегов Гренландии практически не отличаются. Достаточно ли такого распределения температур, чтобы толкать Гольфстрим от Флориды к берегам Гренландии?

Конвективные потоки воды в кастрюле, стоящей на огне, возникают из-за того, что ее нагревают *снизу*. Нагрев кастрюли *сверху* (например, лампой) приведет к тому, что верхние слои жидкости нагреются 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 температуры не сможет стать движителем Гольфстрима.

Что же все-таки толкает Гольфстрим на север?

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 массовая плотность воды зависит не только от температуры, но и от ее солёности. На рисунке 64 показана зависимость массовой плотности воды от содержания в ней хлористого натрия. 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%, а 85% всех солей, растворенных в океанской воде, это NaCl. Масса океанской соли так велика, что если всю ее уложить вдоль земного экватора стеной шириной в 1 км, то высота этой соляной стены составит 500 км.

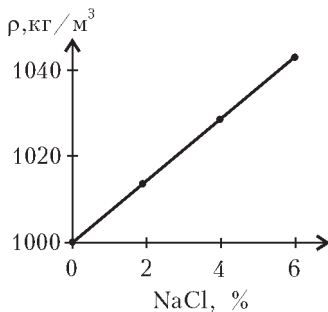


Рис. 64. Зависимость массовой плотности воды от содержания в ней хлористого натрия при 15°C .

А теперь обратим внимание на то, что около берегов Гренландии солёность воды, а значит, и ее

плотность резко увеличиваются. Происходит это потому, что даже в июле температура воздуха в Гренландии не поднимается выше -20°C . 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 высока. Вода под гренландским льдом не только очень соленая, но и тяжелая, поэтому она опускается на дно, а на образовавшееся «пустое» место у берегов Гренландии поступает легкая вода Гольфстрима. Опускающиеся на дно соленые и холодные воды образуют в нескольких сотнях километрах 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 $+10^{\circ}\text{C}$, хотя в Нью-Йорке, находящемся вдалеке от Гольфстрима, но на той же широте, температура зимой часто опускается ниже 0°C . 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 соленость 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.

ФИЗИКА СТИРКИ И ЧИСТКИ: КАК МОЮТ МЫЛО И УЛЬТРАЗВУК

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 подождать чуть-чуть. К сожалению, большая часть веществ, к которым мы прикасаемся, нерастворимы в воде, и поэтому, если они прилипают к рукам или одежде, одна вода не позволяет избавиться от 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 емкости, наполненные веществом, похожим на мыло. Надписи на этих сосудах гласили, что содержимое сделано при кипячении жира с пеплом. Поэтому считается, что варить мыло умели еще в 2800-х годах до н.э. Записи на папирусах, оставленные древними египтянами 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 стирали без всякого мыла в проточной воде.

Английское слово «soap» – мыло – произошло от названия горы Sapo в Италии, на вершине которой, согласно легенде, приносили животных в жертву, убивая и сжигая их. Дождь смывал в реку Тибр, протекающую неподалеку, 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 шло на убыль, и его постепенно вытесняли синтетические моющие средства. Главная причина спада потребления мыла состояла в том, что в жесткой воде образовывались нерастворимые соли жирных кислот, выпадающие в осадок (кольцевые пятна 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. Натриевые мыла более густые и, как правило, твердые; калиевые мыла более мягкие или жидкие. Молекула мыла представляет собой длинную цепочку (хвост), состоящую из десятка и более звеньев CH_2 , соединенных друг с другом, к одному концу которой (голове) прикреплена карбоксильная группа CO_2 . Простейшим мылом, например, является стеарат Na, который можно представить формулой $\text{NaC}_{17}\text{H}_{35}\text{COO}$, где 17 атомов углерода с присоединенными к ним атомами водорода вытянуты в извилистую цепочку (рис.65).

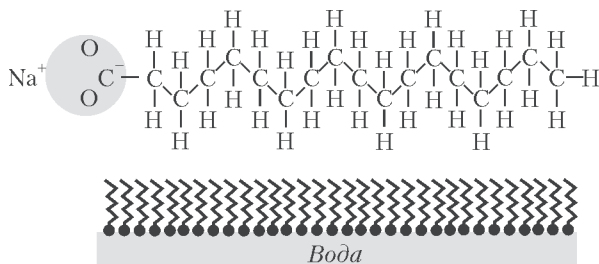


Рис. 65. Схематическое изображение мыльной молекулы (вверху) и расположение этих молекул на поверхности воды (внизу)

Асимметрия молекулы мыла – ее важнейшее свойство. Голова молекулы в растворе заряжена отрицательно и поэтому притягивается к положительным полюсам диполей молекул воды или, как говорят, испытывает сродство к воде. Другой конец молекулы мыла электрически нейтрален и поэтому инертен по отношению к воде.

Когда мыльная молекула стеарата Na попадает в воду, она диссоциирует на положительно заряженный ион натрия и отрицательное основание жирной кислоты. Отрицательные ионы мыльных молекул выстраиваются так, чтобы с водой соприкасались лишь их головы, которые испытывают к ней сродство.

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 жидкости или твердых тел обладают избыточной потенциальной энергией по отношению к таким же молекулам, находящимся внутри. Эта энергия равна по величине работе, необходимой для того, чтобы молекулам выйти на поверхность, преодолевая силы притяжения соседних молекул. Очевидно, что поверхностная потенциальная энергия (U) пропорциональна площади поверхности (S):

$$U = \sigma S ,$$

где σ – коэффициент поверхностного натяжения, который определяется свойствами соприкасающихся жидкости и газа или жидкости и твердого тела, а также температурой окружающей среды. Как следует из таблицы 7, коэффициент поверхностного

Таблица 7

**Коэффициенты поверхностного натяжения
различных жидкостей**

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

натяжения может изменяться в довольно широких пределах, увеличиваясь в десятки раз от спиртов до ртути.

Так как с величиной поверхности жидкости связана потенциальная энергия сил поверхностного натяжения, то жидкость, стремясь к минимуму потенциальной энергии, всегда старается сделать эту поверхность меньше. И чем больше коэффициент поверхностного натяжения жидкости, тем с большей 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. Происходит это из-за того, что, находясь на поверхности воды «головой вниз», они, 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 в щели между нитями ткани. Другими словами, мыло делает воду «более мокрой».

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

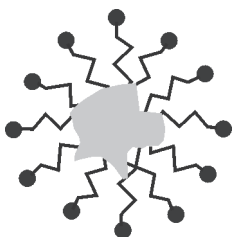


Рис. 66. Образование мицеллы из мыльных молекул вокруг частицы жира или грязи

действия важно то, что углеводородная часть (хвост) отрицательного иона мыльной молекулы нерастворима в воде, но растворима в жирах и маслах. Поэтому 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 шарики – мицеллы (рис.66) 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.

Почему горячая вода моет лучше? При нагревании средняя кинетическая энергия молекул воды увеличивается, а это значит, что каждой из них требуется меньше дополнительной энергии, чтобы выйти на поверхность. Поэтому поверхностное натяжение воды уменьшается при нагревании, и вода может проникать в самые мелкие поры и дырочки. Вот почему надо мыть руки горячей водой. Мыло и детергенты еще больше понижают 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 образо-

вать мицеллы вокруг частичек грязи и жира. Поэтому поверхностное натяжение мыльного раствора в морской воде увеличивается, что снижает качество стирки. То же происходит, когда водопроводная вода содержит высокую концентрацию двухвалентных ионов, например железа. Такую воду называют «жесткой», и в ней мыло стирает плохо.

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 залезает в самые тонкие промежутки между волокнами ткани. Чтобы он вылез оттуда, необходимо повысить поверхностное натяжение, тогда каждой из сплюснутых капелек опять станет выгодно стать шарообразной, и они выскочат из тонких промежутков между нитями. Поэтому полоскать ткань после стирки следует в холодной воде, когда ее поверхностное натяжение больше.

Надо ли использовать антибактериальное мыло? Мыльные молекулы обволакивают бактерии так же, как и частички прилипшей к коже грязи. Поэтому в мыльном растворе скоро оказывается большинство бактерий. Ученые доказали, что обычное мыло никак не хуже борется с бактериями, чем разрезанное повсюду антибактериальное. В отличие от обычного, антибактериальное мыло содержит химические препараты (антибиотики), убивающие бактерии. Однако именно это и является недостатком антибактериального мыла. Дело в том, что антибиотик не в состоянии убить абсолютно все бактерии, а оставшиеся в живых «супербактерии» обладают необычайно высокой стойкостью по отношению к данному антибиотику. Они начинают размножаться, и скоро на нашей коже появляется столько же бактерий, сколько было до мытья, но все эти бактерии являются «детками» супербактерий, и поэтому многие из них переняли от своих родителей нечувствительность к действию этого антибиотика. В результате антибактериальное мыло скоро становится бесполезным, а супербактерии с кожи распространяются по всему организму, и бороться с ними нужно уже с помощью другого, более мощного антибиотика. В общем, «хотели, как лучше, а получилось...»

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 для этих целей служит хлор. В современных

стиральных порошках используют более избирательные отбеливатели, основанные на броме. 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 химическим образом, как это делает мыло, но и механически. Каждый знает, что если потереть испачканное место, а потом сполоснуть его в воде, то пятно станет менее заметным. Поэтому энергия звуковых волн может служить альтернативой обычному мылу при стирке. Для этого достаточно, чтобы скорости движения частиц воды и грязи в звуковой волне отличались. Тогда частички воды будут сталкиваться с частичками грязи, разрушать (диспергировать) их и перемешиваться, образуя эмульсию.

Известно, что в распространяющейся со скоростью c звуковой волне мгновенное значение давления p и скорость v перемещения частицы среды связаны соотношением

$$v = \frac{p}{\rho c},$$

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 скорости движения частиц воды и грязи будут различны. Очевидно, что чем чаще звуковая волна встряхивает грязь, тем лучше для чистки и стирки, поэтому для достижения максимального диспергирующего и эмульгирующего эффектов используют ультразвук (УЗ) с частотой до нескольких сот килогерц.

Как получают ультразвук? Ультразвуковые волны в жидкостях обычно возбуждают магнитострикционными и пьезоэлектрическими преобразователями (генераторами). Пьезоэлектрические генераторы УЗ (рис.67) преобразуют 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 соответствующие механические колебания. Пьезоэлектрические генераторы могут быть мощными источни-

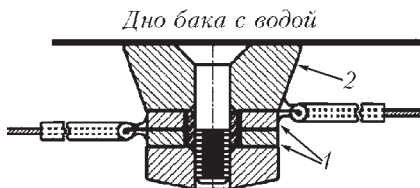


Рис. 67. Внешний вид пьезоэлектрического генератора УЗ и его схематический разрез: 1 – блок пьезоэлектрических преобразователей, 2 – металлическое соединение с дном контейнера с водой

ками УЗ с частотами до 1000 МГц. Используя пьезокерамику, поверхность излучателя часто делают сферической, что позволяет фокусировать излучение на малой площади, получая там очень большую интенсивность УЗ. Такая фокусировка используется, например, в литотрипсии – разбивании камней в почках и мочевом пузыре с помощью ультразвука без затрагивания окружающих тканей.

Магнитострикционные генераторы УЗ (рис.68) сначала преобразуют 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

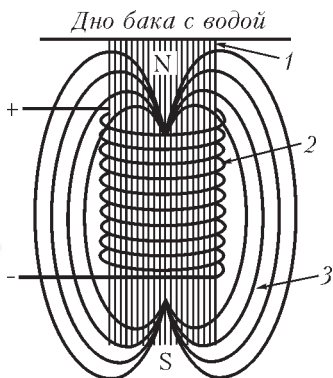
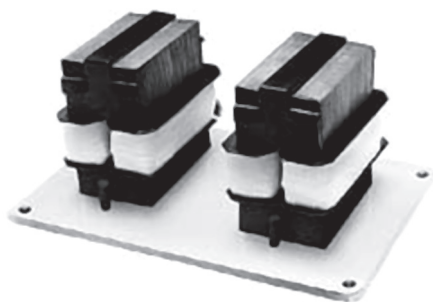


Рис. 68. Внешний вид магнитострикционного генератора УЗ и его схематический разрез: 1 – спаянное соединение металлических пластин и дна контейнера, 2 – катушка из проволоки, 3 – линии магнитного поля

этот 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 диапазоне (от 20 до 50 кГц), а на более высоких частотах их коэффициент полезного действия становится очень малым.

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

Что такое кавитация? Оказывается, существенную роль в образовании 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 достаточное количество газа, то по достижении им минимального радиуса он восстанавливается и совершает нескольких циклов затухающих колебаний, а если газа мало, то пузырек захлопывается полностью, и вблизи обтекаемого тела (например, на поверхности лопасти гребного винта) создается «кавитационная зона», заполненная движущимися пузырьками (рис.69).

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 ка-

витационного пузырька происходит с большой скоростью, и если это быстрое движение внезапно прекратится вследствие полного смыкания полости, то сконцентрированная в ничтожном объеме кинетическая энергия освободится и перейдет частично в тепловую энергию и частично 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.

Для того 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. С другой стороны, высокие концентрации растворенных газов замедляют смыкание кавитационных пузырьков, подавляя одновременно и эмульгирование. Поэтому процессу стирки обычно предшествует дегазирование жидкости с помощью ультразвука. Это происходит из-за того, что уже имеющиеся в жидкости пузырьки газа под действием ультразвука соединяются в более крупные и всплывают. Кроме того, и сама кавитация приводит к дегазации жидкости. Интенсивные колебания газонаполненных пузырьков вблизи поверхности твердых тел создают микропотоки жидкости, делающие ультразвуковую стирку и чистку более эффективной.

Как гидростатическое давление влияет на кавитацию? В вакууме жидкость лишена микропузырьков, и поэтому УЗ не вызывает в ней ни кавитации, ни эмульгирования. Понижение внешнего давления ниже атмосферного, меньше 20 кПа, мешает смыканию возникающих кавитационных пузырьков, уменьшая мощность кавитационных ударных волн. Очень высокие давления, больше 10000 кПа, уничтожают микропузырьки, являю-

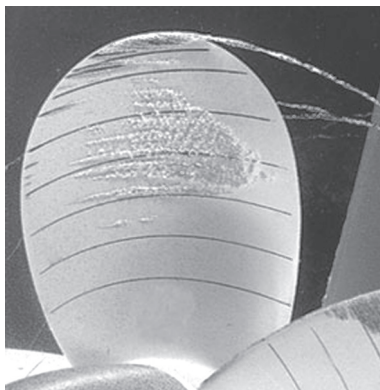


Рис. 69. Возникновение кавитационных пузырьков вблизи поверхности лопасти вращающегося гребного винта

щиеся зародышами кавитации, препятствуя ее возникновению. Однако увеличение гидростатического давления до 200 кПа помогает схлопываться до конца большинству кавитационных пузырьков, поэтому подводники замечают, что кавитация, измеряемая по интенсивности шума гребных винтов, резко увеличивается при погружении на 10–20 метров, 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, жировых пленок 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 абсолютно гладкими детали шарикоподшипников 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. Например, в обычной воде кавитация возникает при звуковом давлении 100 кПа, если частота звука 15 кГц, и только при 400 кПа, если частота 175 кГц. Инерция колебаний кавитационных пузырьков делает зависимым их диаметр от частоты: при 15 кГц – 200 мкм, а 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 целые слои грязи или ржавчины. Однако крупным пузырькам тяжело пролезть в щели, чтобы вытащить оттуда грязь, а значит, нужны и мелкие пузырьки, которые будут работать там, где большие не могут. Поэтому для хорошей чистки и стирки необходим генератор УЗ с плавающей частотой.

Как ультразвук борется с бактериями? Самым эффективным способом дезинфекции служит кипячение. Однако, когда инструмент (например, эндоскопический зонд), подлежащий дезинфекции, сделан из пластмассы, кипячение может навсегда 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 действию УЗ. Кроме того, установлено, что УЗ расщепляет высокомолекулярные биополимеры на фрагменты с относительной молекулярной массой около 30000 при экспозиции 5–10 мин.

История и настоящее ультразвуковых стиральных машин.

Первый раз в мыльном растворе с помощью УЗ выстирали хлопчатобумажные простыни, испачканные жирной сажой, в 1949 году. Для этого понадобился 1 час работы и пятикратная смена воды. Обычная стирка в том же растворе заняла 3 часа и потребовала пятнадцатикратную смену воды. Как отмечали изобретатели, по сравнению с обычной, ультразвуковая чистка не снижала прочность простыней. Прошло 50 лет, но до сих пор, к сожалению, ультразвуковая стирка не находит широкого применения в быту, хотя ее старшая сестра ультразвуковая чистка активно работает в лабораториях и в промышленности.

В продаже у нас все чаще появляются миниатюрные ультразвуковые стиральные машины, потребляющие очень малую мощность (5–15 Вт) с излучателем размером 5–10 см. Но они 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, лишь делает более эффективным действие deterгента, доставляя его к местам загрязнения. В то же время одна из японских компаний уже несколько лет выпускает ультразвуковые стиральные машины, рассчитанные на 8 кг белья, не требующие для стирки стирального порошка. При стирке через воду пропускают ток, происходит гидролиз воды, и получающиеся продукты гидролиза – активный кислород, озон и перекись водорода – являются тем коктейлем, который вполне заменяет стиральный порошок. А так как в воде всегда содержится хлор, то при гидролизе образуется еще гипохлорная кислота (HOCl), которая является хорошим отбеливающим и дезинфицирующим препаратом.

Очевидно, что дальнейшее внедрение ультразвуковых стиральных машин позволит уменьшить энергетические затраты на стирку, а также количество используемых deterгентов, делая этот процесс менее экологически вредным.

ТЕПЛО И ХОЛОД: ФИЗИКА И БИОЛОГИЯ

Жизнь возможна только в очень узком диапазоне температур окружающей среды – от нескольких градусов ниже 0°C (температура замерзания чистой воды) до $40\text{--}50^{\circ}\text{C}$ выше нуля. Чтобы сделать свою жизнь более комфортной и не испытывать переохлаждения или чрезмерного нагрева, человек носит одежду, нагревает свой дом зимой и охлаждает его летом. О том, какая физика стоит за чувством холода и жары, что такое тепловые насосы и крионика, и пойдет речь в этой главе.

Почему человек чувствует себя лучше, когда его температура около 37°C ? Нам хорошо, когда у нас $36,6^{\circ}\text{C}$, но стоит нашей температуре увеличиться или уменьшиться лишь на 1°C , нам становится жарко или холодно. Ну а если температура тела отклоняется от нормальной на 4°C , то жизни человека грозит большая опасность. Такая тонкая чувствительность человека к температуре тела связана с тем, что самые важные химические реакции в нашем 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

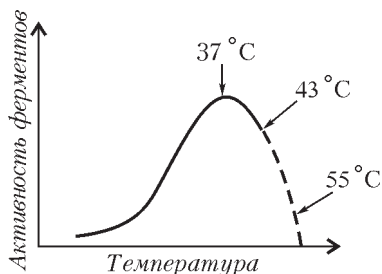


Рис. 70. Зависимость активности ферментов (скорости химических реакций с их участием) от температуры: сплошная линия – обратимые изменения, пунктирная – необратимые

огромной молекулы. С изменением температуры пространственная структура молекулы фермента изменяется, и он перестает «работать». Поэтому скорость работы, т.е. активность, многих ферментов максимальна при 37°C , а при нагревании выше 43°C они уже необратимо портятся (рис.70). Узкий диапазон температур работы ферментов и определяет ту область температур, в которой мы чувствуем себя комфортно.

Как человек нагревал и продолжает нагревать свое жилище? Мы научились нагревать свой дом гораздо раньше, чем охлаждать его. Чтобы не замерзнуть, наши предки разводили костры в пещерах. К сожалению, мы не далеко ушли вперед. Просто большинство из нас не видят тех костров, которые день и ночь горят, чтобы в квартирах было тепло. В крупных городах, где теплая вода успевает остыть на своем долгом пути от того места, где ее нагревают, до жилых домов, ее приходится подогревать дважды. Поэтому часто там, где холодно, но нет топлива, люди мерзнут, а страны воюют между собой за право обладать месторождениями газа и нефти. Но тепло окружает нас со всех сторон! Просто надо уметь взять его и перенести в дом.

Как перенести тепло атмосферы и земли в дом? Конечно, если зимой просто внести некоторый объем воздуха или кусок земли с улицы домой, то в квартире теплее не станет. Однако можно поступить по-другому. Находясь на улице, возьмем жидкость, кипящую при низкой температуре, например фреон-12 (CF_2Cl_2), и нальем несколько миллилитров ее в резиновый шарик, после чего сразу завяжем шарик веревкой, чтобы пары фреона не улетучились. Так как температура кипения фреона равна -33°C , то даже зимой на улице весь фреон испарится, а шарик надует. Каждый грамм фреона, испаряясь, берет тепло из холодного воздуха, которое можно оценить, зная удельную теплоту парообразования фреона (139 кДж/кг). А теперь внесем этот шарик в комнату и сожмем его. Когда давление внутри шарика вырастет настолько, что пары фреона начнут конденсироваться, вся та тепловая энергия, которую мы отняли на улице у холодного воздуха, выделится в комнате, и там станет теплее. Ну а потом, когда шарик остынет, чтобы завершить цикл, можно опять вынести его на улицу, уменьшить давление внутри него и снова дожидаться, пока весь фреон испарится. Таким образом, совершая работу над паром, мы переносим тепло от более холодного тела (воздух на улице) к более тепловому (воздух в комнате). Устройства, делающие это циклически, называют тепловыми насосами. Разумеется, тепловые насосы могут закачивать внутрь помещения тепло не только атмосферы, но и грунта и находящихся рядом водоемов.

Тепловые насосы — холодильники наоборот! Наверное, почти все замечали с задней стороны наших домашних холодильников явно теплую, а иногда даже горячую решетку радиатора. В принципе, наш холодильник можно назвать тепловым насосом, выкачивающим тепло из холодильной камеры в комнату или кухню. И вообще, тепловые насосы — это холодильники,

откачивающие тепло, например из незамерзающих глубин земли. Известно, что 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 °С.

Первый тепловой насос, названный умножителем тепла, был предложен Уильямом Томсоном (лорд Кельвин) в 1852 году и представлял собой холодильник, используемый для отопления. Томсон считал, что ограниченность энергоресурсов не позволит в будущем сжигать топливо в отопительных печах, а его умножитель тепла будет потреблять топлива меньше. Тепловой насос Томсона в качестве рабочего тела использовал воздух. Воздух засасывался из помещения в цилиндр, расширялся и при этом охлаждался, а 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 следующей схеме (рис.71). В испарителе теплового насоса (теплообменнике, находящемся на улице) тепло земли, водоемов или окружающего

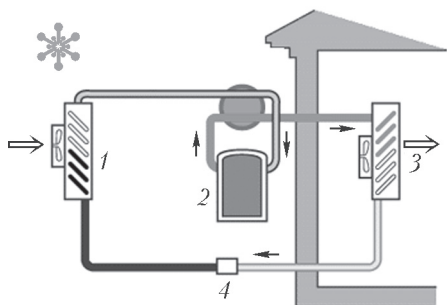


Рис. 71. Схема работы теплового насоса, выкачивающего тепло из наружного воздуха: 1 – испаритель, 2 – компрессор, 3 – конденсатор, 4 – клапан (сужение), разделяющий зону высокого (справа) и низкого (слева) давлений, через который жидкий хладагент медленно перетекает, попадая в наружный теплообменник

воздуха используется для испарения хладагента (жидкости, кипящей при низкой температуре). Полученный пар сжимается компрессором, и температура пара повышается. Затем в конденсаторе (теплообменнике внутри помещения) пар остывает, и его тепло передается в систему отопления и горячего водоснабжения. При этом количество теплоты, предоставляемое потребителю, может в несколько раз превышать затраты энергии на привод компрессора.

Коэффициент преобразования холодильников и тепловых насосов. Отношение полезного количества теплоты к работе, затрачиваемой на привод компрессора, называют коэффициентом преобразования теплового насоса, в наиболее распространенных теплонасосных системах он достигает 3 и более. Попробуем понять, почему пользоваться тепловым насосом гораздо выгоднее, чем даже идеальным электрообогревателем, коэффициент преобразования которого равен 1.

Холодильник и тепловой насос – это двигатели, работающие «наоборот» по отношению к тепловой машине, так как в них мы совершаем работу, чтобы охладить более холодное тело и нагреть более теплое. Известно, что КПД идеального теплового двигателя (машины Карно), преобразующего тепло в работу, равен

$$\text{КПД} = \frac{A}{Q + A} = \frac{T_{\text{н}} - T_{\text{х}}}{T_{\text{н}}} < 1,$$

где Q – затраченное количество теплоты, A – работа, $T_{\text{н}}$ и $T_{\text{х}}$ – температуры нагревателя и холодильника соответственно. Это значит, что если мы захотим нагревать дом с помощью идеального теплового насоса, его коэффициент преобразования КОП будет равен

$$\text{КОП} = \frac{Q + A}{A} = \frac{T_{\text{н}}}{T_{\text{н}} - T_{\text{х}}} \gg 1.$$

Таким образом, нагревать комнату тепловым насосом гораздо выгоднее, чем электрическим камином, так как из земли или из холодного воздуха нам удастся выкачать в несколько раз большее количество теплоты.

Сегодня топливные насосы выпускаются тепловой мощностью от 2 кВт до 200 МВт. Как показали оценки, применение таких насосов позволит сократить потребление топлива (газ, мазут, уголь и т.д.) приблизительно на 40%, что соответственно снизит загрязнение окружающей среды. В настоящее время общий ежегодный объем продаж выпускаемых за рубежом топливных насосов составляет более 100 млрд долларов США, что превышает, например, мировой объем продаж вооружений в несколько раз. Швеция, скажем, уже сегодня 70% тепла получает с помощью топливных насосов, а по прогнозу Мирового энергетического комитета к 2020 году 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 температура грунта на этой глубине равна 12 °С, но летом она поднимается до 25 °С. В течение всего лета теплую воду из труб сливают в теплоизолированные емкости, закопанные рядом с дорогой. Зимой, как только температура дорожного покрытия упадет ниже 2 °С, по трубам начинают пропускать воду, нагретую прошлым летом, 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. Двигаясь относительно тела, он отбирает у него тепло. Толщина слоя неподвижного воздуха уменьшается при среднем ветре от 2–4 мм до 1 мм, а свитер увеличивает ее до 10 мм. При появлении мурашек волосы «встают», что также утолщает слой неподвижного воздуха. Конечно, далеко не у всех при появлении мурашек возникает на теле «свитер» из собственных волос, но мы до сих пор не можем избавиться от этого врожденного рефлекса наших далеких и волосатых предков.

Почему мы дрожим от холода? Сокращения мышц не только дают нам возможность двигаться, но и снабжают нас теплом. Мышцы не являются идеальными пружинами, которые, сжимаясь, хранят в себе всю энергию деформации, а при расслаблении совершают работу. Деформация мышц неупругая, и поэтому они, сокращаясь и совершая работу, одновременно служат источником тепла. Выполняя среднюю физическую работу, мы разогреваемся, а мышцы, составляющие около 50% массы нашего тела, являются при этом источником почти 75% всего получаемого тепла. Остальные 25% – это тепло, выделяющееся при различных биохимических реакциях. Когда мы дрожим от холода, наши мышцы беспорядочно сокращаются, и это хотя и мешает координации движений, но позволяет нам согреться.

Как сохраняет тепло тюлень, плавая в Ледовитом океане? Моржи и тюлени плавают в холодной воде, температура которой около 0 °С. Поэтому основная проблема, с которой они сталкиваются, это как сохранить тепло. Для этого все тело у них покрыто толстым слоем подкожного жира, который служит хорошим теплоизолятором. Однако на лапах и хвосте (чтобы они были легкими и подвижными) жира нет, и их температура падает до 1–2 °С. Поэтому через эти непокрытые

жиром конечности 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 всегда 37°C . Поэтому кровообращение служит одной из основных причин теплопотерь. Однако мудрая Природа так устроила систему кровоснабжения конечностей у тюленей, чтобы эти потери были минимальными. Как именно?

Противоточная система: экономия тепла. Опустим в снег трубку, изогнутую в виде буквы U, и будем пропускать через нее горячую воду (рис.72, слева). Очевидно, что, 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 трубок 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 половине трубки (см. рис.72, справа), двигаясь вглубь снегового слоя. Когда вода, сделав разворот, направится обратно, к ней начнет поступать тепло от более нагретой воды, текущей рядом в противоположном направлении, и температура выходящей из холода воды начнет постепенно увеличиваться. Таким образом, противоточное движение позволяет значительно уменьшить тепловые потери, так как часть тепла отдается холодной жидкости, возвращающейся из снега.

У тюленей и моржей кровоснабжение в конечностях противоточное, что позволяет уменьшить потери тепла, так как часть тепла артериальной крови, текущей от сердца к периферии, отдается более холодной венозной крови, возвращающейся из отдаленной части лапы или хвоста. Чтобы теплопередача между артериями и венами была более эффективной, вены просто

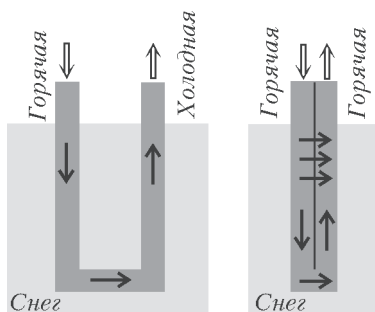


Рис. 72. Обычная система циркуляции воды через снег (слева) и ее противоточный аналог, уменьшающий теплопотери (справа)



Рис. 73. Противоточная система кровоснабжения конечностей тюленя: 1 – артерия, несущая теплую кровь к холодному краю ласты, 2 – вены с кровью, текущей от холодного края ласты

оплетают артерии, несущие теплую кровь к конечностям тюленя (рис.73).

Почему хомяк все время ест? Каждый, кто когда-нибудь держал у себя дома хомяка или видел его у знакомых, поражала его прожорливость, о которой так много сказано в наших 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 же зависит количество пищи, необходимое животному для нормальной жизнедеятельности?

Известно, что определенная температура тела у теплокровных животных поддерживается за счет выделения тепла при постоянно протекающих химических реакциях – процессах метаболизма. Подсчитано, что потребление организмом 1 см^3 кислорода сопровождается выделением 20 Дж теп-

ла. При этом освободившееся количество теплоты не зависит от вида пищи.

Пусть животное имеет форму шара радиусом R , а единица массы животного нуждается каждую секунду в $q \text{ см}^3$ кислорода. Тогда количество теплоты Q_1 , освобождающееся каждую секунду в организме, составит

$$Q_1 = \frac{4}{3} \pi R^3 \rho \cdot q \cdot 20 \text{ Дж},$$

где ρ – плотность тела животного. Так как температура тела остается постоянной, количество теплоты, образующееся в организме за счет метаболических процессов, должно равняться количеству теплоты, перешедшему от животного в окружающую среду. Известно, что количество теплоты Q_2 , переходящее в единицу времени от более нагретого тела к менее нагретому при их соприкосновении, пропорционально площади соприкосновения S , разности их температур ΔT , теплопроводности среды между ними λ и обратно пропорционально толщине слоя этой

среды Δx . Так как у нашего шарообразного «животного» $S = 4\pi R^2$, то

$$Q_2 = \lambda \cdot 4\pi R^2 \frac{\Delta T}{\Delta x}.$$

Приравнивая количество теплоты, освобождающееся в организме при метаболических процессах, и количество теплоты, теряемое телом через его поверхность, получаем

$$q = \frac{k}{R}, \text{ где } k = \frac{3\lambda}{20\rho} \frac{\Delta T}{\Delta x}.$$

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 равна

$M = (4/3)\pi R^3 \rho$, то q можно выразить и через M :

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

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 и количество пищи в расчете на единицу массы тела для хомяка должно быть гораздо больше соответствующей величины для слона.

Конечно, сделанное допущение о шарообразности животных несправедливое, но очевидно, что полученная формула для q годится и для всех подобных животных (рис.74). Ну а для реальных животных и человека, как

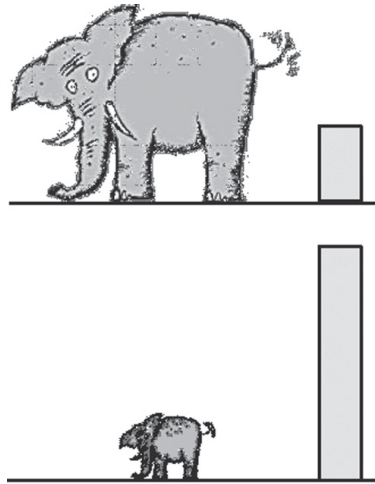


Рис. 74. Схематическое изображение двух подобных животных; столбиком указано соответствующее количество теплоты, выделяемое каждым килограммом животного для поддержания постоянной температуры

показали измерения, $q = 70M^{-1/3}$ ккал/(день · кг), что, например, для человека массой 60 кг соответствует приблизительно 1500 ккал в день. Таким образом, только для поддержания постоянной температуры мы должны тратить на обогрев 1500 ккал в день. Другими словами, человек – это лампочка мощностью около 75 Вт, так как в теле человеке, 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 наш организм от перегрева. Кроме того, холод необходим продуктам, которые мы сегодня не собираемся есть. Имеются, по крайней мере, два способа охладить себя: 1) вылить себе на руку одеколон или спирт, которые, испаряясь, отнимут тепло у руки, а значит, охладят ее; 2) открыть баллончик со сжатым газом и направить его струю на руку, который, 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 годов.

Как работает обычный (компрессионный) холодильник? Компрессионный холодильник (рис.75) состоит из: насоса (компрессора), который создает область высокого давления в трубках теплообменника снаружи холодильной камеры и область

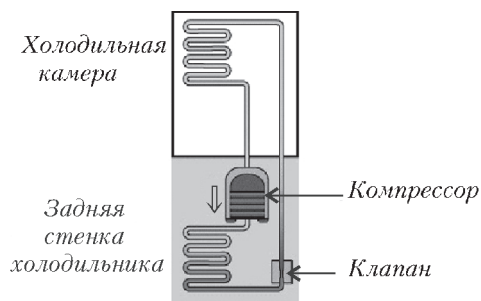


Рис.75. Схема компрессионного холодильника

низкого давления в трубках теплообменника внутри холодильной камеры; клапана (сужения), разделяющего эти две секции теплообменника; хладагента с температурой кипения около -30°C , переходящего из одной секции теплообменника в другую, а также из газообразного состояния в жидкое и обратно.

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

сжимается газ, находящийся во внешнем теплообменнике, и его давление и температура увеличиваются;

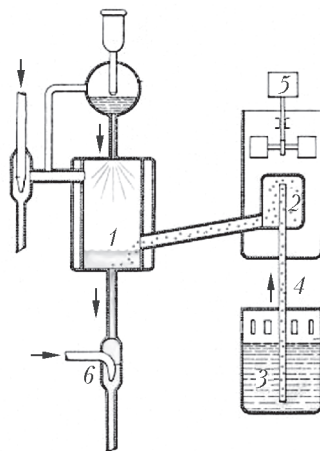
двигаясь по внешнему теплообменнику, газ остывает, нагревая воздух в комнате;

наконец, температура газа падает настолько, что часть газа конденсируется в жидкость;

высокое давление перед клапаном выбрызгивает капельки жидкого хладагента в секцию теплообменника, находящуюся под низким давлением, где хладагент начинает кипеть, испаряясь и понижая температуру холодильной камеры.

Холодильник Эйнштейна. В компрессионном холодильнике всегда есть электродвигатель, движущиеся части которого являются источником шума и значительно уменьшают надежность его работы. Интересно, что у истоков создания холодильников, не содержащих подвижных частей, стояли два известных физика – Альберт Эйнштейн и Лео Сцилард. В 20-х годах прошлого века они предложили сразу несколько типов таких холодильников (один из них изображен на рисунке 76). 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 «Электролюкс», которая до сих пор производит холодильники.

Рис. 76. Схема одного из холодильников, предложенных А. Эйнштейном и Л. Сцилардом. С помощью водоструйного насоса в колбе 1 создается давление меньше атмосферного. В результате жидкий метанол из 3 поднимается по трубке 4 и испаряется, понижая температуру воздуха в 2, вследствие чего охлаждается контейнер 5, где может, например, находиться мороженое. Далее метанол вместе с водой смывается в водопровод с помощью второго водоструйного насоса 6



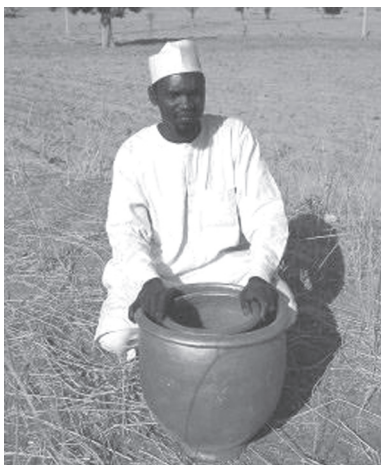


Рис. 77. Примитивный холодильник, состоящий из двух глиняных горшков с влажным песком между ними

заполненный, например, овощами. Использование такого холодильника позволяет в несколько раз продлить срок хранения овощей.

Крионика — дорога к бессмертию. Крионика, т.е. 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 незначительным изменениям и поэтому может сохраняться неопределенно долгое время. Тогда же появилась и фантастическая идея замораживать тела неизлечимо больных до сверхнизких температур, чтобы оживить их в будущем, когда медицина освоит более действенные методы лечения. Идея быстро овладела массами. Приятно сознавать, что у тебя есть надежда, тем более что научные и псевдонаучные публикации, фантастические фильмы и книги эту надежду постоянно подогревают.

Все процессы в организме — это череда огромного числа связанных между собой химических реакций. Понижение температуры замедляет скорость теплового движения молекул и диффузию, в результате чего понижается и скорость всех химических реакций. Поэтому при понижении температуры тела на каждые 10°C интенсивность физиологических процессов падает настолько, что потребление кислорода животными уменьшается в 2–3 раза.

К сожалению, приход к власти фашистов, а потом вторая мировая война помешали воплощению этих проектов, так как Эйнштейн эмигрировал в США, а Сцилард — в Англию.

Самый примитивный холодильник. Одним из самых простых и надежных холодильников, который до сих пор используется коренным населением африканских пустынь, является пара вложенных друг в друга глиняных горшков (рис.77). Пространство между горшками заполняется мокрым песком, а влага, медленно испаряясь, охлаждает внутренний горшок,

Коварные кристаллы льда. Многие животные великолепно переносят заморозку. Особенно этим славятся холоднокровные: тритоны, лягушки и рыбы могут быть помещены в лед, сохранены в течение некоторого времени, разморожены – и даже после такой процедуры они будут чувствовать себя великолепно. Некоторые теплокровные существа также способны переносить холод, впадая в длительную спячку. Но с их замораживанием дела обстоят гораздо сложнее. Самая большая опасность в заморозке теплокровных состоит в том, что при температуре ниже нуля вода внутри клеток превращается в кристаллы льда и разрывает ткани. Для предотвращения этого во время охлаждения можно применять специальные вещества – криопротекторы, которые понижают температуру замерзания воды и поэтому препятствуют образованию кристаллов.

Глицерин – лекарство от замерзания у насекомых и лягушек. Давно известно, что глицерин предохраняет живые организмы от повреждения при замораживании. Глицерин в высокой концентрации содержится в гемолимфе (крови) насекомых, и с этим связывают их способность выживать при низких температурах. Так, у осы к наступлению зимы концентрация глицерина составляет около 3% всего жидкого содержимого этого насекомого. В результате температура замерзания гемолимфы осы снижается до $-17,5^{\circ}\text{C}$.

Свойство глицерина быть хорошим криопротектором широко используется в биологии и медицине. Известно, что эритроциты (красные клетки крови) можно много месяцев хранить без повреждения в замороженном состоянии, если предварительно погрузить их в глицерин. С помощью глицерина можно замораживать даже целых животных. Так, у замороженных до температуры -14°C хомяков, в кровь которых был добавлен глицерин, исчезали все признаки жизни (дыхание, сердцебиение), и они становились совершенно твердыми. Однако пробыв в таком состоянии около часа, 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 – ведь только диффузия молекул воды помогает им соединиться в кристаллы льда. Поэтому если очень резко понизить температуру воды, то ее молекулы застынут на месте, 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 –

сразу на всю глубину тела – можно обойтись и без криопротекторов.

А если увеличить давление? Еще в 1960-е годы была предложена идея использовать для управления кристаллизацией воды высокое давление. Идея эта основана на понижении температуры фазового перехода «вода – лед» при повышении давления. Так, например, при давлении 2045 атм температура кристаллизации чистой воды составляет $-22\text{ }^{\circ}\text{C}$, а значит, при таком давлении воду можно охлаждать, например, до $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$, не боясь, что образуются кристаллы льда.

Давление около 2 тыс. атм с успехом используется сейчас при замораживании продуктов в пищевой промышленности. При этом после долгого хранения при максимально низкой температуре вкус замороженного продукта почти не отличается от свежего, так как при заморозке кристаллы льда не образовывались, а значит, не были разрушены клетки.

К сожалению, метод быстрой заморозки, использование высокого давления и другие попытки экстраполировать принципы замораживания еды или хомяков и лягушек на более крупных животных пока не привели к желаемому результату. До настоящего времени еще не существует способов, позволяющих заморозить и разморозить, не повредив его, даже отдельный орган, не говоря уже о человеке в целом. Однако имеющиеся данные вполне позволяют надеяться на то, что фантастические идеи смогут стать реальностью.

ЧТО ОБЩЕГО МЕЖДУ ЧУДОМ СВ. ЯНУАРИЯ И БУРОВЫМ РАСТВОРОМ?

В этой главе речь пойдет о вязкости жидких суспензий. Вернее, о том, как она изменяется.

Вязкость (или внутреннее трение). Это свойство жидкостей характеризует сопротивление, которое они оказывают при течении. Бензин, вода и молоко – относительно жидкие, они текут лучше, чем более вязкие жидкости, такие как мед, кетчуп или сметана. Значение вязкости 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.78). В соответствии с формулой, предложенной еще Ньютоном,

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

где выражение в числителе называют напряжением сдвига, а в знаменателе – скоростью сдвига. В единицах СИ вязкость измеряется в $\text{Па} \cdot \text{с}$, а в единицах СГС – в пуазах ($0,1 \text{ Па} \cdot \text{с}$). В таблице 8 приведены значения вязкости различных жидкостей.

Как правило, и особенно для органических веществ, вязкость

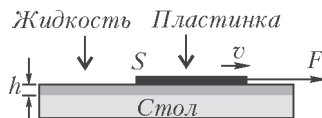


Рис. 78. Опыт для определения вязкости жидкости

Таблица 8

Вязкости различных жидкостей

Жидкость	Вязкость, в пуазах	Жидкость	Вязкость, в пуазах
Ацетон	0,003	Глицерин	15
Бензин	0,006	Мед	100
Вода	0,01	Кетчуп	500
Спирт	0,012	Горчица	700
Ртуть	0,016	Сметана	1000
Молоко	0,03	Сургуч	100000000000
Машинное масло	17		

растет с возрастанием относительной молекулярной массы. Вязкость также увеличивается, когда между частицами жидких суспензий или между макромолекулами возникают связи, приводящие к возникновению пространственных структур. Поэтому вязкость таких жидкостей называют структурной вязкостью, а ее величина зависит от условий течения – обычно она уменьшается с ростом скорости сдвига.

Именно зависимость вязкости краски от скорости сдвига (рис. 79) помогает наносить ее, например, на стену. Когда краску не перемешивают (скорость сдвига равна нулю), ее вязкость

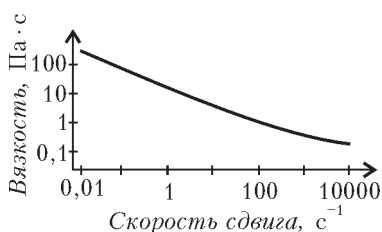


Рис. 79. Зависимость вязкости водорастворимой краски от скорости сдвига

очень высока. 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 меньше 1 с^{-1}), то на кисти остается довольно много краски, так как вязкость ее еще достаточно высока. Коснувшись кистью с

краской стены, мы начинаем интенсивно двигать ею из стороны в сторону (скорость сдвига лежит в интервале 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 «дергать» этот слой краски и начинаем красить соседний участок, вязкость только что нанесенного слоя краски увеличивается. Если бы этого не происходило, то краска, как вода, стекала бы со стены. Таким образом, зависимость вязкости краски от скорости сдвига служит ее важнейшей характеристикой, определяющей технологию крашения. То же относится и к косметическим кремам, изменение вязкости которых в широком диапазоне скоростей сдвига является показателем их качества.

Святой великомученик Януарий. Этот небесный покровитель Неаполя был казнен язычниками в начале IV века. С тех пор его запекшаяся кровь хранится в специальном сосуде. Первые упоминания о сосуде с кровью св. Януария и связанном с этой реликвией чуде относятся к XIV веку. 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 на глазах у всех присутствующих. Три раза в год – в мае, сентябре и декабре – неаполитанцы стекаются в городской собор, чтобы стать свидетелями чуда. В атмосфере, близкой к истерии, архиепископ демонстрирует стеклянный сосуд, содержащий засохшую кровь св. Януария, потом начинает его встряхивать и, наконец, объявляет, что кровь стала жидкой или осталась засохшей (рис.80). Последнее происходило считанные разы и всегда рассматривалось как предзнаменование беды – например, чумы 1527 года (десятки тысяч умерших) или землетрясения в Южной Италии 1980 года (три тысячи жертв).



Рис. 80. В ожидании чуда св. Януария

Если в сосуде действительно находится кровь св. 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 ученые из Итальянской ассоциации изучения паранормальных явлений утверждают, что в чаше, по-видимому, содержится коллоидный раствор гидроокиси железа $\text{FeO}(\text{OH})$, который внешне напоминает кровь, будучи темно-коричневым и почти твердым гелем, но стоит его потрясти, и он разжижается. Такие жидкие смеси называют тиксотропными.

Тиксотропия. Этот термин (от греч. *thixis* – прикосновение и *tropé* – поворот, изменение) описывают способность гелей, паст и жидких суспензий уменьшать вязкость при перемешивании или встряхивании и возвращаться к первоначальной вязкости в состоянии покоя, когда заканчивается механическое воздействие. 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.

Буровые растворы должны быть тиксотропными. При бурении скважины части 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.81). Более вязкий

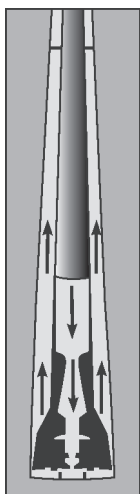


Рис. 81. Движение бурового раствора

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.

Сто лет назад буровой раствор представлял собой смесь глины и воды, и часто, для того чтобы сделать его, 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 соответствовали бы определенным требованиям при различных условиях бурения. Современные буровые растворы – это кровь скважины, без которой современные глубокие скважины не могут существовать.

Циркуляция бурового раствора в скважине иногда прерывается. Это может произойти по ряду причин, в том числе и при плановом поднятии на поверхность колонны бурильных труб для замены долота. При отсутствии циркуляции раствора части породы, отслоившиеся от стенок в процессе бурения, могут оседать на дно шахты скважины и создавать пробки, которые способны вызвать ряд серьезных проблем. Существуют буровые растворы, технологические свойства которых предотвращают образование осадка выбуренной породы. При уменьшении скорости передвижения вязкость этих растворов увеличивается, они превращаются в гель, который способен удерживать частицы во взвешенном состоянии. Когда раствор вновь начинает двигаться, его плотность и вязкость значительно уменьшаются. Таким образом, буровые растворы должны быть тиксотропными.

КАК СМОТРЕТЬ СКВОЗЬ СТЕНУ?

Мы привыкли к тому, что многие тела непрозрачны. Из-за своей низкой энергии фотоны видимого света не могут прорваться внутрь тел и «осветить их изнутри». Кроме того, длины волн видимого света (400–700 нм) гораздо больше промежутков между атомами. Поэтому только используя излучение с очень короткой длиной волны, можно сделать непрозрачные тела прозрачными. Такое излучение было открыто более 110 лет тому назад.

Рентген — первый лауреат Нобелевской премии. В 1895 году немецкий физик Вильгельм Рентген открыл неизвестные ранее лучи (X-лучи), проникающие через непрозрачные преграды. Сообщение Рентгена вызвало огромный интерес, и медики сразу осознали значение рентгеновского излучения (как его теперь называют) для диагностики. На время X-лучи стали сенсацией, о которой растребили по всему миру газеты и журналы. В 1901 году Рентген стал первым лауреатом Нобелевской премии по физике, хотя об истинной природе X-лучей было известно очень мало. При вручении премии было сказано, что «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, рентгеновским лучам обязаны такие великие открытия, как расшифровка структуры молекул гемоглобина, дезоксирибонуклеиновой кислоты (ДНК) и белков, ответственных за фотосинтез (Нобелевские премии 1962 г. и 1988 г.).

«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 распо-

лагаю таким количеством лучей. Но если Вам нетрудно, вышлите мне свою грудную клетку, я найду пулю и отошлю Вам грудную клетку назад».

Что такое X-лучи? Рентгеновская трубка (рис.82) – это стеклянная колба, из которой откачан воздух до давления менее

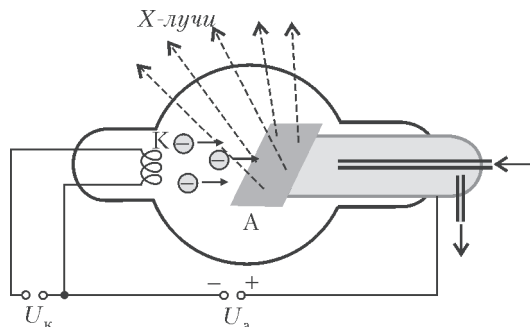


Рис. 82. Схематическое изображение рентгеновской трубки. Стрелки в правой части рисунка показывают течение воды, охлаждающей анод

0,1 Па. В трубке находятся электроды – катод К и анод А, между которыми приложено постоянное напряжение U_a , равное от 1 до 10000 кВ. Электроны, вылетающие из раскаленной нити катода, разгоняются под действием электрического поля и попадают на анод. При этом электрон, столкнувшийся с атомом поверхности анода, может быть либо отклонен его ядром так, как изменяет траекторию кометы притяжение ближайшей планеты (рис.83, слева), либо вышибает один из электронов внутренней оболочки атома, ионизуя его (рис.83, справа).

В первом случае замедление электрона приводит к излучению фотона рентгеновского излучения, длина волны которого может лежать в диапазоне от 0,01 до 10 нм (непрерывный спектр). Интенсивность такого излучения пропорциональна атомному номеру (заряду ядра Z) химического элемента, из которого сделан анод. Чем выше номер элемента, тем сильнее его ядро может затормозить 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 рентгеновских лучей. При этом с ростом напряжения минимальная длина волны рентгеновского фотона уменьшается.

Во втором случае, когда после столкновения с электроном атом ионизуется, место выбитого электрона сразу занимает

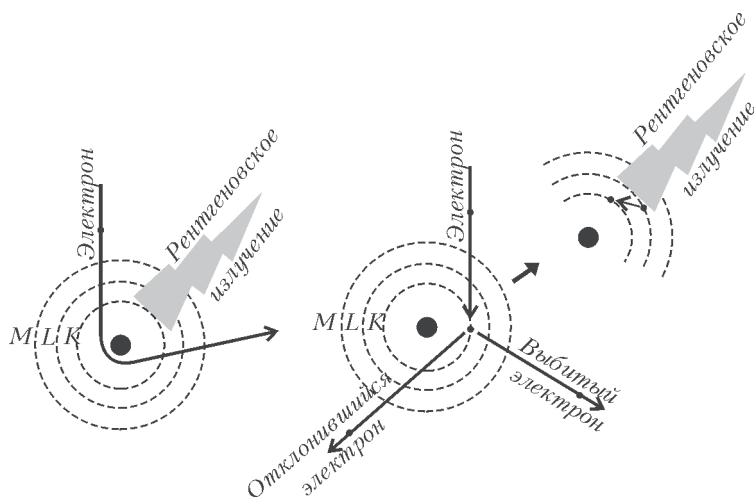


Рис. 83. Два механизма генерации рентгеновского излучения: слева – отклонение электрона ядром атома, справа – ионизация атома с последующей заменой выбитого электрона электроном из более «высокой» оболочки

электрон с более высокой оболочки, а разность потенциальных энергий выделяется в виде энергии 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. Эти длины волн назвали характеристическими, так как они характеризуют материал, из которого сделан анод рентгеновской трубки. Поэтому спектр рентгеновского излучения выглядит как наложение плавной кривой (первый механизм) и пиков, соответствующих характеристическим частотам материала анода (рис.84). Согласно закону Мозли, длины

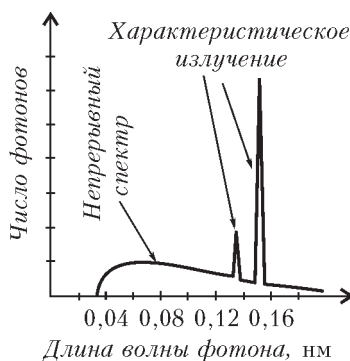


Рис. 84. Спектр рентгеновского излучения медного анода. Пики характеристического излучения соответствуют переходу электронов с M (левый пик) и L (правый) оболочек на место выбитого электрона K оболочки

волн характеристического излучения уменьшаются обратно пропорционально атомному номеру элемента Z .

Из всей мощности, подводимой к рентгеновской трубке, в рентгеновское излучение преобразуется не более 1% , а все остальное превращается в тепло, разогревающее анод. Поэтому приходится использовать систему охлаждения анода 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 частоты рентгеновского излучения, на которых 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, а другими словами их жесткость, зависит от энергии их фотонов – фотоны с меньшей длиной волны проникают глубже. Принято называть излучение с длиной волны больше 0,1 нм мягким, а остальное – жестким. Как следует из таблицы 9, для диагностических целей следует использовать жесткое излучение с длиной волны не более 0,01 нм, иначе рентгеновские лучи не пройдут через тело человека.

Оказалось, что вещество тем больше поглощает рентгеновское излучение, чем больше плотность материала:

$$I = I_0 e^{-\mu x}$$

Таблица 9

Зависимость проникающей способности рентгеновского излучения от его длины волны

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

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 кубу атомного номера Z 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.

Вот почему в теле человека рентгеновские лучи сильнее всего поглощаются в костях, плотность которых относительно высока и в них много атомов кальция ($Z = 20$). При прохождении лучей через кость интенсивность излучения уменьшается вдвое через каждые 1,2 см. Кровь, мышцы, жир и желудочно-кишечный тракт гораздо меньше поглощают рентгеновское излучение (3,5 см уменьшают его вдвое). Ну, а меньше всего задерживает излучение воздух в легких (192 м уменьшают вдвое). Поэтому кости в рентгеновских лучах отбрасывают тень на фотопленку, и в этих местах она остается прозрачной (рис.85). В остальных местах, где лучам удалось засветить пленку, она делается темной. Это дает возможность врачам видеть пациента насквозь.

Если врачу необходимо увидеть желудок, то пациент выпивает раствор солей бария ($Z = 56$), которые сразу же становятся заметными на рентгеновском снимке, так как сильно поглощают излучение. Введение безвредных солей, содержащих атомы с высоким Z , используется также для того, чтобы сделать видимыми для рентгеновских лучей различные кровеносные сосуды человека.

В наше время рентгенологические исследования в большинстве случаев проходят без фотопленки, а прошедшее через пациента излучение делается ви-



Рис. 85. Снимок в X-лучах руки жены В.Рентгена с обручальным кольцом, показанный наряду с другими снимками в сообщении 28 декабря 1895 году об открытии X-лучей

димым с помощью специальных люминофоров. Этот метод, названный флюорографией, позволяет в несколько раз снизить интенсивность излучения при обследованиях и сделать его безопасным.

То что рентгеновское излучение сильнее поглощается более плотными предметами и тяжелыми атомами, делает его незаметным при различных видах досмотра. Так, просвечивание насквозь позволяет определить контуры предметов, сделанных из тяжелых металлов, например оружие или золотые изделия. Однако на просвет определить алмазы, наркотики или взрывчатку невозможно, так они практически не поглощают рентгеновское излучение.

Как рентгеновские лучи видят легкие атомы? Чем меньше заряд ядра атома, тем интенсивнее рентгеновские лучи передают электронам свою энергию. Другими словами, рентгеновское излучение обладает способностью рассеиваться в веществе, состоящем из легких атомов. Тяжелые атомы в большей степени поглощают рентгеновское излучение, чем рассеивают его, так как их электроны очень 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). Этим пользуются для обнаружения взрывчатки или наркотиков, находящихся в металлическом ящике, или людей, спрятавшихся внутри контейнера (рис.86).

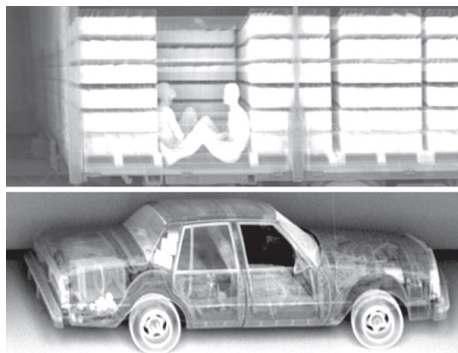


Рис. 86. Регистрация рассеянного рентгеновского излучения позволяет обнаруживать людей внутри металлического контейнера или упаковки с наркотиком, спрятанные в автомобиле

КАК ОКЕАНЫ ГОВОРЯТ ДРУГ С ДРУГОМ: ПОДВОДНАЯ АКУСТИКА

Почти вся информация об окружающем мире поступает к человеку в виде волн – электромагнитных (свет) и звуковых. Высокая скорость электромагнитных волн, возможность распространения в вакууме, а также относительно малый коэффициент их поглощения в воздухе сделали эти волны основным источником информации.

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 сильно поглощает электромагнитные волны, и поэтому пользоваться ими для связи уже невозможно. Например, интенсивность красной составляющей солнечного света с длиной волны 0,77 мкм, проходя в воде 1 м, ослабляется более чем в 10 раз. Причиной того, что электромагнитные волны так интенсивно поглощаются в воде, служит *полярная структура* ее молекул. Три атома, из которых состоит молекула воды, т.е. атом кислорода и два атома водорода, не находятся на одной прямой, а образуют равнобедренный треугольник с углом при вершине 105°, где находится атом кислорода. А так как кислород теснее притягивает к себе электроны, чем водород, то оказывается, что вблизи кислорода их концентрация больше, чем вблизи атомов водорода. Поэтому молекула воды является электрическим диполем с «минусом» около атома кислорода.

Известно, что диполи стараются ориентироваться антипараллельно напряженности внешнего электрического поля, минимизируя потенциальную энергию взаимодействия с ним. А если внешнее поле переменное, то диполи непрерывно поворачиваются «туда-сюда», следуя за изменениями полярности поля. Энергия для поддержания таких крутильных колебаний диполей воды берется из энергии внешнего поля. Крутящиеся под действием внешнего поля молекулы «трутся» о соседей, и большая часть этой энергии превращается в тепло. Поэтому энергия электромагнитных колебаний при распространении в воде быстро поглощается, переходя в тепловую. Способностью воды превращать энергию электромагнитных волн в тепло пользуются все те, у кого дома есть микроволновые (или СВЧ) печи,

частота колебаний в которых составляет около 2,45 ГГц (длина волны 12 см).

Звуководы под водой. Сильное поглощение водой электромагнитных волн делает использование звуковых волн для подводной связи единственным выбором для человека и животных. Изучением распространения звука под водой начали серьезно заниматься во время второй мировой войны. Одновременно в США и в СССР исследовали, как далеко распространяется звуковая волна от подводного взрыва. Оказалось, что, вопреки теоретическим расчетам, звук от взрыва 500-граммовой тротиловой пашки можно зарегистрировать на расстоянии более 3000 км. Объяснить такое малое затухание акустического сигнала можно было, предположив, что звуковые колебания каким-то образом фокусируются под водой и далее с минимальными потерями проходят тысячи километров по некоему «звуководу».

Материалы по подводным звуковым каналам долгое время оставались засекреченными. Были созданы целые системы прибрежных и океанских гидроакустических антенн из подводных микрофонов (гидрофонов) с записывающими устройствами на берегу и на 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 звуков: шумы волн, голоса китов и дельфинов, шумы от извержения подводных вулканов и от косяков рыб. После окончания холодной войны, в конце 1990-х годов, многие работы по гидроакустике рассекретили, и ученые получили возможность более свободно изучать происхождение подводных шумов.

Как происходит фокусировка звука под водой? Обсудим, что заставляет звук распространяться по звуководу. Из оптики известно, что стеклянная линза фокусирует параллельный пучок света потому, что скорость распространения света в линзе меньше, чем в воздухе. Свет может распространяться по световоду на большие расстояния тоже 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, «ленивый» и всегда ищет такой путь, который можно пройти с минимальной скоростью. Но почему скорость звука в воде не постоянна? От чего она зависит?

Звук – это распространение волн сжатий и разрежений через

среду. Дрожащий камертон, опущенный в воду, начинает ритмически перемещать соседние молекулы воды, те – своих соседей и так далее. Так зарождаются все звуковые волны. Чем массивнее частичка среды, тем тяжелее ее сдвинуть и тем меньше будет скорость распространения звука в этой среде. А значит, скорость распространения звука в среде должна быть пропорциональна величине, обратной ее плотности.

Вторая характеристика среды, от которой зависит скорость звука, ее сжимаемость. Представьте себе несколько одинаковых шаров на поверхности стола, расположенных по прямой линии на одном и том же расстоянии друг от друга. Возьмем еще один шар (1) и толкнем его вдоль этой прямой, чтобы он абсолютно упруго ударился в крайний из покоящихся шаров (2). Оба столкнувшихся шара начнут деформироваться, и при этом ранее покоившийся шар 2 будет постепенно ускоряться, а шар 1 – замедляться. В конце концов, когда столкновение закончится, шар 1 остановится, а шар 2 продолжит путь с той же скоростью к шару 3. Очевидно, что задержка при передаче скорости от шара 1 к шару 2 равна 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, характеризуемой модулем Юнга E .

Итак, простые рассуждения привели нас к выводу о том, что скорость звука в воде должна быть пропорциональна ее жесткости и величине, обратной ее плотности. Попробуем найти формулу для скорости звука, используя теорию размерностей. Считая, что размерность жесткости есть $[E] = \text{кг} \cdot \text{с}^{-2} \cdot \text{м}^{-1}$, плотности – $[\rho] = \text{кг} \cdot \text{м}^{-3}$, а скорости звука – $[v] = \text{м} \cdot \text{с}^{-1}$, получаем следующую формулу для скорости звука в воде:

$$v = \alpha \sqrt{\frac{E}{\rho}},$$

где α – постоянный коэффициент, величину которого нельзя вычислить из теории размерностей. Подставляя в эту формулу табличные данные для воды $E = 2,2 \cdot 10^9$ Па и $\rho = 1000$ кг/м³ и считая, что $\alpha = 1$, получаем $v = 1483$ м/с – очень близко к табличной скорости звука в воде для 20 °С. Это значит, что коэффициент α действительно равен единице, и мы вывели верную формулу.

Ну а теперь, чтобы ответить на вопрос, почему существует подводный звуковой канал, вернемся к зависимости скорости звука от глубины. Сначала подумаем, какие свойства морской воды могут изменяться с глубиной. Первое, что приходит в голову, — вода с глубиной становится более холодной. Из рисунка 87 видно, что в тропических широтах температура воды при погружении резко уменьшается от 23°C на поверхности океана до 5°C на глубине 1,5 км. Это резкое изменение температуры называют *термоклин*ом. Его характеристики изменяются в зависимости от сезона, становясь особенно резкими в жаркую погоду. При дальнейшем погружении температура довольно медленно уменьшается, достигая $2 - 3^{\circ}\text{C}$ на глубине 4,5 км, где остается неизменной круглый год.

Известно, что вода при нагревании расширяется, а ее плотность уменьшается. Так как уменьшение плотности должно приводить к росту скорости звука (около 3 м/с при нагревании на 1°C), то это значит, что вблизи поверхности океана скорость звука должна быть максимальной, если на нее не действуют никакие другие факторы (рис.88). Однако с глубиной не только понижается температура морской воды, но и увеличивается ее давление. Увеличение давления делает воду менее сжимаемой (более жесткой), значит, скорость звука с глубиной должна

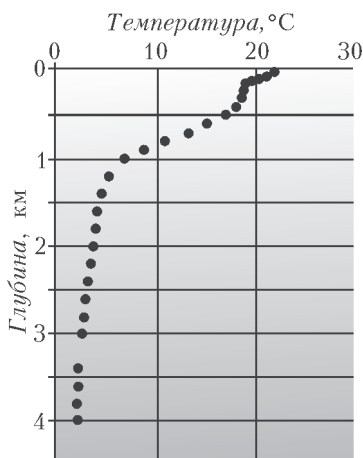


Рис. 87. Зависимость температуры морской воды в тропических широтах от глубины

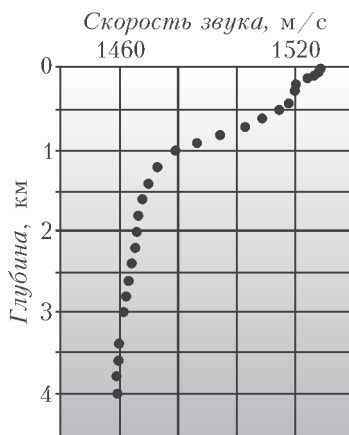


Рис. 88. Зависимость скорости звука в воде от глубины, если учитывать только изменение температуры

увеличиваться. Если бы увеличение давления с глубиной было единственным фактором, изменяющим скорость звука, то она линейно росла бы с глубиной (15 м/с на 1 км погружения) так, как это изображено на рисунке 89.

Учитывая сразу оба фактора – температуру и давление, можно получить реальную зависимость скорости звука от глубины, «перемножив» кривые, показанные на рисунках 88 и 89. Из рисунка 90 видно, что реальная зависимость скорости звука имеет минимум на глубине около 1 км. Это означает, что первоначальное уменьшение скорости звука с глубиной связано с резким уменьшением температуры (термоклин), а последующий рост скорости звука при погружении – с ростом давления.

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 пресных рек, положение минимума скорости зависит также и от этого фактора.

Итак, область с минимальной скоростью звука, находящаяся на глубине около 1 км, и является тем звуководом, который способен передавать звуковые волны на тысячекилометровые расстояния.

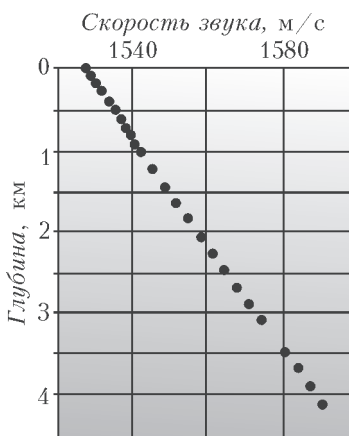


Рис. 89. Изменение скорости звука в воде с глубиной, если учитывать только рост давления с глубиной

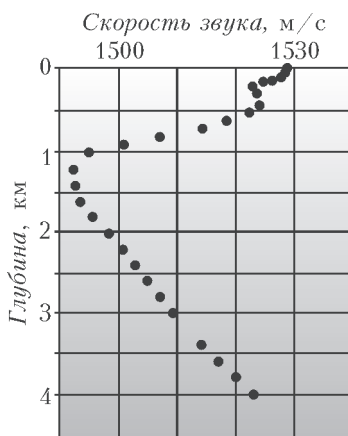


Рис. 90. Реальная зависимость скорости звука от глубины при учете соответствующих изменений температуры и давления

ЗАКОНЫ НЬЮТОНА ДЛЯ ПАНИКУЮЩЕЙ ТОЛПЫ

Паника – это чувство страха, которое, охватывая сначала небольшую группу людей, затем передается остальным, перерастая в неуправляемый процесс. Природа человека такова, что часто в экстренных ситуациях каждый человек ведет себя так же, как и все вокруг. Именно поэтому коллектив людей, обьятых паникой, по существу перестает быть коллективом, теряет его признаки, становясь неуправляемой толпой.

История хранит много примеров того, к каким человеческим трагедиям приводила паника толпы. Одна из них – Ходынская катастрофа, или просто «Ходынка» – произошла на северо-западе Москвы во время народного гулянья 18 мая 1896 года в дни коронации императора Николая II. По традиции, народ, присутствующий при коронации нового царя, всегда одаривали подарками. А в тот раз ходили слухи, что подарки будут очень дорогими. (На самом деле, подарочный набор включал в себя завязанные в платок булку, пряник, колбасу, немного сушеных фруктов и орехов, а также эмалированную – в то время большая диковинка – кружку с императорскими вензелями. С этой кружкой можно было подойти к многочисленным крамам с пивом и медовухой.) Поэтому привлеченная бесплатными гостинцами и зрелищами публика начала стекаться к Ходынскому полю еще с вечера, а к рассвету, когда число страждущих увеличилось до полумиллиона, если не более, прошел слух, что буфетчики начали оделять «своих» и что припасенного на всех не хватит. По свидетельству очевидцев, толпа вдруг вскочила, как один человек, и бросилась вперед, как будто от пожара. Между тем, местность, на которой были выстроены 150 будок с подарками и 10 пивных павильонов, была отделена от страждущих огромным оврагом (3 метра в глубину и 30 в ширину), откуда муниципальные службы обычно брали песок, необходимый для содержания в порядке московских улиц. В ответ на летевшие со всех сторон требования начать раздачу гостинцев растерявшиеся буфетчики принялись швырять узелки в толпу наугад – и тут началось самое страшное. Киоски брали штурмом, задние ряды напирали на средние... Произошла давка, в которой погибли, по официальным данным, 1389 человек и около 1300

получили увечья. По свидетельству А.С.Суворина, кружка из подарочного набора стоила 10 копеек, и на 5 копеек было гостинцев – вот и вся стоимость подарка, за который столько людей заплатили жизнью. Для очистки совести Николай II распорядился выплатить каждой семье погибших по 1000 рублей.

Кстати сказать, и в других странах случалось подобное. Так, в 1867 году, когда в Британии отмечали 50-летие вступления на трон королевы Виктории, в Лондоне при схожих обстоятельствах погибли около 4000 человек – и ничего, придворные церемонии не были нарушены.

Можно ли избежать давки? Конечно, да! Но прежде чем давать конкретные советы, посмотрим, как возникает давка, используя для этого методы физики сложных систем – раздела физики, изучающего системы, состоящие из большого числа объектов, взаимодействие между которыми подчиняется каким-либо определенным законам. Такими объектами могут быть атомы, молекулы или песчинки, образующие дюны, а также, люди, механически взаимодействующие друг с другом в толпе.

Какие силы действуют на человека в толпе. В соответствии со вторым законом Ньютона, для того чтобы предсказать поведение толпы через интервал времени Δt , необходимо знать положение и скорость каждого человека и силы, действующие на него в данный момент t . Другими словами, нам необходимо написать соответствующие уравнения для всех членов толпы, а потом решить эту систему уравнений.

Сначала перенумеруем всех людей в толпе, состоящей из N человек, выберем человека под номером i и рассмотрим силы, действующие на него. Очевидно, что одна из сил, заставляющих человека i двигаться, это горизонтальная проекция силы реакции опоры, т.е. земли, отталкиваясь от которой он и движется в избранном направлении. Обозначим эту силу $\overrightarrow{F_{zi}}$. Наталкиваясь на препятствия, которыми могут быть и остальные люди из толпы, человек i испытывает на себе действие силы сопротивления, которую мы обозначим $\overrightarrow{F_{ci}}$. Таким образом, если допустить, что все люди в толпе имеют одну и ту же массу m , например 80 кг, то уравнение второго закона Ньютона для i -го человека толпы принимает вид

$$m \frac{\Delta v_i}{\Delta t} = \overrightarrow{F_{zi}} + \overrightarrow{F_{ci}},$$

где $\overrightarrow{\Delta v_i}$ – изменение скорости i -го человека, произошедшее за

интервал времени Δt в результате действия сил, стоящих в правой части уравнения.

Теперь займемся каждой из упомянутых сил. Рассмотрим сначала, чем руководствуется каждый из нас, оказавшись в толпе одержимых идти куда-то. Пусть, например, все стремятся выйти из помещения, где начался пожар. Тогда, очевидно, вектор силы $\overline{F_{3i}}$ будет направлен к ближайшей двери, а абсолютная величина F_{3i} будет зависеть от того, насколько человек удовлетворен своей скоростью движения в сторону заветной двери. Иными словами, $\overline{F_{3i}}$ можно считать пропорциональной разности между «желаемой» для данного человека скоростью движения $\overline{v_{0i}}$ и настоящим ее значением $\overline{v_i}$. Это предположение позволяет записать следующее соотношение для $\overline{F_{3i}}$:

$$\overline{F_{3i}} = m \frac{\overline{v_{0i}} - \overline{v_i}}{\tau},$$

где τ – коэффициент пропорциональности, имеющий размерность времени, который сопоставим с интервалом, необходимым человеку для разгона до «желаемой» скорости (пусть, например, $\tau = 0,5$ с). Нетрудно догадаться, что вектор $\overline{v_{0i}}$ всегда направлен в сторону двери, а его абсолютная величина характеризует стремление охваченного паникой человека выбраться из горящего помещения. Каждому человеку кажется, что чем больше будет значение v_{0i} , тем раньше он выберется оттуда. Таким образом, v_{0i} может служить мерой паники в толпе.

После того как с помощью формулы описана сила, влекущая i -го человека к двери, рассмотрим силы его взаимодействия с препятствиями, встречающимися на пути. Очевидно, что даже в условиях паники человек предпочитает не подходить вплотную к впереди идущему, если, конечно, его не толкают в спину сзади. Такое нежелание находиться очень близко к другим людям эквивалентно существованию некой силы отталкивания между людьми, которая возрастает с уменьшением расстояния между ними, аналогично кулоновской силе взаимодействия одноименных зарядов. Для простоты последующих вычислений можно считать, что на i -го человека со стороны j -го человека действует отталкивающая сила, абсолютное значение которой равно

$$F_{ij} = Ae^{\frac{|\overline{z_i} - \overline{z_j}| - D}{B}},$$

где D – поперечный размер человека, пусть $D = 0,6$ м, A и B – постоянные, равные 2000 Н и 0,08 м соответственно, а вертикаль-

ными скобками обозначено абсолютное значение разности векторов, проведенных из начала координат к i -му человеку ($\overline{z_i}$) и к j -му человеку ($\overline{z_j}$), которое равно расстоянию между этими людьми. Так, в соответствии с записанной формулой, коснувшись друг друга люди противостоят отталкивающей силе в 2000 Н, которая при их взаимном отдалении уменьшается в e раз через каждые 8 см.

Как показывает житейский опыт, двигаясь, человек избегает касания не только с другими пешеходами, но и со стенами и прочими ограждениями. Для описания этой характеристики движения i -го человека введем отталкивающую силу, действующую на него со стороны ближайшего участка стены перпендикулярно ее поверхности, и обозначим ее $\overline{F_{cti}}$. Очевидно, что формула для значения абсолютной величины этой силы может иметь вид, аналогичный предыдущей формуле, а именно

$$F_{cti} = Ae^{-\frac{d_i - D/2}{B}},$$

где d_i – кратчайшее расстояние между i -м человеком и ближайшей стеной, A и B – те же, что и для силы F_{ij} .

Силы, «отталкивающие» человека от препятствий, описанные соответствующими формулами, помогают ему избегать столкновений, но не всегда. В тех случаях когда плотность людей и их «желаемая» скорость велики, сумма сил $\overline{F_{ij}}$ и $\overline{F_{cti}}$ не спасает их от столкновений. Кроме того, столкновению людей между собой и со стенами способствуют необходимые иногда повороты на пути к выходу. Поэтому для полного описания сил, действующих во время давки, необходимо ввести силы упругого взаимодействия и трения при столкновении людей между собой и людей со стенами.

Для простоты будем считать, что при столкновении людей между собой и со стеной их можно заменить вертикально стоящими цилиндрами с круговым поперечным сечением диаметром D . Очевидно, что столкновение таких цилиндров, моделирующих людей под номерами i и j , происходит тогда, когда расстояние между их осями становится меньше D . Величину силы упругого взаимодействия, отталкивающей их друг от друга, в соответствии с законом Гука можно описать формулой

$$F_{yij} = k \left(D - \left| \overline{z_i} - \overline{z_j} \right| \right),$$

где k – коэффициент, пропорциональный жесткости человека в поперечном направлении (120000 Н/м). Формула, аналогичная

этой, очевидно, справедлива и для столкновения i -го человека со стеной и имеет следующий вид:

$$F_{ycti} = k(D/2 - d_i),$$

где d_i – минимальное расстояние между осью i -го цилиндра и стеной в области их контакта.

Что касается силы трения $F_{\text{тp}i}$, действующей на i -го человека при столкновении с «чужой» поверхностью, то ее величина будет зависеть, во-первых, от того, с какой скоростью $v_{\text{п}i}$ он будет двигаться вдоль «чужой» поверхности, и, во-вторых, от величины деформации Δ при столкновении, которая заключена в скобки в двух последних формулах. Если эти величины известны, то сила трения при столкновении, действующая в сторону, противоположную скорости, равна

$$\overline{F_{\text{тp}i}} = -b\overline{v_{\text{п}i}}\Delta,$$

где b – коэффициент трения (120000 кг/(м·с)).

Таким образом, сила $\overline{F_{ci}}$, стоящая в правой части уравнения второго закона Ньютона, является суммой сил, описанных полученными выше формулами. При этом если i -й человек одновременно сталкивается с несколькими другими, то соответствующие выражения следует вычислять для всех столкнувшихся людей. Кроме того, для всех необходимо вычислять алгебраическую сумму сил, приложенных к каждому из них в радиальном направлении, так как известно, что если эта величина превысит 3000 Н, то человек может потерять сознание и стать жертвой паники. А всякий, кто теряет сознание в результате давки, перестает двигаться и поэтому становится дополнительным препятствием для толпы на ее пути.

Пора включать компьютер! Читатель уже наверняка устал от формул и коэффициентов, взятых, как он считает, с потолка. Автор частично разделяет такую оценку, обещая больше не испытывать терпение читателя. Искусство моделирования и заключается в том, чтобы вовремя остановиться. Кроме того, очевидно, что полностью описать в терминах физики и математики такие сложные процессы, как поведение человека, вообще невозможно. И все-таки попробуем предсказать движение толпы, используя полученные формулы, хотя наверняка такое описание является весьма приближенным.

Пусть в прямоугольном зале дискотеки размером 20 на 7 метров находятся N человек и в момент времени $t = 0$ внезапно происходит возгорание электроаппаратуры, стоящей в углу зала. В результате возникает паника, и все устремляются к

выходу. Чтобы начать моделировать движение толпы, нам необходимо задать начальные условия – положение людей и скорости их движения в момент времени $t = 0$. Поэтому с помощью компьютера распределим людей по залу так, как это показано на рисунке 91, и для простоты положим, что в момент времени $t = 0$ все люди стояли практически неподвижно и ждали, когда наконец включат музыку, т.е. $v_i = 0$ для $1 \leq i \leq N$. Ну, а теперь начнем писать программу, которая могла бы отслеживать движение каждого человека в толпе.

Программа должна, учитывая расположение и скорости людей в момент времени t , для каждого i -го человека вычислить сумму сил, стоящую в правой части уравнения второго закона Ньютона, а потом найти приращение $\overline{\Delta v_i}$, произошедшее за интервал времени Δt . После этого программа вычисляет новые значения $\overline{v_i}$, соответствующие моменту $t + \Delta t$, и передвигает i -го человека в направлении вектора $\overline{v_i} + \overline{\Delta v_i}$ на расстояние, равное $|\overline{v_i} + \overline{\Delta v_i}| \Delta t$. И все повторяется снова.

Очевидно, что чем меньше будет значение Δt , тем точнее будут наши расчеты. Однако одновременно с увеличением точности расчетов растет время, необходимое компьютеру для решения задачи. Следует заметить, что с какого-то значения Δt , назовем его критическим, дальнейшее его уменьшение уже приводит к едва заметным изменениям. Поэтому Δt берут, например, в два раза меньше критического значения, значительно экономя, таким образом, время для вычислений. Исходя из этих соображений, было выбрано $\Delta t = 0,002$ с, что позволило потратить около 40 минут для моделирования движения толпы, состоящей из 60–70 человек, в течение одной минуты. Как оказалось, одной минуты вполне хватило этой «толпе», чтобы покинуть в панике помещение, правда оставив за собой нескольких «сдавленных» вертикальных цилиндров. Чтобы упростить вычисления, предполагалось, что абсолютное значение «желаемой» скорости v_{0i} у всех людей из толпы одинаково, и поэтому

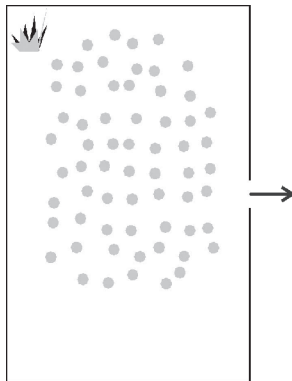


Рис. 91. Распределение людей в прямоугольной комнате размером 20×7 м в начальный момент времени $t = 0$ ($v_0 = 0$). Люди обозначены серыми кружочками диаметром 0,6 м. Стрелкой показан выход через дверь шириной $b = 1,5$ м

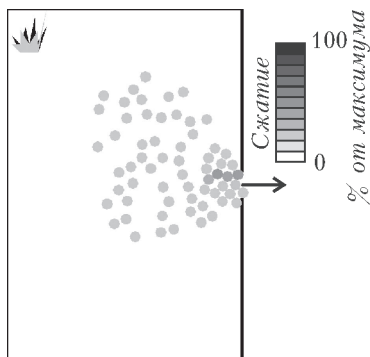


Рис. 92. Полученное в результате моделирования распределение людей в комнате через 4 с после начала паники ($v_0 = 1,1 \text{ м/с}$, $b = 1,5 \text{ м}$). Плотность закрашивания соответствует величине суммарной силы сжатия, приложенной к каждому человеку со стороны окружающих людей и стены, в соответствии со шкалой, показанной здесь же

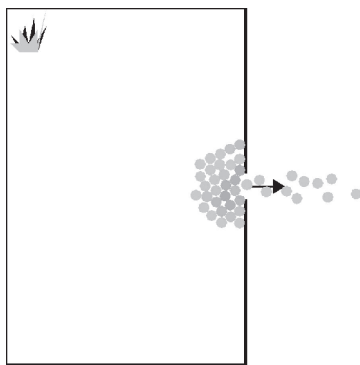


Рис. 93. Распределение людей в комнате через 22 с после начала паники ($v_0 = 1,1 \text{ м/с}$, $b = 1,5 \text{ м}$), когда почти половина из них уже вышли из помещения. Как видно, перед дверью образовалась группа людей, мешающих друг другу выйти (блок)

в дальнейшем оно обозначается как v_0 .

Посмотрим, что получится. Как показывают результаты моделирования (рис. 92), проходит совсем короткий промежуток времени t_1 , всего несколько секунд, до того момента, когда первый человек выскакивает из помещения, и это время, конечно, уменьшается с ростом панических настроений (при увеличении v_0). Например, для начальных условий, изображенных на рисунке 91, время t_1 уменьшается с 7 до 4 с при увеличении v_0 с 0,7 до 1,7 м/с соответственно. Так что для людей, оказавшихся вблизи выхода, подтвердилось известное правило: «чем больше паникуешь, тем быстрее убежишь от неприятностей». Отметим, однако, что несколько человек, следующих за счастливчиками, оказались сжатыми друг другом, что показано на рисунке 92 более интенсивным закрашиванием соответствующих кружочков.

На рисунке 93 изображено положение людей в толпе в момент времени $t_{1/2}$, когда уже половина людей вышли из помещения. Видно, что к этому времени у дверей образовалась почти симметричная толпа, и поэтому человек, оказавшийся в проеме двери, испытывает сжатие с разных сторон.

В таблице 10 приведена зависимость времени выхода первого человека (t_1 , лев. верх),

Таблица 10

	Ширина двери $b = 1,1$ м		Ширина двери $b = 1,3$ м		Ширина двери $b = 1,5$ м		Ширина двери $b = 1,7$ м	
Паника, $v_0 = 0,7$ м/с	7	46	7	46	6	44	6	39
	50	нет	40	нет	29	нет	24	нет
Паника, $v_0 = 1,1$ м/с	5	75	5	86	4	79	4	78
	60	нет	32	нет	22	нет	18	нет
Паника, $v_0 = 1,5$ м/с	4	95	4	>100	4	99	3	93
	блок	нет	33	1	19	нет	15	нет
Паника, $v_0 = 1,7$ м/с	4	>100	4	>100	4	>100	3	>100
	блок	3	27	2	35	2	17	5

половины всех людей ($t_{1/2}$, лев. низ), максимальной силы сжатия у дверей в процентах к допустимой (прав. верх) и количества жертв (прав. низ) от уровня паники (величины скорости v_0) и ширины дверей для начальных условий, изображенных на рисунке 91. Из таблицы следует, что рост скорости v_0 дает очень малый выигрыш для большинства людей в толпе, особенно для маленьких дверей. Так, для двери шириной 1,3 м увеличение v_0 с 1,1 до 1,5 м/с вообще не приводит к уменьшению $t_{1/2}$. Кроме того, как иллюстрируют таблица 10 и рисунок 94, при панике и недостаточной ширине двери давление, сжимающее людей в центре толпы, часто достигает критического значения, после чего очередной «сдавленный» человек становится дополнительным препятствием для толпы, затрудняя ее движение. Поэтому для каждой группы людей, находящейся в данном помещении, существует некое значение v_0 , зависящее от ширины выходных дверей помещения, превышать которое не рекомендуется, если мы хотим избежать человеческой давки.

Как нетрудно догадаться, относительно малый эффект влияния увеличения v_0 на $t_{1/2}$ объясняется тем, что люди, сжимая друг друга, увеличивают силы трения между собой. В результате относительная доля усилий, затраченных на движение в сторону двери, уменьшается, а вместе с этим уменьшается и выигрыш от увеличения v_0 . В этом и заключается основное отличие между движением вязкой (но несжимаемой) жидкости через место сужения и движением толпы через дверь. В первом случае скорость потока жидкости прямо пропорциональна приложенно-

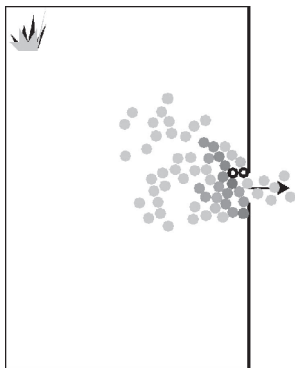


Рис. 94. Распределение людей в комнате через 4 с после начала паники ($v_0 = 1,7 \text{ м/с}$, $b = 1,7 \text{ м}$). Появились первые жертвы (изображены черными пузырьками), суммарная сила сжатия которых превысила допустимый максимум 3000 Н

му давлению. Толпа же по своим механическим свойствам близка к сжимаемой жидкости (например, жидкой резине), у которой вязкость (трение между соседними движущимися слоями) растет с ростом давления, и поэтому увеличение прикладываемого давления приводит к непропорционально меньшему росту скорости потока.

Как видно из таблицы 10, с ростом паники и сужением двери растет количество «сдавленных» людей, большая часть которых находится вблизи дверей. Это и неудивительно. Ведь у двери, находящейся в центре стены, сталкиваются, по крайней мере, три потока людей, стремящихся к выходу, — два вдоль стен и один перпендикулярный проему двери. В итоге давление на каждого человека, достигшего дверей, увеличивается, и если оно достигает критического значения,

то этот человек становится жертвой толпы.

На рисунке 95 показано, как изменяется максимальное давление (сжатие) в толпе по мере того как люди покидают помещение. Видно, что самых высоких значений давление достигает в первые секунды после возникновения паники, когда разогнавшиеся люди, расположенные близко к дверям, сталкиваются друг с другом. Потом, с уменьшением количества людей в толпе, давление постепенно падает, испытывая большие колебания, соответствующие образованию и разрушению «дуги» из людей, не желающих пропускать друг друга (см., например, рисунок 93). Поэтому росту сжатия соответствует временное прекращение выхода людей из помещения (интервалы между 11 и 12 с, а также между 14 и 16 с на рисунке 95).

Очевидно, чтобы уменьшить количество жертв, нужно уменьшить число пересекающихся потоков вблизи дверей, а еще лучше — исключить их пересечение вообще. Самое первое, что приходит в голову, это попросить всех стать в очередь. Конечно, в условиях паники это нереально, но помещение можно спроектировать так, чтобы даже паникующая толпа, подходя к дверям, вынуждена была выстраиваться в очередь.

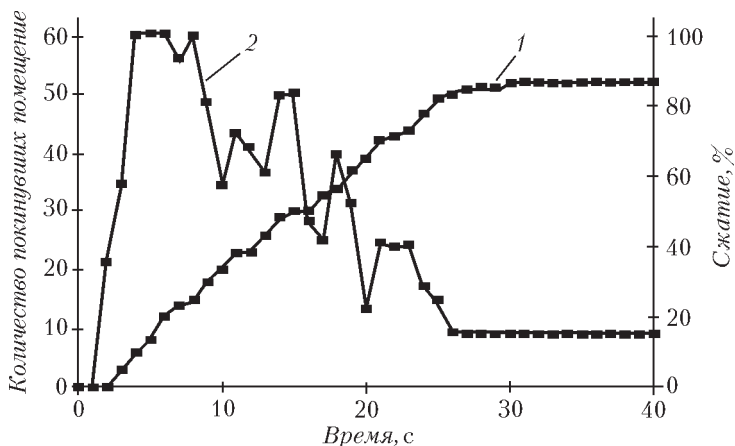


Рис. 95. Зависимость количества людей, покинувших помещение (кривая 1), и максимальной величины сжатия в толпе (кривая 2) от времени, прошедшего после начала паники ($v_0 = 1,7 \text{ м/с}$, $b = 1,7 \text{ м}$, исходное число человек в комнате 63, пять из которых стали жертвами давки)

Выстраиваем толпу в очередь. На рисунке 96 изображено помещение, выходя из которого, люди должны пройти через сужающийся коридор, в результате чего все они у дверей имеют один и тот же вектор «желаемой» скорости $\overline{v_0}$. Иными словами, направляющий коридор, предшествующий дверям, препятствует возникновению встречных людских потоков у дверей. Поэтому разумно предположить, что при тех же начальных условиях толпа выйдет из помещения через сужающийся коридор быстрее и без жертв.

Результаты моделирования бегства толпы из такого помещения показаны на рисунках, которые иллюстрируют различные моменты движения: подход к направляющему коридору (рис.97), выстраивание в очередь и выход первого человека через дверь (рис.98), а также момент, ког-

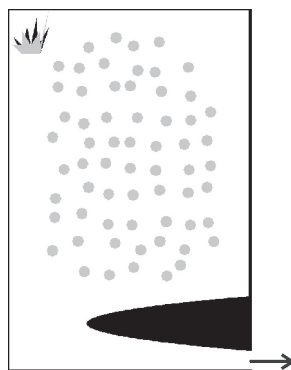


Рис. 96. Помещение тех же размеров, что и на рисунке 91, но с направляющим коридором, предшествующим выходу. Исходное распределение людей то же, что и на рисунке 91, $v_0 = 0$

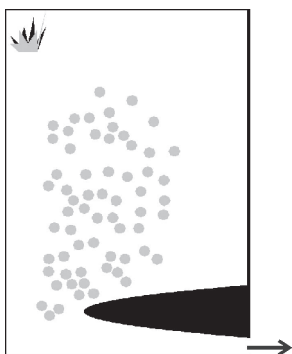


Рис. 97. Распределение людей в комнате через 3 с после начала паники, когда первые люди достигли направляющего коридора ($v_0 = 1,7 \text{ м/с}$, $b = 1,1 \text{ м}$)

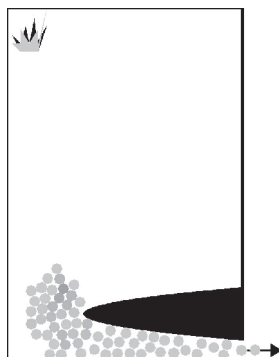


Рис. 98. Распределение людей в комнате через 11 с после начала паники, когда первый человек покидает помещение ($v_0 = 1,7 \text{ м/с}$, $b = 1,1 \text{ м}$)

да половина людей покинули помещение (рис.99). Зависимость времени выхода первого человека (лев. верх), половины всех людей (лев. низ), максимальной силы сжатия у дверей в процентах к допустимой (прав. верх) и количества жертв (прав. низ) от уровня паники и ширины дверей для начальных условий, изображенных на рисунке 96, приведена в таблице 11 (построенной аналогично таблице 10).

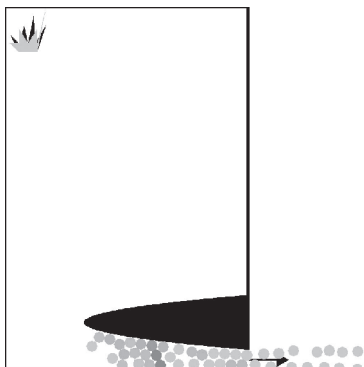


Рис. 99. Распределение людей через 21 с после начала паники, когда почти половина людей покинули помещение ($v_0 = 1,7 \text{ м/с}$, $b = 1,1 \text{ м}$)

Как и следовало ожидать, направляющий коридор значительно уменьшает давление людей друг на друга, делая его меньше критического, что исключает появление жертв давки в том же диапазоне изменения ширины дверей и скорости v_0 . Кроме того, как иллюстрирует таблица 11, направляющий коридор делает зависимость времени $t_{1/2}$ от ширины двери еле заметной. Значит, действительно зависимость $t_{1/2}$ от ширины двери, имевшая

Таблица 11

	Ширина двери $b = 1,1 \text{ м}$		Ширина двери $b = 1,3 \text{ м}$		Ширина двери $b = 1,5 \text{ м}$		Ширина двери $b = 1,7 \text{ м}$	
Паника, $v_0 = 0,7 \text{ м/с}$	24	61	24	21	24	18	23	23
	45	нет	43	нет	42	нет	42	нет
Паника, $v_0 = 1,1 \text{ м/с}$	16	58	16	48	16	58	16	32
	30	нет	28	нет	28	нет	27	нет
Паника, $v_0 = 1,5 \text{ м/с}$	12	64	12	60	12	86	12	44
	23	нет	22	нет	22	нет	21	нет
Паника, $v_0 = 1,7 \text{ м/с}$	11	68	11	77	11	94	11	60
	21	нет	20	нет	21	нет	18	нет

место в том случае, когда дверь была в середине стены (таблица 10), возникает из-за пересечения там нескольких потоков людей.

Интересно, что в тех случаях когда ширина двери не позволяет через нее пройти сразу двоим (1,1 м), направляющий коридор практически устраняет зависимость сил сжатия и от уровня паники (v_0), которая присутствует при более широких дверях. Отсутствие роста сил сжатия при панике в этом случае тоже говорит о том, что траектории движения людей не пересекаются.

Продолжите сами, если вам интересно! Моделируя движение толпы, мы рассмотрели всего два случая – дверь расположена в центре стены или имеется направляющий коридор. При этом всех людей мы сделали одинаковыми. А что будет, например, если в толпе есть дети, «диаметр» и масса которых, как известно, меньше, чем у взрослых? Как зависит количество жертв от разброса параметров людей? Кто страдает в первую очередь?

Мало того что мы в своей модели сделали всех людей одинаковыми, мы лишили их разума, наделив только стремлением – вектором, направленным к двери. На самом деле, каждый человек даже в условиях паники оглядывается по сторонам и, если видит, что движение в направлении выхода затруднено, начинает искать обходные пути. Если ваша программа уже написана, попробуйте включить «оглядывание» в ее текст – полученные данные вас, по-видимому, удивят.

МОЛНИЯ: БОЛЬШЕ ВОПРОСОВ, ЧЕМ ОТВЕТОВ

В каждый момент времени в разных точках Земли сверкают молнии более чем 2000 гроз, каждую секунду около 50 молний ударяют в землю, и в среднем один квадратный километр поражается молнией около шести раз в году. Еще Б.Франклин показал, что молнии, бьющие по земле из грозовых облаков, – это электрические разряды, переносящие на нее отрицательный заряд. При этом каждый из разрядов снабжает Землю несколькими десятками кулонов, а амплитуда тока при ударе молнии составляет от 20 до 100 кА.

Скоростная фотосъемка показала, что разряд молнии длится несколько десятых долей секунды и состоит из нескольких более



Рис. 100. Разряд молнии

коротких (рис.100). Молнии издавна интересуют ученых, но и в наше время об их природе мы знаем лишь немного больше, чем 250 лет тому назад, хотя смогли обнаружить молнии даже на других планетах.

Молния – вечный источник подзарядки электрического поля Земли. С помощью измерительных приборов, установленных на атмосферных зондах, в начале XX века было измерено электрическое поле Земли, на-

пряженность которого у поверхности оказалась равной около 100 В/м, что соответствует суммарному заряду планеты приблизительно 400000 Кл. Переносчиком 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 течет ток порядка $2 - 4$ кА, плотность которого составляет $(1 - 2) \cdot 10^{-12}$ А/м², и выделяется энергия до 1,5 ГВт. И это электрическое поле исчезло бы, если не было бы молний! Получается, что в хорошую погоду электрический конденсатор Земли разряжается, а при грозе – заряжается.

Человек не чувствует электрического поля Земли, так как является хорошим проводником. Поэтому заряд находится и на поверхности человека, локально искажая электрическое поле Земли (рис.101). Под грозовым облаком плотность наведенных на земле положительных зарядов может значительно возрастать, а напряженность электрического поля может достигать 100 кВ/м, т.е. в 1000 раз превышать ее значение в хорошую погоду. В результате во столько же раз увеличивается положительный заряд каждого волоска на голове человека, стоящего под грозовой тучей, и они, отталкиваясь друг от друга, встают дыбом.

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 всегда заряжался отрицательно при трении о шерсть или шелк. Величина заряда и его знак зависят от материалов трущихся тел.

Считается, что тело, до того как его стали тереть о другое, электронейтрально. 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 электронейтральным. 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.

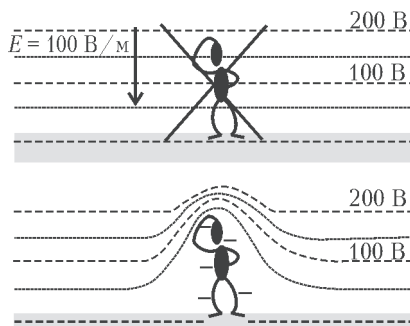


Рис. 101. Эквипотенциальные линии электрического поля Земли без человека и их искажение стоящим человеком

Облако – фабрика по производству электрических зарядов. Грозовое облако – это огромное количество пара, часть которого сконденсировалась 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 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 шустрые мелкие льдинки, двигаясь в верхнюю часть облака, все время сталкиваются с крупными. При каждом таком столкновении происходит электризация, в результате которой крупные льдинки заряжаются отрицательно, а мелкие – положительно. Со временем положительно заряженные мелкие льдинки оказываются в верхней части облака, а отрицательно заряженные крупные – внизу. Другими словами, верхушка грозового облака теперь заряжена 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.102).

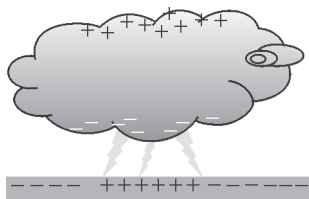


Рис. 102. Отрицательно заряженная нижняя часть облака поляризует поверхность Земли под собой так, что она заряжается положительно, и когда возникают условия для электрического пробоя, происходит разряд молнии

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 грозовом 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 году российский ученый А.Гуревич из Физического института им. П.Н.Лебедева РАН предположил, что своеобразным зажиганием 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, ионизируя молекулы воздуха на пути своего движения и таким образом вызывая лавину электронов, движущихся вместе с ним к земле. Ионизированный канал, созданный этой лавиной электронов, сразу же используется молнией для разряда.

Каждый, кто видел молнию, заметил, что это не ярко светящаяся прямая, соединяющая облако и землю, а ломаная линия. Поэтому проводящий канал для разряда молнии называют ее «ступенчатым лидером». 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. Доказательство для такой интерпретации ступенчатого характера молнии – 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, энергия которого может составлять до 250000 электрон-вольт, что примерно в два раза превышает энергию, используемую при рентгеновском просвечивании 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 молнии. Считается, что грозой на небе руководит Илья-пророк, и нам не дано знать его планы. Однако ученые давно пытались заменить Илью-пророка, создавая проводящий канал между грозовой тучей и землей. Б.Франклин для этого во время грозы запускал воздушный змей, оканчивающийся проволокой и связкой металлических ключей. Этим он вызывал слабые разряды, стекающие вниз по проволоке, и первым доказал, что молния – это отрицательный электрический разряд, стекающий с облаков на землю. Опыты Франклина были чрезвычайно опасными. Один из тех, кто пытался их повторить, русский физик Г.Рихман в 1753 году погиб от удара молнии.

В 1990-х годах ученые научились вызывать молнии, не подвергая опасности свою жизнь. Один из способов вызвать молнию – запустить с земли небольшую ракету прямо в грозовую тучу (рис.103). Вдоль всей траектории ракета ионизирует воздух и создает таким образом проводящий канал между тучей и



Рис. 103. Несколько разрядов молний, вызванных пуском ракеты в грозовую тучу. Самая левая вертикальная линия – след от запущенной ракеты

землей. И если отрицательный заряд нижней части 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 являющаяся двигателем эволюции. В 1953 году биохимики экспериментально показали, что одни из

«кирпичиков» жизни – аминокислоты – могут быть созданы путем пропускания разряда молнии через воду, в которой растворены газы «первобытной» атмосферы Земли (метан, аммиак и водород). Спустя 50 лет эти опыты были повторены и дали те же результаты. Вот почему 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 порядка $10^9 - 10^{10}$ Дж. Большая часть этой энергии тратится на гром, нагрев воздуха, световую вспышку и другие электромагнитные излучения, и только маленькая часть выделяется в том месте, где молния входит в землю. Однако и этой маленькой части вполне достаточно, чтобы вызвать пожар, убить человека или разрушить здание. Молния может разогревать канал, по которому она движется, до 30000°C , что в 5 раз выше, чем температура на поверхности Солнца. Температура внутри молнии гораздо выше температуры плавления песка ($1600-2000^\circ\text{C}$), но расплавится песок или нет, зависит также от длительности молнии, которая может составлять от десятков микросекунд до долей секунды.

Амплитуда тока молнии обычно равна нескольким десяткам килоампер, но иногда может превышать и 100 кА. Лишь самые мощные молнии вызывают рождение фульгуритов – полых цилиндров, сделанных из оплавленного песка (рис.104, 105). Наиболее длинные из раскопанных фульгуритов уходили под землю на глубину более пяти метров.

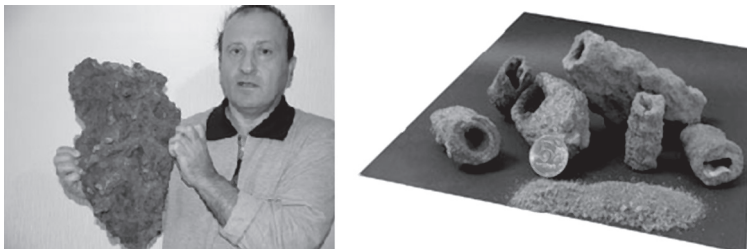


Рис. 104. Крупный фульгурит массой 7,3 кг, найденный автором на окраине Москвы (слева) и его полые цилиндрические фрагменты, образованные из оплавленного песка



Рис.105. Сосна, расположенная на западной окраине Москвы. Под сосной находится огромный фульгурит, поэтому корни сосны уходят в землю на большом расстоянии от ствола. По мнению автора, семечко сосны оказалось внутри полого цилиндра фульгурита, образованного разрядом молнии

Зимой грозы очень редки. Знал об этом и Ф.И.Тютчев, когда 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. Разность температур, от которой зависит возникновение восходящих

потоков воздуха, тем больше, чем выше температура у поверхности Земли, так как на высоте нескольких километров температура не зависит от времени года. Значит, интенсивность восходящих потоков максимальна тоже летом. Поэтому и грозы у нас, в средней полосе, чаще всего бывают летом, а на севере, где и летом холодно, грозы довольно редки.

Почему грозы чаще бывают 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 тяжело 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-то грозы и гремят над сушей чаще (рис.106). Замечено также, что особенно часто

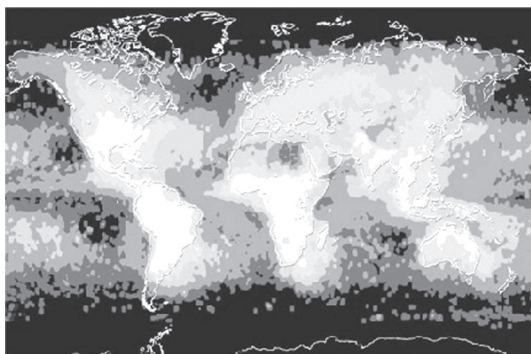


Рис. 106. Распределение частоты гроз по поверхности суши и океанов: самые темные места на карте соответствуют частотам не более 0,1 гроз в год на квадратный километр, а самые светлые – более 50 гроз в год на квадратный километр

молнии бьют по тем местам, где в воздухе особенно 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 считается, что каждый год молнии убивают более тысячи людей по всему миру. По крайней мере, в США, где ведется такая статистика, каждый год от удара

молнии страдают около 1000 человек и более ста из них погибают. Ученые давно пытались защитить людей от этой «кары божьей». Например, изобретатель первого электрического конденсатора (лейденская банка, 1745 г.) голландский физик Питер ван Мушенбрук в статье об электричестве, написанной для знаменитой французской «Энциклопедии», защищал традиционные способы предотвращения молнии – колокольный звон и стрельбу из пушек, которые он считал довольно эффективными.

Б. Франклин, пытаясь защитить капитолий столицы штата Мэриленд, в 1775 году прикрепил к зданию толстый железный стержень, возвышающийся над куполом на несколько метров и соединенный с землей. Ученый отказался патентовать свое изобретение, желая, чтобы оно как можно скорее начало служить людям. Впрочем... громоотвод прикреплялся не только к зданиям (рис.107).

Весть о громоотводе Франклина быстро разнеслась по Европе, и его выбрали во все академии, включая и Российскую. Однако в некоторых странах набожное население встретило это изобретение с возмущением. Сама мысль, 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 году в одном небольшом городке на севере Франции, где горожане потребовали снести железную мачту громоотвода и дело дошло до судебного разбирательства. Молодой адвокат, защищавший громоотвод от нападок мракобесов, 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. Ну а сейчас портрет изобретателя громоотвода – самая желанная репродукция в мире, ведь она украшает известную всем столларовую купюру.



Рис. 107. Зонт с громоотводом. Модель продавалась в XIX веке и пользовалась спросом

Как можно защититься от молнии с помощью струи и лазера? Ученые предложили принципиально новый способ борьбы с молниями – создать громоотвод из... струи жидкости, которой будут стрелять с земли непосредственно в грозовые облака. Громоотводная 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 один сантиметр, а максимальная высота – 300 метров. Когда жидкий громоотвод будет доработан, им оснастят спортивные и детские площадки, где струя будет включаться автоматически, когда напряженность электрического поля станет достаточно высокой, а вероятность удара молнии – максимальной. По струе жидкости с грозового облака будет «стекать» заряд, делая молнию безопасной для окружающих.

Аналогичную защиту от разряда молнии можно сделать и с помощью лазера, луч которого, ионизируя воздух, создаст канал для электрического разряда вдали от скопления людей.

Может ли молния сбить нас с пути? Да, если вы пользуетесь компасом. В известном романе Г.Мелвилла «Моби Дик, или Белый Кит» описан именно такой 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 находитесь внутри дома или самолета? К сожалению, да! Ток грозового разряда может войти в дом, например, по телефонному проводу от рядом стоящего столба. Поэтому при грозе старайтесь не пользоваться обычным телефоном. Считается, что безопаснее говорить по радиотелефону или по мобильному. 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 самолетов, то они, вообще говоря, стараются облетать районы с грозовой активностью. И все-таки в среднем раз в год в каждый из самолетов попадает молния. Но в подавляющем большинстве случаев при попадании молнии ничего не происходит, так как алюминий, покрывающий самолет снаружи, легко пропускает ее вниз к земле.

КАК БЫСТРЕЕ СПУСТИТЬСЯ НА ЛИФТЕ В ЧАС ПИК

Мы всегда куда-то торопимся, спешка уже стала признаком деловитости. И поэтому неудивительно, что наше стремление не опоздать часто сталкивается с аналогичным желанием других людей. Как правило, это происходит утром, когда мы все идем на работу или учебу. Многих из нас, кто живет в многоэтажных домах, спешка охватывает уже на лестничной площадке, когда мы вызываем лифт, чтобы спуститься на первый этаж и выйти из дома. Мы смотрим на часы, понимая, что опять опаздываем, и если подъезд обслуживают два лифта, то, чтобы лифт пришел быстрее, нажимаем обе кнопки.

Итак, казалось бы, мы сделали все, чтобы как можно быстрее спуститься на первый этаж. Но, так ли это?

Забегая вперед, успокою всех тех, кто нажимает обе кнопки днем или поздно вечером. Действительно, вызывая оба лифта сразу не в часы пик, вы ускоряете свой спуск вниз. Однако одновременный вызов всеми двух лифтов в часы пик не только не дает выигрыша, но может даже удлинить ожидание на лестничной площадке. Думаю, что у большинства читателей такое предостережение «нажимающим две кнопки» вызвало улыбку. По их мнению, этого просто не может быть!

Что общего между рыбалкой и вызовом лифта? А вот и простой довод в защиту «нажимающих две кнопки» — нажимая обе кнопки, мы увеличиваем в два раза вероятность того, что хотя бы один лифт появится в течение, скажем, одной минуты после нажатия кнопок. Другими словами, рыбак с двумя удочками скорее поймает свою первую рыбку, чем рыбак, у которого только одна удочка. Но верно ли такое сравнение? Если и есть аналогия между вызовом обоих лифтов и рыбной ловлей, то она довольно необычная. Во-первых, рыбок (лифтов) в пруду должно быть только две, а во-вторых, каждый поймавший рыбку должен отпустить ее обратно в пруд, затратив на это какое-то время (открывание и закрывание дверей). А что если все рыбаки закинут по две удочки (нажмут две кнопки)? Быстрее ли они поймают такую «золотую» рыбку, плывущую вдоль берега пруда туда и обратно?

Наверное, читатель уже достаточно запутался, и пришло время обратиться за помощью к компьютеру. Очевидно, что вопрос «о двух кнопках» не единственный, на который мог бы ответить компьютер. А как, например, зависит время ожидания лифта (ВОЛ) от этажности дома или от того, с какого этажа сделан вызов? Как изменяется ВОЛ при постановке одного из лифтов на плановый ремонт? Когда ВОЛ начинает зависеть от грузоподъемности лифта?..

Устроим все так. Чтобы ответить на некоторые из этих вопросов, попробуем смоделировать события, происходящие при эксплуатации лифта в течение часа (с 8 до 9 утра, например), когда на каждую из 16 лестничных площадок подъезда 17-этажного дома выходят 8 человек и вызывают лифт (один или оба), чтобы спуститься на первый этаж. Будем считать, что если в момент очередного вызова лифт уже двигался (выполняя один из предыдущих вызовов), то новый вызов заносится в память лифтового компьютера, который составляет очередь заказов для последующего выполнения. Каждый из двух лифтов обладает информацией только об очередности своих будущих заказов и ничего не знает о том, где находится и какие заказы выполняет другой лифт. Поэтому один из лифтов может прибыть по вызову на этаж спустя, например, одну секунду после того, как всех людей оттуда забрал другой лифт. Другими словами, наши лифты лишены какого-либо интеллекта.

Рассмотрим две ситуации, в первой из которых вероятность появления человека у лифта будет постоянна, т.е. не будет зависеть от времени в течение данного часа (см. «равномерное» распределение на рисунке 108,а), а во второй она будет максимальна в середине часа, т.е. в 8 ч 30 мин (см. «нормальное» распределение на рисунке 108,б). Зададим также следующие параметры лифта: скорость $v = 0,5$ этаж/с; время на открывание и закрывание дверей $T = 10$ с; грузоподъемность – 4 человека. Для простоты допустим, что в 8:00 оба лифта находятся на первом этаже и ждут вызова.

Теперь попросим компьютер выдать «случайную» последовательность появления людей в лифтовых холлах на всех этажах подъезда, а первого из них – нажать на кнопки вызова лифта. Не принуждая к выбору того или иного лифта, мы лишь будем «следить», одну или обе кнопки нажал «человек», и вычислять время ожидания им лифта, а также остальные параметры его эксплуатации. При этом мы сможем управлять средней величиной отношения случаев, когда были нажаты обе кнопки, к общему числу вызовов лифтов.

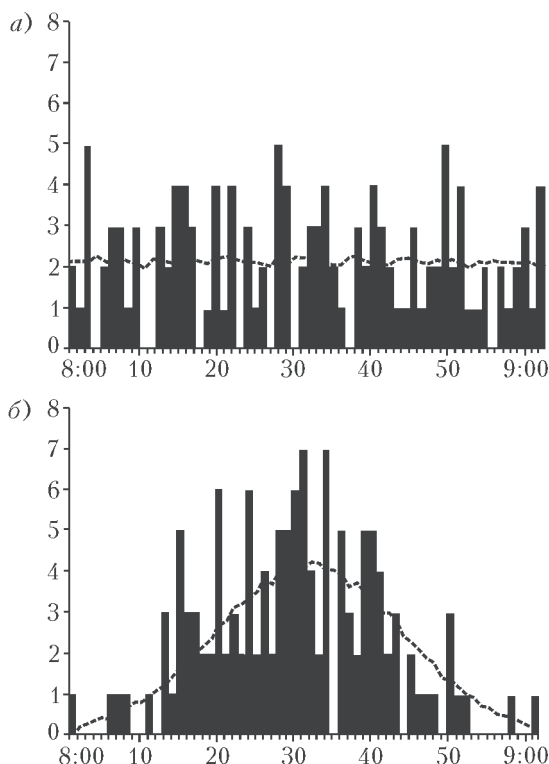


Рис.108. Зависимость количества жильцов (вертикальная ось), выходящих на лифтовые площадки 17-этажного дома каждую минуту, от времени между 8:00 и 9:00 утра (горизонтальная ось, в минутах). Черные столбцы – пример для одного из 365 дней года, пунктирная кривая – усредненное по 365 дням значение. Время выхода жильцов на лифтовые площадки задавалось генератором случайных чисел компьютера, предполагая их равномерное распределение (а) или нормальное распределение (б). С каждого этажа в течение этого часа лифт вызывают 8 человек

Итак, эксплуатация лифтов началась. Для простоты будем считать, что первый этаж имеет номер 0, второй – номер 1 и т.д. (Кстати, такая нумерация принята в некоторых странах Европы и Северной Америки, где первый этаж в нашем понимании называют «земляным».) Тогда очевидно, что ВОЛ человеком, который самым первым вышел из своей квартиры в подъезде, равно отношению номера этажа F , где расположена его квартира, к скорости движения лифта v . Если за время ожидания

лифта на лестничную площадку выйдет еще кто-нибудь, то ему (или ей) повезет, так как соответствующее ВОЛ будет меньше, чем у человека, уже вызвавшего лифт. На посадку уходит T секунд, после чего лифт начинает движение вниз. Приближаясь к каждому этажу, компьютер лифта проверяет, есть ли вызов с данного этажа, и если есть, то останавливается, открывает и закрывает двери, после чего продолжает движение. Достигнув уровня нулевого этажа, все пассажиры лифта выходят, а наш компьютер заносит в память, сколько он проехал этажей, какое потратил время и какова была загрузка во время данного рейса. Кроме этого, для каждого из исполненных вызовов программа вычисляет ВОЛ, хранит в памяти информацию о том, одна или обе кнопки были нажаты, а также с какого этажа был сделан вызов. После этого лифт готов подняться по очередному вызову, и так происходит, пока все вызовы, поступившие в течение часа, не будут исполнены.

Для того чтобы сделать результаты такого моделирования более достоверными, попросим компьютер проследить за этим часом работы двух лифтов в течение 365 дней, каждый раз случайным образом задавая последовательность выхода людей из своих квартир, а полученные данные усреднить.

Жмем только одну кнопку и рассуждаем об очереди.

Сначала посмотрим, сколько времени (в среднем) люди ждут прихода лифта. Как показало моделирование, если жильцы 17-этажного дома вызывают только один из двух лифтов и их выбор равновероятен, то средняя величина ВОЛ составляет 59 и 180 секунд для распределений, изображенных на рисунке 108,а и 108,б соответственно. Очевидно, что трехкратное увеличение ВОЛ при «нормальном» распределении моментов выхода людей к лифту вызвано более чем двукратным увеличением числа людей, вызывающих лифт в минуты, близкие к середине часа, по сравнению с «равномерным» распределением. Отметим, что даже при «равномерном» распределении, когда каждую минуту в среднем 2,1 человека вызывают лифт, почти всегда существует очередь, состоящая из нескольких вызовов. Заметим, что здесь речь идет об очереди вызовов лифта, хранящейся в его компьютере, а не о группах людей, ожидающих вместе на одной лестничной площадке прихода лифта.

Если бы очереди не существовало, а количество этажей в доме было N , то, как легко подсчитать, среднее ВОЛ достигло бы своего минимума и составило

$$\min(\text{ВОЛ}) = \frac{N}{2v} . \quad (1)$$

Для 17-этажного дома $\min(\text{ВОЛ}) = 17$ с (а не 59 с, как на самом деле). Возникновение очереди связано с тем, что среднее время обслуживания одного пассажира, равное $2\min(\text{ВОЛ}) + 2T = 54$ с, почти в два раза превышает среднее время между вызовами лифта (28 с). Существование двух лифтов не спасает положения, так как, нажимая на кнопку, мы не знаем, свободен лифт или нет. Очевидно, что с ростом этажности дома увеличивается и очередь ожидающих вызовов, а вместе с ней – и среднее ВОЛ, если количество жильцов на этаже и характеристики лифта остаются прежними.

Вот как выглядит зависимость времени ожидания лифта от этажности дома при вызове одного из двух лифтов (моменты выхода в лифтовый холл имеют равномерное распределение):

Количество этажей	8	13	17	21
Среднее время ожидания, с	13	29	59	197

Как и следовало ожидать, ВОЛ растет от 13 с для 8-этажного дома до 197 с в 21-этажном доме.

В отсутствие очереди ВОЛ должно линейно зависеть от номера этажа F , с которого делается вызов, так как лифт всегда приходит с этажа «0» и затрачивает на это F/v секунд. Однако реальная зависимость ВОЛ от номера этажа далека от линейной. На рисунке 109 приведены данные компьютерного моделирования, показывающие, что для всех этажей реальная кривая лежит гораздо выше той, которая соответствует отсутствию очереди. Бросается в глаза непропорциональное увеличение ВОЛ для верхних этажей дома – оно достигает почти трех минут для этажа «16». Все это говорит о том, что от очереди лифтовых вызовов страдают жильцы всех этажей, но особенно те, кто живет наверху.

Посмотрим, как будет зависеть ВОЛ от номера этажа в дождливый воскресный день, когда большинство жильцов предпочтут остаться дома и только 25% выйдут из дома. Очевидно, что в этом случае очередь из вызовов должна значительно укоротиться, а зависимость ВОЛ от номера этажа – приблизиться к линейной. Как показало компьютерное моделирование, «воскресная» зависимость (нижняя кривая на рисунке 109) действительно очень близка к зависимости минимального ВОЛ от номера этажа, проходя выше лишь на несколько секунд. Таким образом, даже если в течение часа один из двух лифтов вызывают только 32 человека, их вызовы, тем не менее, могут накладываться друг на друга, образуя очередь, и в результате

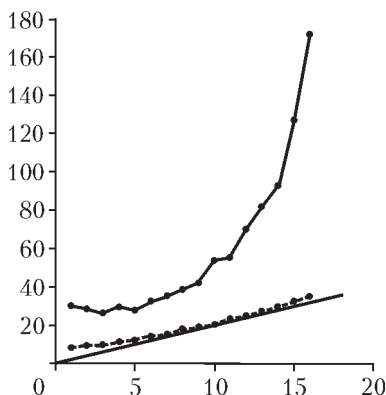


Рис. 109. Зависимость среднего времени ожидания лифта (вертикальная ось, в секундах) от номера этажа (горизонтальная ось) с которого был сделан вызов. Данные получены с помощью компьютерного моделирования и усреднения по 365 дням для 17-этажного дома, предполагая равномерное распределение моментов появления жильцов на лифтовых площадках и вызов ими одного из двух лифтов. Верхняя кривая соответствует случаю, когда количество жильцов, вызывающих лифт с каждого этажа, равно 8, более нижняя кривая – то же, но когда количество жильцов, вызывающих лифт с каждого этажа, уменьшается с 8 до 2 человек. Прямая линия – это минимально возможное время ожидания лифта, соответствующее отсутствию очереди

нако сесть в лифт можно не только в тот, который сам вызвал, но и в опускающийся сверху и проходящий мимо твоего этажа. Здесь-то и становится заметным преимущество тех, кто живет в нижних этажах, – они садятся в лифты, соответствующие более ранним заказам, но сделанным жильцами более высоких этажей. Возможность сесть в проходящий лифт укорачивает очередь лифтового компьютера, но «усиливает» несправедливость для жителей верхних этажей – их вызовы продолжают накапливать-

среднее (за 365 воскресений) ВОЛ становится слегка выше его минимального значения.

Почему наверху приходится дольше ждать лифт. Как иллюстрирует верхняя кривая на рисунке 109, жители верхних этажей нашего дома могут раз в пять дольше ждать лифта, чем жители первых 8–10 этажей. И дело здесь, конечно, не в том, что лифт дольше идет до верхних этажей, чем до нижних, – эта «кинематическая» разница составляет не более 30 секунд. Откуда же берутся еще 110 секунд задержки в обслуживании жильцов верхних этажей? Ответ тот же – очередь. Оказывается, очередь для вызовов, поступивших с верхних этажей, всегда длиннее. И вот почему.

Очевидно, что для «равномерного» распределения вероятность того, что нажавший кнопку вызова через время F/v увидит перед собой открывающиеся дверцы лифта, не зависит от номера этажа F , а равна отношению времени, которое лифт проводит на этаже «0» в ожидании вызовов, к суммарному времени его работы, т.е. к 3600 секундам. Од-

ся в его памяти. Это и является причиной непропорционально большого роста ВОЛ для тех, кто живет близко к крыше, объясняя зависимость, полученную при моделировании (см. верхнюю кривую на рисунке 109).

Попробуем вызывать сразу оба лифта. Ну а теперь попросим всех жильцов нажимать обе кнопки вызова лифта. Как и предполагалось, компьютерное моделирование показывает, что вызов одновременно двух лифтов не ускорит приход на работу или учебу жильцов нашего 17-этажного дома, а среднее ВОЛ при этом увеличится с 59 до 70 секунд. «Ну и что? А вдруг это ошибка программы?» – скажет читатель. Действительно, трудно поверить, что, вызывая оба лифта, мы делаем себе хуже. Но отметим, что выигрыш от нажатия обеих кнопок исчезает только в том случае, когда ВСЕ нажимают обе кнопки. Когда же процент жильцов, вызывающих сразу оба лифта, невысок (от 1 до 5%), то эти жильцы почти в два раза меньше, чем остальные, ждут прихода лифта – см. нижнюю кривую на рисунке 110. Посмотрите теперь на верхнюю кривую на этом рисунке – она показывает, как страдают от того, что кто-то вызывает сразу два лифта, те, кто по-прежнему нажимают только одну кнопку. Видно, что выигрыш тех немногих, кто нажимает обе кнопки, происходит за счет замедления обслуживания всех остальных жильцов дома.

Из рисунка 110 видно, что когда 80% жильцов жмут на обе кнопки, они уже ничего не выигрывают по сравнению с тем случаем, когда все вызывают только один какой-нибудь лифт. Почему же с ростом числа людей, вызывающих оба лифта, их обслуживание может замедляться? Ответ очень прост. Нажимая обе кнопки, мы искусственно увеличиваем длину очереди для жильцов, выходящих к лифтовым холлам позже нас. А если кто-то нажал обе кнопки на другом этаже до того, как это сделали мы, то длина очереди увеличивается и для нас.

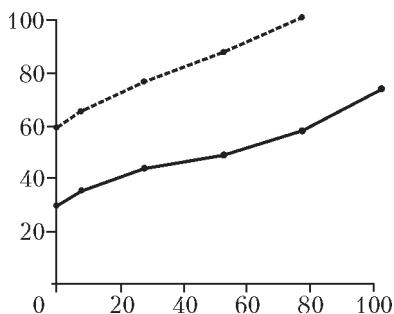


Рис. 110. Зависимость времени ожидания лифта (вертикальная ось, в секундах) от доли жильцов (горизонтальная ось, в %), вызывающих сразу оба лифта. Верхняя кривая – для тех, кто вызывает только один лифт, нижняя – для вызывающих оба лифта

Однако такая несправедливость при нажатии обеих кнопок – когда одни лезут без очереди, а вторые страдают от этого – исчезает, если очереди на обслуживание нет, т.е. при относительно редком появлении жильцов на лестничных площадках. Например, если, спускаясь вниз поздно вечером, все подписчики вечерних газет (25% всех жильцов) будут нажимать на обе кнопки, то они в среднем будут ждать лифта только 13 секунд, по сравнению с 19 секундами в случае вызова одного лифта. По

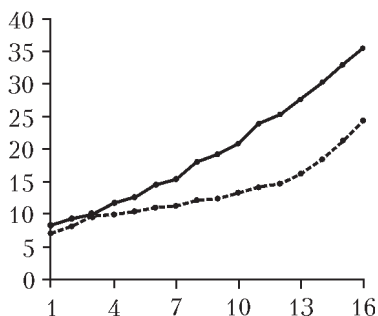


Рис. 111. Зависимость времени ожидания лифта (вертикальная ось, в секундах) от номера этажа (горизонтальная ось), с которого сделан вызов, для «подписчиков вечерних газет», когда количество вызовов в час с каждого этажа сокращается с 8 до 2. Верхняя (более крутая) кривая – при вызове одного из двух лифтов, нижняя – при одновременном вызове обоих лифтов

той же причине в выигрыше от одновременного нажатия двух кнопок будут и жители малоэтажных домов. Моделирование показало, что наибольший выигрыш от нажатия двух кнопок в этих случаях получают жители верхних этажей. Рисунок 111 демонстрирует, что для вызовов с этажа «16» нажатие двух кнопок позволяет сократить ВОЛ с 35 до 24 секунд. В то же время, одновременный вызов двух лифтов с первых четырех этажей практически не дает никакого выигрыша по сравнению с вызовом одного из них. Более того, среднее значение ВОЛ для этажа «16» становится на 8 секунд меньше, казалось бы, минимальной величины ВОЛ, равной $F/v = 32$ с. Неужели компью-

терная программа нас водит за нос? Нет! Просто формула для минимального значения ВОЛ была нами выведена для вызова одного лифта, а для вызова обоих она несправедлива. И вот почему.

При нажатии каждым только одной кнопки лифт на последний этаж может прийти только с этажа «0». Если все нажимают по две кнопки, то где-то ниже этажа «16» обязательно возникнет ситуация, когда пустой лифт придет по вызову, а пассажира, сделавшего вызов, уже не будет, так как он уехал на прибывшем ранее другом лифте. В этом случае лифт останется на данном этаже ждать следующего вызова, и если он будет с этажа «16», то ВОЛ будет ниже $16/v$, так как лифту потребуется меньше

времени, чтобы добраться до этажа «16». Поэтому по воскресеньям нажатие двух кнопок и дает больше преимуществ жильцам верхних этажей.

Но за воскресеньем всегда приходят будни, а с ними – и очереди лифтовых вызовов. Вот как выглядит зависимость ВОЛ при нажатии обеих кнопок от этажности дома:

Количество этажей	8	13	17	21
Среднее время ожидания при вызове обоих лифтов, с	7	22	70	336
Среднее время ожидания при вызове одного из двух лифтов, с	13	29	59	197

Если верить результатам компьютерного моделирования, приведенным в этой таблице, то жильцам многоэтажных домов с количеством этажей 17 и выше не выгодно вызывать два лифта сразу, так как среднее ВОЛ при этом возрастает по сравнению с нажатием только одной кнопки.

Этот результат уже не кажется удивительным, так как несколько раньше мы с читателем пришли к заключению, что вызов обоих лифтов ускоряет обслуживание только тогда, когда средний интервал между выходом жильцов из своих квартир (СИВ) превышает среднее время их обслуживания лифтом (СВО). Для восьмизэтажного дома СИВ равен 64 с, а СВО можно вычислить, прибавив к двум минимальным ВОЛ удвоенное время открывания-закрывания дверей, что дает 36 с. Значительное превышение СИВ над СВО не дает возникнуть очереди в 8-этажном доме и делает выгодным нажатие сразу двух кнопок. В 17-этажном доме СИВ равен 28 с, составляя только половину величины СВО (54 с), что и служит причиной возникновения длинных очередей, делая одновременный вызов обоих лифтов невыгодным.

Жильцам верхних этажей опять не везет. Мы уже знаем, что жильцы верхних

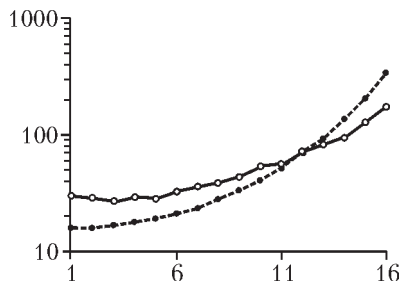


Рис. 112. Зависимость времени ожидания лифта (вертикальная ось, в секундах) от номера этажа (горизонтальная ось), с которого он вызван. Верхняя (более пологая) кривая – все жильцы вызывают один лифт, нижняя – все вызывают оба лифта

этажей вынуждены простаивать в ожидании лифта гораздо дольше, даже если все в подъезде вызывают только один из двух лифтов. Не везет им и в том случае, когда все жмут две кнопки. Как зависит ВОЛ от номера этажа в 17-этажном доме, показано на рисунке 112. Видно, что одновременный вызов двух лифтов позволяет жильцам нижних этажей (вплоть до «11») уменьшить ВОЛ, однако, начиная с этажа «13» то же дает противоположный результат, а для жильцов этажа «16» нажатие двух кнопок приводит к увеличению ВОЛ почти в два раза.

Причиной такой несправедливости по отношению к жителям верхних этажей является то же, что делало несправедливым наше «лифтовое» общество, когда все вызывали только один из двух лифтов, т.е. очередь. Для многих вызовов с нижних этажей она отсутствует или очень невелика, так как можно «пройти без очереди», воспользовавшись проходящим мимо лифтом. Жильцы сверху пройти без очереди не могут и вынуждены отстоять ее всю. Поэтому, когда все начинают давить сразу на обе кнопки, больше всего страдают те, кто сверху.

Подведем итоги. Компьютерное моделирование эксплуатации лифта в 17-этажном доме, где на каждом этаже 8 человек, чтобы спуститься вниз, вызывают лифт в течение часа, убедило нас, что вызывать сразу два лифта выгодно, если это делает небольшая группа людей (1–5%). При этом выигрыш во времени ожидания лифта у этой маленькой группы достигается за счет замедления обслуживания остальных жильцов. Когда число вызывающих сразу два лифта вырастает до 50%, то их выигрыш уменьшается вдвое. Ну а если обе кнопки нажимают все, то время ожидания лифта даже увеличивается, и особенно для жителей верхних этажей. Таким образом, стратегия, приносящая выигрыш небольшой группе людей, перестает быть таковой, когда она охватывает все общество.

КИНЕТИКА СОЦИАЛЬНОГО НЕРАВЕНСТВА

Общество можно представить как пирамиду, на вершине которой находится его элита, состоящая из людей, обладающих властью и большими материальными ценностями, а нижние этажи отведены, как принято говорить, простым людям. Зависть многочисленных жителей нижних этажей к богатству тех немногих, кто оказался на самом верху, часто бывает трудно отличить от любви к справедливости. Так как элита общества расставаться со своими богатствами не собирается, то законное стремление простых людей жить лучше всегда наталкивается на сопротивление жителей верхних этажей этой пирамиды. Таким образом, пирамида нашего общества – вечный повод для революционной борьбы бедных с богатыми, а история человечества – история борьбы за социальное равенство.

Социологи, многим из которых чувство зависти тоже не было чуждо, не раз давали советы, как построить общество, где все были бы равны. Если искать геометрические аналогии, то «общество равных» можно было бы представить себе в виде диска очень большого диаметра с высокой башней в центре, из окон которой выглядывают несколько представителей из «равных», ответственных за поддержание равенства.

К сожалению, история показала, что теория построения «общества равных» не выдерживает испытание практикой хотя бы из-за того, что некоторые люди не хотят быть равными другим и таким своим поведением отвлекают непомерно большие материальные средства общества на поддержание равенства.

Не вдаваясь в дальнейшую полемику о том, каким должно быть современное общество, чтобы каждому в нем жилось хорошо, попытаемся лишь ответить на вопрос, почему торговые отношения между членами общества приводят к тому, что в руках меньшей части общества оказывается большая часть его богатств. Но сначала посмотрим, какие существуют оценки социального неравенства.

Парето пересчитывает чужие богатства. Первым, кто описал математической формулой социальное неравенство, был итальянский экономист Вильфредо Парето. В 1896 году он публикует «Курс политической экономии», где собраны статис-

тические данные о распределении доходов в различных странах. Анализируя их, Парето приходит к заключению, что во все времена (с XVI по XIX в.) и во всех странах распределение доходов можно описать следующей формулой, которая с тех пор носит его имя:

$$\log N = \log a - b \log x ,$$

где N – число людей, имеющих доход больше x , а a и b – постоянные, характерные для данной страны и времени, при этом b составляет величину около 1,5.

Однако в 30-е годы прошлого века выяснилось, что Парето изучал статистику доходов только богатых и очень богатых людей того времени, в то время как статистика людей с малыми и средними доходами была просто никому не известна. Когда же стали анализировать распределение доходов «простых» людей, то оказалось, что эта зависимость очень близка к экспоненциальной, а соответствующая формула Парето принимает вид

$$N(x) = \frac{1}{M} e^{-\frac{x}{M}} dx ,$$

где $N(x)$ – относительная доля людей, обладающих состоянием (в денежном выражении) больше x , но меньше $x + dx$, а M – средний доход «простых» людей.

Только в конце 90-х годов прошлого века физики обратили внимание на то, что формула, описывающая распределение доходов в обществе, очень похожа на распределение Больцмана–Гиббса – Максвелла, которое позволяет оценить относительную долю f молекул газа, имеющего температуру T , механическая энергия которых находится в пределах $E \pm dE/2$:

$$f = \frac{e^{-\frac{E}{kT}}}{kT} dE ,$$

где k – постоянная Больцмана.

Что же общего между распределением механической энергии среди молекул газа и распределением доходов в обществе? Оказалось, что между этими, казалось бы, далекими друг от друга процессами действительно много общего. А именно, в обоих случаях соблюдаются законы сохранения. При столкновении двух молекул газа их общая механическая энергия не изменяется, а может лишь переходить от одной молекулы к другой. Аналогичный закон действует и при «столкновении» продавца и покупателя товаров или услуг. После совершения

сделки состояние одного из них (покупателя или продавца) становится больше, а другого – на столько же меньше, хотя они могут и не догадываться об этом, так как точную цену товара или услуги определить невозможно. Закон сохранения суммарного богатства действует также при обмане или грабеже – богатство лишь переходит от одного человека к другому.

Объясняем компьютеру, как торговать. Возможно, многим такая аналогия между обществом и газом все же кажется недостаточной. Для того чтобы объяснить экспоненциальный характер распределения богатства в обществе, смоделируем, как торговля между членами общества (честная и нечестная) перераспределяет богатство внутри него.

Пусть наша модель общества состоит из 10000 граждан. Конечно, чем больше граждан в обществе, тем лучше для модели, но увеличение размеров общества, например, до 100000 увеличило бы время вычислений одной задачи на компьютере автора до 2 часов и сделало бы написание статьи весьма проблематичным. С другой стороны, если бы результаты моделирования зависели от размеров общества в диапазоне от 10000 до 100000, то эту зависимость можно было бы увидеть при увеличении численности от 1000 до 10000, но такой зависимости обнаружено не было. Таким образом, 10000 человек выглядят вполне разумной и удобной величиной для моделирования.

Чтобы начать торговаться (продавать и покупать), члены общества должны иметь какой-то стартовый капитал и общие правила торговли. Поэтому раздадим всем гражданам по состоянию, эквивалентному 100 рублям, и введем следующие правила торговли:

А) раз в день каждого гражданина оповещают о том, с кем ему сегодня встречаться для торговли, этот список генерируется компьютером и является случайным;

Б) когда происходит запланированная встреча продавца и покупателя, компьютер случайным образом определяет того, кто получает выгоду от торговли, и ее размер; соответственно, богатство неудачника уменьшается на ту же величину;

В) выгода от торговли может быть

- В1 – постоянной величиной, как например, в некоторых видах лотереи или случайных сбоях компьютера кассового аппарата,

- В2 – случайно определяемой долей богатства неудачника,

- В3 – случайно определяемой долей суммарного богатства участников сделки;

Г) в тех случаях когда государство собирает налог со всех, кто

получил выгоду во время торговли, оно распределяет его поровну среди всех членов общества.

Владеющим навыками программирования будет несложно написать программу, которая «следила» бы за обществом, описанным выше, и за тем, как меняется благосостояние отдельных его граждан. Главное – это выбрать язык программирования, предназначенный для работы с большими массивами переменных. Иначе вы будете тратить часы для получения лишь одного распределения, и можете потерять интерес к данной проблеме. Все приведенные в статье данные были получены, используя программирование на языке IDL (версия 5.5), разработанном компанией Research Systems (www.ResearchSystems.com).

Рассмотрим сначала такой вид торговли (B1), когда каждый день продавец и покупатель случайно обманывают друг друга, ничего не подозревая об этом. Это может происходить, например, из-за неисправного кассового аппарата, который, печатая чек, случайно уменьшает или увеличивает цену на 1 рубль. Назовем такое общество «B1», всем его членам дадим по 100 рублей и включим компьютер.

Следим за движением денег в обществе «B1». На рисунке 113 показано распределение богатств среди 10000 членов общества «B1» на следующий день после начала торговли;

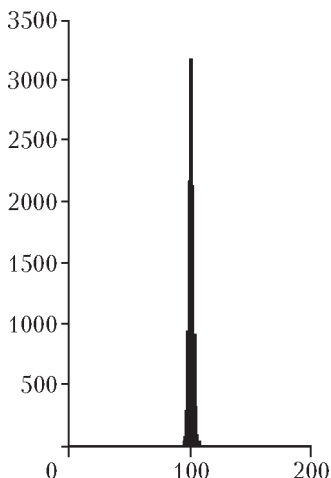


Рис.113. Распределение денег в обществе «B1» на следующий день после начала торговли с использованием сломанного кассового аппарата

здесь по оси ординат отложено количество членов общества, обладающих богатством, обозначенным по оси абсцисс в рублях.

Видно, что несколько тысяч членов общества увеличили или уменьшили свое состояние на один, два или даже три рубля. Приблизительно треть всех членов общества, похоже, вообще не участвовала в торговле, так как в случайной выборке компьютера их номеров не оказалось, а другим пришлось поторговаться с соседями по обществу два или даже три раза. Однако следующие случайные выборки, очевидно, скомпенсируют этот «недочет», и, скажем, за год все члены общества сходят на импровизированный рынок по 364–365 раз.

На рисунке 114 показано, как изменилось распределение богатства через 100 дней (или приблизительно через 3 месяца) пользования испорченным кассовым аппаратом. Общество «В1» слегка расслоилось, и богатство нескольких самых удачливых его членов (150 рублей) уже в три раза превышает состояние его самых бедных граждан (50 рублей). Заметим, однако, что пик графика, или гистограмма, как и на рисунке 113, находится на отметке 100 рублей, график по-прежнему остался симметричным и лишь расплылся по ширине и, соответственно, уменьшился по высоте. Иными словами, 100 рублей и через 3 месяца остались наиболее вероятной величиной состояния в обществе, а количество обедневших (площадь гистограммы слева от 100 рублей) по-прежнему равно количеству обогатившихся (площадь гистограммы справа от 100 рублей).

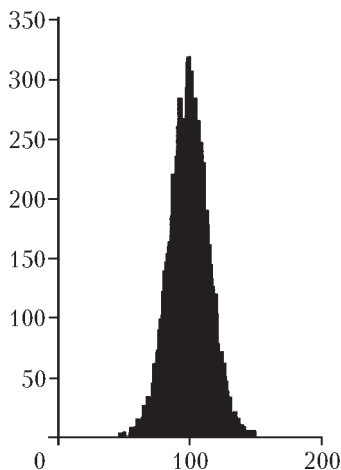


Рис. 114. Распределение денег в обществе «В1» через 100 дней после начала торговли с использованием сломанного кассового аппарата

В обществе «В1» появляются нищие. Гистограмма, иллюстрирующая распределение состояний в обществе «В1» через 3 года торговли (1000 дней) с неисправным кассовым аппаратом, показана на рисунке 115. Как видно, за это время расслоение в обществе стало еще более заметным, и в нем даже появились граждане (их около 15), не имеющие никаких средств. Однако они могут принимать участие в актах торговли, надеясь на ошибку кассового аппарата и зачисление на их счет 1 рубля. Но по-прежнему наиболее вероятным состоянием члена общества «В1» остается богатство в 100 рублей, и соответствующий график выглядит таким же симметричным.

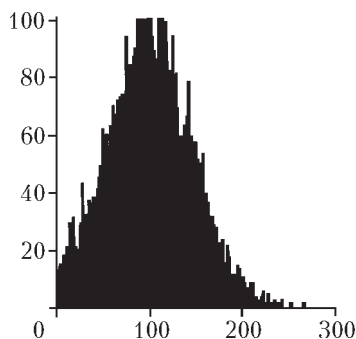


Рис. 115. Распределение денег в обществе «В1» через 1000 дней

Со временем количество полностью разоренных продолжает

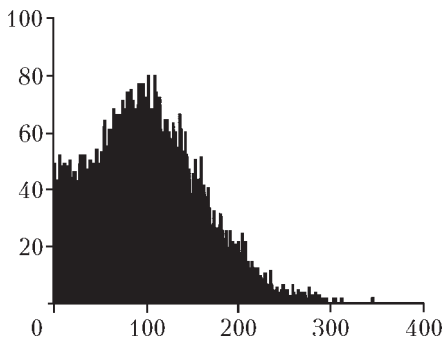


Рис.116. Распределение денег в обществе «B1» через 2000 дней

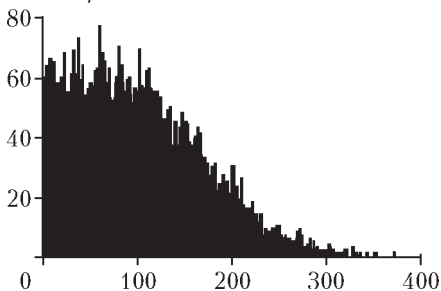


Рис.117. Распределение денег в обществе «B1» через 3000 дней

в обществе «B1» через 20000 дней (или 55 лет) после начала торговли с использованием сломанных кассовых аппаратов (рис.118). Отметим сначала, что это распределение практически не отличается от распределений, полученных после 5000 или 10000 дней. Поэтому можно утверждать, что распределения, соответствующие 100000 дням или даже одному миллиону дней, тоже не будут отличаться от показанной на рисунке 118 гистограммы.

Таким образом, торговые отношения в обществе, где кассовые аппараты барахлят, приводят к такому перераспределению богатств в нем, что гистограмма становится похожей на экспоненту (см. белую кривую на рисунке 118). Заметим, что стремление общества к экспоненциальному распределению доходов не зависит от начальных условий. Автор моделировал жизнь таких торговых обществ при самых различных начальных ситуациях и правилах торговли, а именно:

- при равномерном распределении богатств перед началом торговли, т.е. когда доля людей, имеющих богатство x , не

увеличиваться, и через 2000 дней (или через 5,5 лет) после начала жизни общества «B1» оно уже составляет более 40 человек (рис.116). Однако гистограмма все еще имеет различимый пик на отметке 100 рублей.

Через 3000 дней, как показывает гистограмма на рисунке 117, количество полностью разоренных членов общества «B1» уже близко к 60, а распределение не имеет отчетливого максимума. Кроме того, гистограмма уже не выглядит симметричной и представляет собой монотонно убывающую функцию.

Прошло 55 лет. Ну а теперь попросим компьютер построить распределение богатств в обществе

зависит от его величины;

- при искусственном делении всего общества перед началом торговли на несколько подобществ, внутри которых доходы одинаковы;

- при ситуации В2, когда выигрыш может составлять случайную долю состояний граждан;

- при вмешательстве государства, когда оно облагает налогом все торговые прибыли.

Перед тем как пытаться объяснить это стремление к экспоненте, посмотрим еще раз на рисунки 113–118. Видно, что в течение первой тысячи дней случайный обмен рублями между гражданами приводит к расплыванию (размыванию) первоначального пика распределения, но его максимум остается на прежнем месте. Однако уже после 2000 дней распределение богатств своим левым (нищим) краем наталкивается на вертикальную ось, к которой начинают «прилипать» точки. В результате количество людей с малым состоянием начинает непропорционально расти, и распределение становится экспоненциальным. Попробуем доказать этот факт теоретически.

Для тех, кому хочется вывести «общественную» формулу распределения Больцмана. Через t дней жизни общества разобьем всех граждан на группы в соответствии с количеством денег, которыми они обладают. Группу «0» составят неудачники, которые в данный момент игры оказались разоренными и вообще не имеют никаких денег. В группу «1» отнесем всех тех, у кого есть только по одному рублю, в группу «2» – тех, кто обладает только двумя рублями, и т.д. Обозначим $P(m, t)$ количество граждан, принадлежащих после t дней к группе m , т.е. обладающих m рублями.

Попробуем описать, как должна измениться величина $P(m, t)$ за один прошедший день, а потом найдем уравнение для предельной функции – функции, к которой стремится $P(m, t)$ при увеличении числа дней t . Разделив $P(m, t)$ на общее количество граждан N , получим относительную долю этих граждан, или

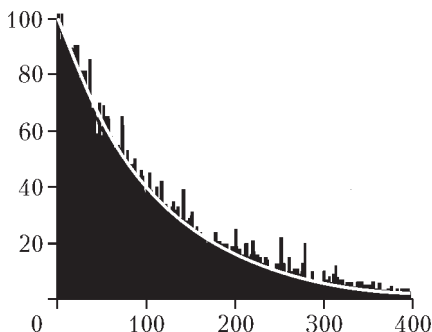


Рис.118. Распределение денег в обществе «В1» через 20000 дней после начала торговли с использованием сложного кассового аппарата. Белая линия соответствует экспоненциальной кривой

вероятность $p(m, t)$ найти среди граждан тех, кто имеет ровно m рублей через t дней торговли. После следующего, $(t + 1)$ -го, дня $p(m, t)$ может измениться, так как некоторые граждане группы « m » могут:

- одарить других граждан одним рублем и соответственно перейти в группу « $m - 1$ » (1);
- получить в подарок от других один рубль и соответственно перейти в группу « $m + 1$ » (2).

Кроме того, члены соседних групп через один день могут стать членами группы « m », если:

- члены группы « $m - 1$ » увеличат свое состояние на 1 рубль (3);
- члены группы « $m + 1$ » уменьшат его на столько же (4).

Очевидно, что в случаях (1) и (2) численность группы « m » уменьшается, а в случаях (3) и (4) – увеличивается. Легко догадаться, что механизмы (1) и (3) перестают действовать для тех, кто окончательно разорен (группа «0»). Это и служит причиной «прилипания» точек к вертикальной оси, на что мы обратили внимание, рассматривая результаты моделирования, полученные с помощью ЭВМ.

Из теории вероятностей следует, что для граждан группы « m » вероятность получить один рубль в подарок от граждан группы « k » ($k > 0$) равна произведению вероятностей $p(m, t)$ и $p(k, t)$. Поэтому изменение $p(m, t)$, происходящее в силу причины (2), можно записать в виде

$$d_2 p(m, t) = -p(m, t) \sum_1^{\infty} p(k, t).$$

Те же соображения позволяют записать изменение $p(m, t)$, происходящее в силу причины (1), как

$$d_1 p(m, t) = -p(m, t) \sum_0^{\infty} p(k, t).$$

Отметим, что $d_2 p(m, t)$ отличается от $d_1 p(m, t)$ только одним слагаемым, так как рубль в подарок нельзя получить от членов группы «0».

Аналогичные допущения дают возможность вычислить $d_3 p(m, t)$ и $d_4 p(m, t)$:

$$d_3 p(m, t) = p(m - 1, t) \sum_1^{\infty} p(k, t),$$

$$d_4 p(m, t) = p(m + 1, t) \sum_0^{\infty} p(k, t).$$

Суммируя все четыре изменения вероятности $p(m, t)$, а также учитывая, что

$$\sum_0^{\infty} p(k, t) = 1 \text{ и } \sum_1^{\infty} p(k, t) = 1 - p(0, t),$$

получаем следующее выражение:

$$\begin{aligned} p(m, t+1) - p(m, t) = \\ = (p(m+1, t) - p(m, t)) - (p(m, t) - p(m-1, t)) + \\ + p(0, t)(p(m, t) - p(m-1, t)). \end{aligned}$$

Моделирование на ЭВМ показывает, что со временем распределение $p(m, t)$ стремится к своей предельной функции $p(m, \infty)$. Эта функция не зависит от начальных условий, а зависит только от количества граждан и суммы розданных им денег. Когда $p(m, t)$ будет приближаться к своему пределу, она будет очень мало изменяться со временем, поэтому левую часть последнего равенства можно приравнять к нулю, что дает следующее уравнение для нахождения $p(m, \infty)$:

$$\begin{aligned} (p(m+1, \infty) - p(m, \infty)) - (p(m, \infty) - p(m-1, \infty)) + \\ + p(0, \infty)(p(m, \infty) - p(m-1, \infty)) = 0. \end{aligned}$$

Это уравнение имеет такое решение:

$$p(m, \infty) = \frac{1}{M} e^{-\frac{m}{M}},$$

где M – средняя величина состояния в обществе.

«Температура» обществ до и после их слияния. Итак, мы показали, что в обществе, где торговые сделки между гражданами сопровождаются случайным выигрышем в 1 рубль для одного и таким же проигрышем для другого, распределение граждан по их состоянию всегда стремится к экспоненциальному и не зависит от того, каким оно было вначале. Другими словами, одни обязательно теряют деньги во время таких торговых операций, ну а другие, соответственно, богатеют. Сравнение распределения Больцмана с последней формулой показывает, что роль «температуры» в распределении состояний в обществе играет средняя величина состояния M . Поэтому чем выше будет средний достаток в обществе, тем большая часть людей в нем будет иметь состояние больше чем m .

А теперь допустим, что два общества «В1», в каждом из которых доходы распределены в соответствии с полученной

формулой, объединились (как это произошло, например, с Западной и Восточной Германиями в 1990 году или как это происходит со странами Европейского Союза сейчас). Очевидно, что через некоторое время сломанные кассовые аппараты сделают свое «черное» дело, в новом обществе установится равновесие и распределение состояний его граждан опять станет экспоненциальным. Нетрудно догадаться, что величина M , равная среднему состоянию граждан нового общества, или его «температуре», будет равна

$$M = \frac{M_1 N_1 + M_2 N_2}{N_1 + N_2},$$

где M_1, M_2 и N_1, N_2 – средний достаток и число граждан в первом и втором обществах соответственно до их объединения. Видно, что величина M лежит где-то между M_1 и M_2 , а близость ее к последней зависит от отношения N_1/N_2 .

Посмотрим теперь на последнюю формулу с позиций термодинамики, где граждане общества эквивалентны сталкивающимся молекулам газа. Тогда M можно заменить на kT , а N в термодинамическом варианте будет соответствовать плотности «молекул-граждан», и новая формула примет вид

$$(N_1 + N_2)kT = N_1 kT_1 + N_2 kT_2.$$

Так как NkT численно равно давлению идеального газа, то правая часть этой формулы это сумма «парциальных давлений» обществ 1 и 2 до их объединения, а левая – «давление» суммарного общества после того как процесс объединения завершился. Отметим, что, поскольку суммарное богатство (в термодинамике – энергия) общества сохраняется, то процесс объединения двух «газовых» обществ следует считать адиабатическим. Таким образом, слияние двух обществ с различными средними доходами аналогичен, с термодинамической точки зрения, адиабатическому процессу слияния двух газов, имеющих разные температуры.

Равновероятность обогащения и разорения. Стабильность общества. Известно, что шары при упругом столкновении обмениваются энергиями, хотя их суммарная энергия и импульс остаются постоянными. При этом, вообще говоря, нет каких-либо ограничений на величину энергии, передаваемой при столкновении. Например, теоретически при столкновении с покоящимся шаром вся энергия переходит к нему, а ранее двигавшийся шар останавливается. В остальных случаях доля суммарной энергии, меняющая хозяина, может составлять от 0 до 100% и очень

сложным образом зависит от геометрических характеристик столкновения и принятых допущений. Так или иначе, мы вправе считать, что и при столкновении молекул газа между собой нет каких-либо ограничений на величину энергии, случайно переходящей от одной молекулы к другой. Другими словами, процесс обмена энергиями между молекулами можно считать симметричным – уменьшение энергии при столкновении так же вероятно, как и ее увеличение. Именно равновероятность получить и потерять энергию при столкновении приводит к тому, что энергия среди молекул газа распределяется по закону Больцмана.

То же самое относится и к обществу, где граждане, сталкиваясь друг с другом, теряют часть своего или приобретают случайную долю чужого состояния.

Хотели, как лучше... Очевидно, что практически невозможно поставить эксперимент над газом, ограничивая обмен энергиями между его молекулами. С людьми проще – достаточно издать закон. Ну скажем, попросим всех соблюдать закон «для защиты от недобросовестных торговцев», сокращенно ЗНТ. В соответствии с этим законом, выгода от торговой сделки между двумя людьми не должна превышать минимального состояния двух торгующих до сделки (см. общество «В2»). Иными словами, если встречаются торговцы с состояниями 50 и 150 рублей, то выигрышем одного и проигрышем другого может быть сумма, не превышающая 50 рублей. Казалось бы, закон ЗНТ – вполне разумный закон, защищающий бедняка от полного разорения. К сожалению, этот закон, как и многие другие законы, сотворенные людьми, приводит к противоположному результату. И вот почему.

Закон ЗНТ нарушает симметрию вероятностного обогащения, и если кто-нибудь случайно лишился большей части своего состояния, то ему уже очень тяжело будет выбраться, так как закон ограничивает его возможный выигрыш величиной его же состояния. А если ты полностью разорен, то в соответствии с этим же законом тебе уже не на что рассчитывать. Одним словом, закон ЗНТ приводит к прогрессирующему расслоению общества.

На рисунке 119 показано, как происходит расслоение общества «В2» со временем, отложенным по оси абсцисс в днях, после начала действия закона ЗНТ. Жирная кривая на верхнем рисунке показывает, как постепенно увеличивается количество граждан (в процентах к общему их числу), у которых состояние уменьшилось по сравнению с первоначальным. Тонкая кривая на том же рисунке иллюстрирует, как падает со временем относительное число разбогатевших граждан общества «В2». Нижний

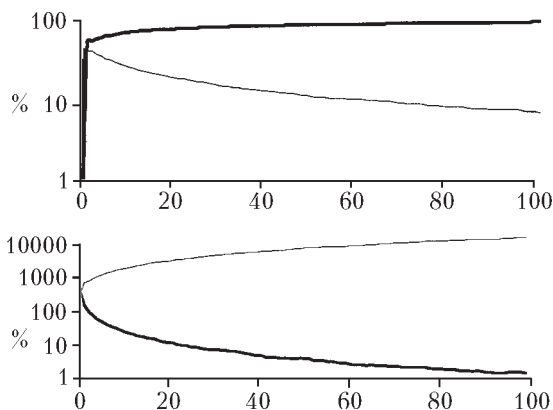


Рис.119. Расслоение общества «В2» со временем, отложенным по оси абсцисс в днях после начала действия закона ЗНТ. Жирная кривая относится к беднеющим гражданам, а тонкая кривая – к богатеющим гражданам

рисунок показывает, что со временем среднее состояние разорившихся граждан общества «В2» уменьшается (жирная кривая), а разбогатевших – растет (тонкая кривая).

Видно, что уже через 10 дней после действия закона ЗНТ 73% граждан (а их всего 10000) уменьшили свое состояние по сравнению с первоначальным в среднем на 85%, и все вместе они обладают лишь 11% богатства общества. В то же время остальные 27% граждан разбогатели так, что их суммарное состояние составляет 89% богатства общества. Через 100 дней действия закона расслоение становится еще более заметным, и разоренными оказываются уже 93% граждан, которые все вместе обладают менее чем 2% общенародного достояния, в то время как 7% богачей обладают остальными 98% всех богатств. Таким образом, закон ЗНТ приводит к прогрессивному росту числа полностью разоренных граждан и образованию нескольких олигархов, у которых находятся все богатства общества.

Очевидно, что общество, возникшее в результате действия закона ЗНТ, оказалось нежизнеспособным. Кроме того, как это иллюстрирует рисунок 119, равновесное состояние в таком обществе никогда не наступает, поскольку количество неимущих членов общества постоянно растет, а уменьшающееся число имущих становится недостаточным для статистического равновесия. Отметим, что в отсутствие закона ЗНТ, как показало моделирование общества «В1», граждане, принадлежащие груп-

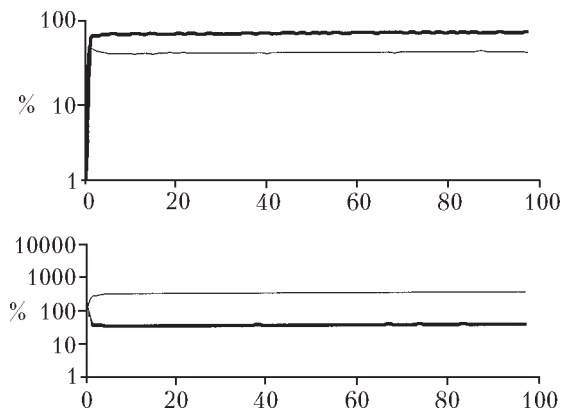


Рис.120. Расслоение общества «ВЗ» со временем, отложенным по оси абсцисс в днях. Обозначения те же, что и на рисунке 119

пе «0», уже через 1000 дней могут оказаться в группе «100», т.е. обладать средним состоянием этого общества.

На рисунке 120 показано, как изменяется относительная доля бедных в том случае, когда выигрыш (и проигрыш) от торговой сделки не ограничен законом ЗНТ и действуют правила общества «ВЗ». Иными словами, два участника торговой сделки кладут все свои деньги «на бочку», а компьютер случайным образом определяет, какую долю с «бочки» берет каждый при условии, что денег на ней не остается.

Видно, что в обществе «ВЗ», состоящем из 10000 человек, очень быстро наступает состояние, при котором доля проигравших в результате произошедших торговых сделок (черная кривая) и их среднее состояние (красная кривая) уже перестают меняться со временем, достигая стабильных величин. И хотя 63% людей оказываются проигравшими, их суммарное состояние все-таки составляет 27% богатств общества и остается стабильным, в отличие от того случая, когда действует закон ЗНТ.

Пусть знает каждый, что... Общество, где граждане вступаю друг с другом в экономические отношения, всегда расслаивается так, что бедных в нем оказывается больше, чем богатых. При этом распределение доходов в обществе равных возможностей, где не действуют законы, аналогичные закону ЗНТ, остается неизменным, что и делает такое общество стабильным.

ПЫЛЬ: ДОМА И В КОСМОСЕ

Что такое пыль? Пыль – это взвешенные в воздухе и осевшие на поверхность тел очень мелкие 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 самую 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 см⁻³. На улицах крупных городов пыли в сотни раз больше, а в жилых домах ее концентрация достигает 6 млн см⁻³.

Постоянными источниками пыли являются некоторые виды производства, сельского хозяйства, транспортные средства, а также пожары, извержения вулканов, движущиеся ледники и различные катастрофы (рис.121). Пыль причиняет ущерб промышленному оборудованию, снижает качество выпускаемой продукции, а также может быть причиной самых 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 с 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. Для того 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.



Рис.121. Одна из крупнейших катастроф современности, когда в результате обрушения двух небоскребов Всемирного торгового центра в Нью-Йорке образовалось более 100000 тонн микроскопической пыли

Поэтому чем больше пыли в воздухе, тем чаще и гуще там туманы. Осаждаясь на землю, туманы очищают воздух от пыли. Однако избавляться от пыли, осаждая ее парами воды, чаще всего не представляется возможным. А когда это удастся, то приходится уже бороться с грязью, которую мы развели. Поэтому физики сейчас исследуют процессы, приводящие к слипанию частичек пыли, чтобы впоследствии ими управлять, превращая облако пыли в маленький камушек, падающий на землю.

Что такое силы Ван-дер-Ваальса? Главными силами, приводящими к слипанию одинаковых молекул и состоящих из них мельчайших частичек, являются силы Ван-дер-Ваальса.

На рисунке 122,*а* приведено схематическое изображение неполярной молекулы (например, O_2 или H_2), т.е. молекулы, в которой количество электронов слева и справа одно и то же. Однако даже у неполярной молекулы время от времени один из краев оказывается отрицательным, а противоположный —

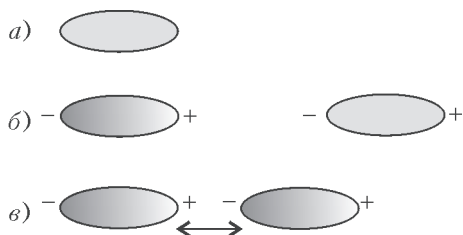


Рис.122. Как силы Ван-дер-Ваальса приводят к слипанию частиц пыли

положительным. Становясь на очень короткое время диполем, молекула электризует соседнюю молекулу (см. рис. 122,б), и они притягиваются друг к другу (см. рис. 122,в). Это и есть силы Ван-дер-Ваальса, которые иногда называют так-

же дисперсионными силами, т.е. силами, препятствующими рассыпанию (распылению) твердых тел и испарению жидких. К сожалению, в совершенстве управлять силами Ван-дер-Ваальса физики пока не научились, так что мгновенно превратить, например, облако угольной пыли в кусочек угля еще не могут.

Когда пыль взрывается? То что мука взрывоопасна, люди узнали очень давно. Достаточно уронить пакет с мукой так, чтобы концентрация муки в воздухе составила более 50 г/м^3 , а потом «случайно» зажечь спичку – неминуемо раздается взрыв. Такие взрывы довольно часто происходят на элеваторах и иногда сопровождаются жертвами. Происходит это из-за того, что в муке много крахмала, а крахмал – это много-много молекул сахара, соединенных между собой. Каждая же из молекул сахара «хорошо» сгорает в воздухе, превращаясь в углекислый газ и воду и выделяя при этом большое количество теплоты. Загорание случается тогда, когда частички муки распылены в воздухе и каждая из них окружена кислородом. В этих условиях частичкам муки размером менее $0,1 \text{ мм}$ легко соединиться с кислородом, и они сгорают с огромной скоростью – детонируют.

Что такое космическая пыль? Астрофизикам не дает покоя космическая пыль. Последние гипотезы связывают появление космической пыли со взрывом звезд и утверждают, что эта пыль была первым твердым веществом во Вселенной. Космическая пыль мешает вести наблюдения астрономам, заслоняя от них некоторые области звездного неба и создавая вместо них так называемые темные туманности. В других случаях 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 действительно могла стать необходимым источником возникновения органичес-

кой жизни на Земле, построенной на основе углерода. В среднем каждый день на один квадратный метр нашей планеты опускается одна космическая пылинка, что в сумме составляет около ста тонн в день.

Космические пылинки размером с частичку, образующую дым, являются крошечными родственниками метеоритов, т.е. микрометеоритами (рис.123). Астероиды и кометы служат постоянными поставщиками космической пыли на Землю. Специальная программа сбора и изучения космической пыли проводит-

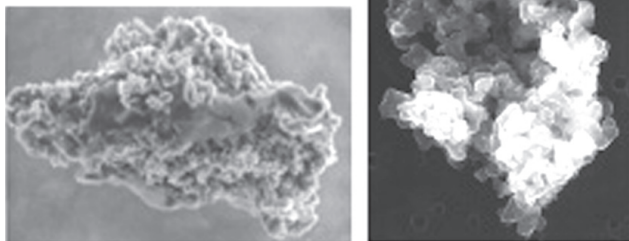


Рис.123. Микрофотографии частичек космической пыли. Горизонтальный размер левого рисунка 18 мкм, правого – 10 мкм

ся на околоземной орбите с помощью международной космической станции.

Беспилотные космические корабли, исследовавшие окрестности Юпитера и Сатурна, обнаружили там потоки космической пыли, источниками которых 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 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. Это 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 заряженных пыли и Луны и силой гравитационного притяжения между ними.

Очевидно, что такой слой пыли сделал бы процесс прилунения очень сложным и опасным. Однако простой расчет показывает, что равенство электростатических и гравитационных сил, если оно есть, будет справедливо для любого расстояния между Луной и пылинкой, а поэтому никакого плотного слоя пыли быть там не может.

В 1972 году американскому астронавту Х.Шмидту 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. И вот почему. 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 космонавтами 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 окислы железа, а чистое железо сразу окисляется и ржавеет.

Известно, что атомы железа поглощают микроволновую энергию на частотах, используемых бытовыми СВЧ-печами (2,45 ГГц). Поэтому авторы одного из проектов предлагают доставить на Луну СВЧ-устройства и обработать всю пыль в месте будущей высадки. Под действием СВЧ-излучения железо, вкрапленное в стеклянные пылинки, быстро нагреется до 1200 °С и расплавится. После этого расплавленное железо начнет нагревать стекло, которое тоже расплавится. В результате соседние частички лунной пыли должны сплавиться и образовать гладкую стекловидную поверхность. Это могло бы убедить экипаж будущей экспедиции от неблагоприятных воздействий лунной пыли.

ПРОВОДА ДЛЯ СВЕТА: СВЕТОВОДЫ

Идея управлять светом так, как мы научились это делать с электрическим током, давно владела умами ученых. Во второй половине XIX века в мире появились электродуговые источники света. Одной электрической дугой, дававшей в то время гораздо больше света, чем первые лампочки накаливания Эдисона, вполне можно было осветить сразу несколько комнат, большое помещение или производственный цех. Однако для этого необходимо было научиться «делить и заворачивать» свет, передавая его по криволинейным траекториям. Кроме того, электрическая дуга была отнюдь не безопасна, и давать ее свет пороховому цеху надо было так, чтобы не взлететь на воздух, а именно – ставить дуговой светильник где-то в сторонке и от него разводить свет куда надо. Но как?

В XIX веке английский физик Дж.Тиндал показал, что для изменения направления света можно использовать эффект полного внутреннего отражения на границе «вода–воздух». В его опытах свет распространялся вдоль струи воды, вытекающей из сосуда, внутри которого находился источник света (рис.124). Опыт, конечно, был красивым, но разводить свет по комнатам и цехам с помощью водяных струй никто не хотел.

Примерно в то же время возникает идея использовать свет для передачи информации. В 1880 году шотландец А.Белл получает патент на оптический телефон, который он назвал фотофоном, но его более раннее изобретение – телефон – оказалось куда более практичным. Белл считал, что фотофон может работать, посылая световые сигналы через атмосферу к другим таким же аппаратам и улавливая их сигналы. Но оказалось, что атмосфера не способна служить для света таким же надежным каналом передачи, как металлический провод для электрического тока. Прошло еще 70 лет, и изобретение Белла было воплощено лишь

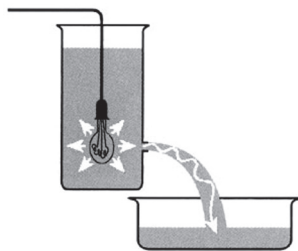


Рис.124. «Вытекание» света из освещенной лампы сосуда

в нескольких устройствах, например как средство оптической связи между кораблями, находящимися недалеко друг от друга. Идея использования света для высокоскоростной передачи информации так и оставалась идеей из-за отсутствия способов передачи света на большие расстояния без значительных потерь его интенсивности.

В середине XX века стало очевидно, что совсем скоро количество телефонных и других линий связи на земле будет таково, что всю добываемую медь придется переплавлять в электрические провода, а их – зарывать обратно в землю. Да и качество проводной связи уже не устраивало многих, особенно тех, кто хотел сделать связь помехоустойчивой, недоступной для других и высокоскоростной. И тут вспомнили о казавшихся ранее смешными опытах Тиндала и стали пытаться делать световоды из стекла, так как песка – основного материала для изготовления стекла – на земле более чем достаточно, да и раньше стекло использовали для «отведения» света с улицы в дом.

Так как коэффициент преломления стекла около 1,7, а у воздуха 1,0, то обычный стеклянный стержень может быть световодом, если луч света, оказавшись внутри стержня, будет составлять с его осью угол меньше угла полного внутреннего отражения, т.е. меньше $\arccos(1,0/1,7)$, или около 54 градусов. Таким способом дополнительной подсветки пользуются до сих пор некоторые врачи, прижимая язык пациента стеклянной палочкой и освещая другим ее концом удаленные участки глотки. Однако хорошими световодами стеклянные стержни стать не смогли из-за того, что поверхность стекла быстро загрязнялась и оптические характеристики световода ухудшались. Поэтому

решили на стеклянный стержень световода наносить защитный слой (оболочку), имеющий показатель преломления меньше, чем у стекла.

На рисунке 125 показан ход двух лучей через световод, вошедших через его торцевую поверхность. Видно, что луч 1, составляющий с осью световода более острый угол, чем луч 2, испытывает полное внутреннее отражение от оболочки. В то же время луч 2 при каждом

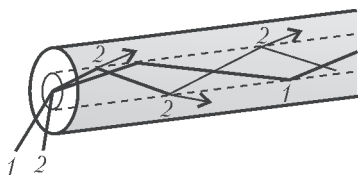


Рис.125. Схематическое изображение световода, на котором сердцевина и оболочка разделены пунктирными линиями; 1 и 2 – лучи, падающие на торец световода под разными углами к его оси

отражении от оболочки теряет часть своей энергии, которая выходит из световода. Очевидно, что существует предельный угол с осью $\alpha_{\max}$, при котором луч, двигаясь по световоду, еще претерпевает полное внутреннее отражение. Величину этого угла легко вычислить, применив законы преломления и отражения света на торцевой и боковой поверхностях сердцевинки световода:

$$\alpha_{\max} = \arcsin \sqrt{n_c^2 - n_{об}^2},$$

где n_c и $n_{об}$ – коэффициенты преломления сердцевинки и оболочки световода соответственно.

Во всех световодах должно соблюдаться неравенство $n_c > n_{об}$, и тогда все лучи, лежащие внутри угла $\alpha_{\max}$, будут претерпевать полное внутреннее отражение при каждой их встрече с отражающей границей. И хотя траектория каждого луча представляет собой ломаную линию, световой пучок в целом распространяется по сердцевинке вдоль оси световода. Угол $\alpha_{\max}$ определяет входную угловую апертуру световода, а лучи внутри него называют апертурными (направляемыми). Внеапертурные лучи, падая на границу «сердцевина – оболочка», частично преломляются, выходят в оболочку, а потом и вообще покидают световод.

Все геометрические соотношения для углов падения, отражения и преломления остаются практически неизменными, если световод изогнуть, однако не слишком резко. Поэтому световой пучок будет послушно следовать за всеми изгибами световода, распространяясь по любой криволинейной траектории. Так как толщина самых толстых волокон световодов составляет не более 0,1 мм, то даже наматывание его на карандаш практически не уменьшает светопередачу. Со второй половины XX века световоды начинают широко применять для локального освещения и «доставки» изображения.

Однако восхищение первыми появившимися световодами, сделанными в начале 1950-х годов из натурального кварца (речного песка), сменилось разочарованием. Оказалось, что, несмотря на действительно очень привлекательные свойства, световоды обладали явной «близорукостью» – они не могли передавать свет на большие расстояния. Так, на расстоянии 1–2 м интенсивность света падала в два раза. А это значит, что на расстоянии 100 м из такого световода можно было взять только одну миллионную часть первоначальной интенсивности света. Причиной такого быстрого ослабления света являлись примеси и неоднородности, содержащиеся и появляющиеся в кварцевых нитях световода при их вытяжке. Примеси уменьша-

ли прозрачность кварца и рассеивали идущий по световоду свет. Эта была первая проблема, которую предстояло решить.

Но появилась и вторая проблема. Световоды решили использовать не только для подсветки, но и для передачи информации, для чего вход световода освещали короткими импульсами света. Оказалось, что импульсы света, проходя через световод, не только теряют свою интенсивность, но и «расплываются» во времени, становясь более широкими (рис. 126). Это не давало



Рис. 126. Зависимость от времени интенсивности света, падающего на входной торец световода (слева), и выходящего из него (справа)

возможности пропускать через световод высокочастотные импульсы света, ограничивая тем самым его пропускную способность.

О причине этого недостатка световода можно догадаться, если внимательно рассмотреть ход лучей на рисунке 125. Видно, что лучи, упавшие на торец сердцевины перпендикулярно его поверхности, будут двигаться параллельно оси световода и выйдут первыми из него, так как им для этого надо преодолеть меньший путь. Потом выйдут те лучи, которые упали на торец под небольшими углами, и, наконец, последними до конца световода дойдут лучи, путь которых был самым ломаным и длинным. Понятно, что расплывание световых импульсов в световоде будет зависеть от диаметра волокна: чем меньше диаметр, тем меньше расплывание. Поэтому, уменьшая диаметр сердцевины, можно добиться того, чтобы по световоду распространялся только один осевой луч, тогда расплывание импульсов исчезнет.

Наконец, третья проблема при использовании первых световодов была связана с тем, что тогда еще не было лазеров — мощных источников монохроматического света. А когда в световод запускали белый свет, то на выходе он оказывался окрашенным, так как величина входной апертуры зависит от цвета (она максимальна для фиолетового света). В 1960-х годах появились первые лазеры, а потом и светодиоды, и с тех пор прогресс в изготовлении световодов идет бок о бок с прогрессом в создании источников монохроматического излучения.

Настоящая революция в изготовлении световодов произошла в 1970 году, когда появилась возможность выпускать кварцевое стекло с такой высокой прозрачностью, что 1 км стекла ослабля-

ет интенсивность света только в 40 раз. Технология изготовления высокопрозрачного кварцевого волокна для световодов показана на рисунке 127. Сначала через раскаленную кварцевую исходную трубку пропускают газовую смесь четыреххлористого кремния (SiCl_4) и кислорода, где при высокой температуре (около 1400°C) протекает реакция с образованием кварца (SiO_2), который оседает на внутренней поверхности трубы. Когда слой нанесенного кварца достигает необходимой толщины, трубку еще больше нагревают, и она схлопывается. Потом полученную цилиндрическую заготовку искусственного кварца нагревают и делают все тоньше и тоньше, доводя диаметр кварцевого волокна до $10\text{--}100\text{ мкм}$, после чего снаружи наносят полимерную оболочку с малым показателем преломления. Чтобы избежать примесей, все газовые смеси тщательно очищают, поэтому и прозрачность волокон из искусственного кварца оказывается очень высокой.

В начале 1980-х годов стало ясно, что сделать кварц еще более прозрачным будет очень сложно. Свет с длиной волны $0,75\text{ мкм}$ от лазера, работающего на кристалле арсенида галлия-алюминия, терял 40% своей исходной интенсивности, пройдя через толщу 1 км такого стекла. Это казалось пределом возможного. Улучшить прозрачность кварца можно, если использовать более длинноволновое излучение. Ведь известно, что чем короче световая волна, тем больше она рассеивается при прохождении через среду. Однако лазеры с длиной волны 1 мкм тоже не устраивали тех, кто занимался волоконно-оптической связью. Оказалось, что молекулы воды, избежать включение которых в кварц не удастся, очень сильно поглощают излучение в области 1 мкм и «равнодушны» к излучению с длиной волны $1,5\text{ мкм}$, поэтому

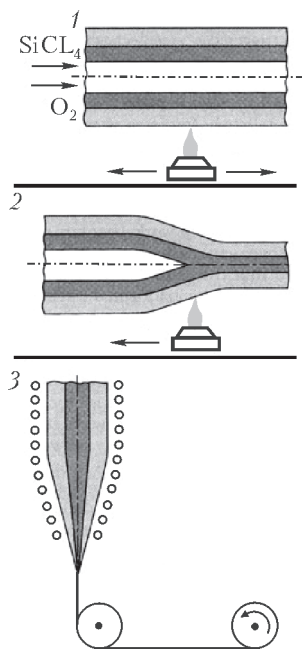


Рис.127. Основные этапы изготовления кварцевого волокна: 1 – осаждение кварца на внутренней поверхности кварцевой трубки при ее нагреве; 2 – «схлопывание» трубки при дальнейшем ее нагревании; 3 – вытяжка кварцевого волокна с диаметром $10\text{--}100\text{ мкм}$ и наматывание его на катушку

физиков-лазерщиков попросили сделать лазер именно с такой длиной волны. Вскоре был синтезирован новый класс полупроводниковых соединений, состоящих из четырех компонентов – индий, галлий, мышьяк и фосфор, который излучал на длине волны 1,55 мкм. Это позволило увеличить прозрачность кварцевого стекла до невиданных величин – менее 5% потерь при прохождении через 1 км стекла!

И началось бурное развитие волоконно-оптической связи.

Как мы уже говорили, уменьшая диаметр кварцевого волокна, мы получаем возможность увеличить скорость передачи световых импульсов, избавляясь от волновой дисперсии. Поэтому основу современной волоконно-оптической связи составляют кварцевые волокна с сердцевиной диаметром 5–10 мкм. В тех случаях когда не предъявляются высокие требования к частоте передаваемых световых импульсов, световод состоит из волокон толщиной около 100 мкм.

Важнейшие достоинства современных световодов и волоконно-оптической связи это:

- ничтожно малое затухание сигнала в кварцевом волокне – расстояние между ретрансляторами может достигать 100–200 км, что во много раз превышает такой же показатель для обычных проводных телефонных линий;
- высочайшая пропускная способность, которая достигает десятков Гбит/с;
- нечувствительность к электрическим полям, т.е. к разрядам молний, сигналам радиопередатчиков и помехам от электродвигателей;
- невозможность несанкционированного доступа к передаваемой информации, поскольку световод не создает вокруг себя электромагнитных полей, которые сейчас научились легко регистрировать;
- в десятки или даже сотни раз меньшая, по сравнению с металлическими проводами, масса, что облегчает прокладку кабелей;
- относительная дешевизна и доступность основного материала – кремния;
- стойкость к окислению.

ФИЗИКА АВТОМОБИЛЬНЫХ ПРОБОК

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. Когда стало ясно, что удобнее жить и работать вместе, возникли города, потом появились дороги между ними, и наконец – средства передвижения по ним, т.е. автомобили. Ну а когда в городах стало очень много людей, а на улицах очень много машин, начали возникать автомобильные пробки, в которых люди попусту теряют время. Поэтому автомобильные пробки можно считать побочным продуктом цивилизации.

Однако, в отличие, скажем, от экологических последствий цивилизации, причина автомобильных пробок кроется в психологии людей и вполне может быть устранена, если люди будут вести себя РАЗУМНО.

Эта статья адресована тем *homo sapiens*, кто хочет понять, как образуются автомобильные пробки и как можно их предотвратить.

Наши планы. 1) Попробуем математически описать поведение «среднего» водителя за рулем, а именно то, как он изменяет скорость своей машины в зависимости от расстояния до впереди идущей машины и от ее скорости.

2) Напишем программу для компьютера, с помощью которой «рассадим» несколько тысяч «средних» водителей по одинаковым машинам и запустим гонять их друг за другом по однополосной кольцевой дороге длиной 100 км (что, как известно, соответствует длине Московской кольцевой автодороги). Однако, в отличие от реальных условий, «средним» водителям будет запрещено обгонять друг друга.

3) Когда положение на нашей модельной кольцевой дороге – МКД – стабилизируется, постараемся выяснить, как зависит средняя скорость на МКД от количества машин на ней.

4) Для создания автомобильной пробки на МКД сделаем так, что у некоторой машины, например под номером 500, временно

(на одну минуту) заглохнет мотор и возникнет автомобильная пробка, которая потом в течение долгого времени будет влиять на движение по МКД.

5) Выясним, как характеристики автомобильной пробки зависят от количества машин на дороге и от поведения водителей.

Кинематический портрет «среднего» 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 v_0 для городских улиц (60–80 км/ч), должна быть меньше, чем для скоростных автомагистралей (100–120 км/ч).

Но алгоритм поведения водителя сразу меняется, когда впереди себя он видит машину, следующую в том же направлении. Теперь водитель должен не только использовать скоростные качества своей машины, но и держаться от впереди идущей на некотором безопасном расстоянии, не меньшем чем s_0 . Конечно, если спросить любого водителя, как можно математически записать закон, по которому он ускоряется или тормозит, то вероятность точного ответа относительно мала. Однако предположим, что читателям повезло и они наткнулись на водителя, знакомого с азами кинематики. Вот что он им ответит.

Сначала о разгоне до v_0 , когда впереди не видно никаких машин. Допустим, что максимальное ускорение «среднего» водителя, которое еще не вдавливают его в кресло, составляет $a \approx 2 \text{ м/с}^2$. Тогда формулу разгона можно записать, например, так:

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

где v – скорость автомобиля в момент времени t . Видно, что эта формула обеспечивает достижение желанной скорости v_0 и ее поддержание в дальнейшем. Как нетрудно догадаться, показатель степени отношения v/v_0 определяет скорость реакции системы «машина–водитель» и может быть очень высоким у агрессивных водителей, разъезжающих на мощных автомобилях. Четвертая степень в формуле выбрана просто для примера. Да и вообще, формула разгона могла бы иметь совсем иной вид – содержать, например, экспоненту или какие-нибудь другие функции. И все же, данную формулу, наверное, можно считать

самой простой, что очень важно для экономии времени последующих вычислений на компьютере.

Из соображений безопасности интуитивно ясно, что водитель должен держаться от впереди идущей машины на некотором расстоянии, превышающем s_0 , и что s_0 должно увеличиваться с увеличением скорости v . Об этом даже говорится в правилах дорожного движения некоторых стран. Например, в США от водителя требуют увеличивать s_0 на длину автомобиля при увеличении скорости на 5 м/с (т.е. 18 км/ч). Ну а так как длина среднего автомобиля 5 м, то зависимость s_0 от v в этом случае можно записать в следующем виде:

$$s_0 = tv + s_{\min},$$

где t – постоянная времени, равная 1 с, а $s_{\min}$ – минимальное расстояние между машинами, когда они стоят в автомобильной пробке. Для того чтобы машины не царапали друг другу бамперы, положим $s_{\min} = 2$ м.

Формулу эту можно прочесть и по-другому. Так как тормозной путь увеличивается пропорционально начальной скорости, то и дистанция между машинами должна быть больше соответствующего тормозного пути. При таком взгляде константа t – это допустимое время торможения при обычной езде.

Однако формула справедлива только для того случая, когда впереди идущая машина имеет такую же скорость, т.е. v . Представим себе, что на впереди идущей машине зажегся красный сигнал тормоза и она уменьшила свою скорость на Δv . Очевидно, что «средний» водитель сразу же тоже нажмет на тормоз, чтобы снизить свою скорость на столько же. Пусть наш водитель не будет очень резко нажимать на тормоз, и отрицательное ускорение машины составит не более $b = 2$ м/с². Таким образом, на процесс равнозамедленного торможения будет затронуто $\Delta v/b$ секунд, которые мы должны прибавить к t , чтобы сделать безопасным движение даже в том случае, когда впереди идущая машина затормозила. Ясно также, что в случае внезапного ускорения впереди идущей машины все будет наоборот и время t можно уменьшить на $\Delta v/a$, где a – величина комфортного ускорения (2 м/с²). Таким образом, улучшенная формула для s_0 , справедливая в случаях ускоренного или замедленного движения впереди идущей машины, будет иметь вид

$$s_0 = tv + s_{\min} + v \frac{\Delta v}{a|b},$$

где $a | b$ — означает, что в случае ускорения или торможения берут величины a или b соответственно.

Теперь опишем математически алгоритм поведения «средне-го» водителя, когда оказывается, что расстояние s между ним и впереди идущей машиной отличается от s_0 . Очевидно, что если $s > s_0$, то водитель будет ускоряться, стараясь приблизиться к впереди идущей машине, и наоборот. Формулу, описывающую стратегию регуляции s , можно записать в виде

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

Здесь $a | b$ имеет такой же смысл, как и в предыдущей формуле, а выбор второй степени был сделан, руководствуясь теми же соображениями, что и выбор четвертой степени в первой формуле, т.е. довольно произвольно.

Поскольку даже «средний» водитель, соблюдая дистанцию, все-таки хочет ехать как можно быстрее, то его стратегия, очевидно, описывается комбинацией правых частей первой и четвертой формул. Так что вполне возможной стратегией «средне-го» водителя может быть среднеарифметическая стратегия, описываемая полусуммой правых частей этих формул:

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

По машинам! После того как мы узнали, что можно ожидать от «средних» водителей, напомним программу для компьютера, которая имитировала бы взаимодействие трех тысяч таких водителей, едущих по кольцевой дороге длиной 100 км друг за другом не обгоняя. Пусть до начала движения все 3000 машин неподвижны и почти равномерно распределены по длине дороги, а в момент времени $t = 0$ все водители одновременно начинают двигаться в соответствии с полученными формулами для s_0 и dv/dt , где $v_0 = 120$ км/ч. Все машины перенумерованы так, что в начале движения на отметке «0 км» стоит машина с номером «1» и ее водитель через ветровое стекло видит перед собой машину «2», а тот, в свою очередь, видит машину «3» и т.д. Если N — это число машин на дороге, то около отметки «100 км» стоит машина с номером « N », перед которой уже стоит машина с номером «1», и МКД замыкается. Ну а дальше посмотрим, как «живет» наша МКД.

На рисунках 128 и 129 приведены данные моделирования на компьютере — видно, как машины ускоряются и приблизитель-

но через 30 секунд достигают своей оптимальной скорости. Эта скорость, как и следовало ожидать, очень сильно зависит от того, сколько машин на МКД (рис.130). На рисунке 128 обращает на себя внимание очень маленький разброс (около

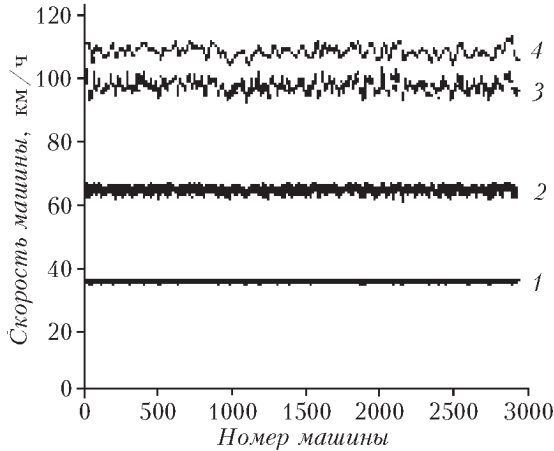


Рис.128. Скорости машин в зависимости от их порядкового номера через 5 (кривая 1), 10 (кривая 2), 20 (кривая 3) и 40 (кривая 4) секунд после начала разгона

5%) в значениях скорости, достигнутой через 40 секунд. Это говорит о том, что система поддержания скорости на МКД, охваченная многими обратными связями, довольно стабильна. Ну а рисунки 129 и 130 демонстрируют всем известную истину — чем меньше машин на дороге, тем до большей скорости можно на ней разогнаться.

Одноминутная «авария».

После того как машины на МКД разогнались и достигли

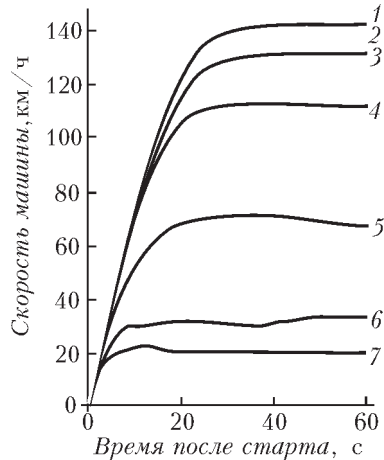


Рис.129. Скорость машины номер «300» в зависимости от времени, прошедшего после восстановления движения, для МКД с разным количеством машин: 500, 1000, 2000, 3000, 5000, 8000, 10000 для кривых 1, 2, ..., 7 соответственно

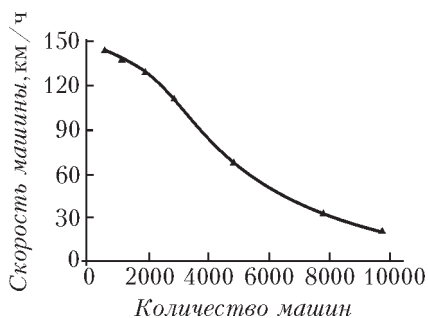


Рис. 130. Средняя скорость машин в зависимости от их количества на МКАД

своей оптимальной скорости, спровоцируем возникновение автомобильной пробки на дороге. Для этого остановим машину под номером «500» на одну минуту, «сломав» ее мотор, а потом попросим ее водителя начать движение и догнать уехавшие вперед машины.

Рисунок 131 показывает, как возникает и живет автомобильная пробка,

когда на МКАД находятся 3000 машин, т.е. в среднем 30 машин на одном километре. Результаты моделирования показали, что в конце одноминутной остановки машины номер «500» около 50 машин, следовавших за ней, тоже остановились, и таким образом пробка продвинулась почти на полкилометра в сторону, противоположную движению. Поэтому даже после того как машина с номером «500» (первичная причина автомобильной пробки) продолжила свое движение, догоняя ушедший вперед транспорт, остановившиеся за ней бампер к бамперу

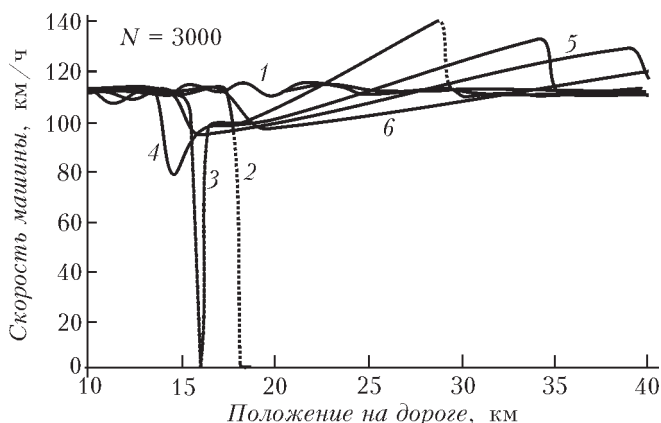


Рис. 131. Скорости машин в зависимости от их положения на участке дороги между 10-м и 40-м километрами в различные моменты времени: 1 — до остановки, 2 — в конце одноминутной остановки, 3 — через 5 минут после восстановления движения, 4 — через 9 минут, 5 — через 13 минут, 6 — через 20 минут

машины, став вторичным источником пробки, продолжали задерживать возобновление нормального движения. Как следствие этого, автомобильная пробка продолжала перемещаться по МКД в сторону, противоположную движению транспорта. Так, через 5 минут после «починки» мотора, когда машина с номером «500» уже проехала около 12 км и догнала уехавшие вперед машины, созданная ею пробка продвинулась почти на 2,5 км от места «аварии». Такое «встречное» движение автомобильной пробки сохранилось даже тогда, когда пробка начала рассасываться и все машины на дороге начали двигаться. Как показало моделирование, скорость встречного движения пробки составляет около 500 м/мин. Через 2–3 минуты после возобновления движения пробка меняет направление своего перемещения на попутное движению транспорта.

Если считать временем жизни автомобильной пробки интервал, когда минимальная скорость на МКД снижена на 30%, то пробка, проиллюстрированная рисунком 131, длилась не больше 10 минут. Известно, что последствия аварий на дороге становятся гораздо более серьезными, если они происходят в часы пик, когда плотность машин на дороге увеличена. Продемонстрируем это на нашей модели, увеличив плотность машин на МКД.

А какие последствия может иметь одноминутная «авария» в часы пик, когда плотность машин возрастает до 40 на километр? Очевидно, что теперь «авария» приведет к остановке большего числа автомобилей, следующих за неисправным. Через одну минуту их будет уже более 60, и все они станут вторичными источниками возникшей пробки, когда машина с номером «500» будет догонять оторвавшийся вперед транспорт. В результате пробка начинает двигаться навстречу движению транспорта с той же скоростью около 500 м/мин, но, в отличие от предыдущего случая, в часы пик пробка может не рассосаться в течение очень долгого времени или даже может стать постоянной. Причиной «вечной» пробки служит динамическое равновесие между количеством машин, останавливаемых этой пробкой, и числом счастливицев, 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 плотнее, считая, что этим мы приближаем для себя момент выхода из пробки. Очевидно, что такая стратегия ошибочна. Приближаясь очень близко к бамперу впереди стоящего автомобиля, мы ограничиваем величину ускорения будущего разгона,

а значит, и количество машин, освобождающихся из плена в единицу времени, что может сделать пробку «вечной».

Для того чтобы не создавать «вечных» автомобильных пробок, достаточно снизить свою «желанную» скорость v_0 до той величины, которая оптимальна для данной плотности машин на МКД. Например, для МКД с 4000 машин v_0 могла бы быть порядка 80 км/ч. Какой стала бы ситуация на МКД при одноминутной «аварии» теперь, показано на рисунке 132. Видно, что образование и рассасывание пробки в этом случае очень

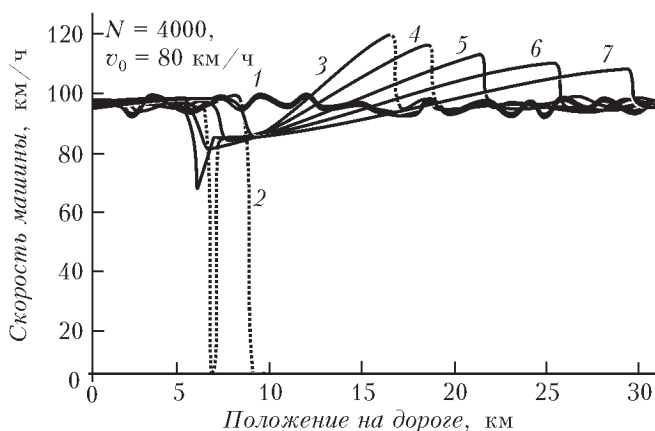


Рис.132. Скорости машин в зависимости от их положения на участке дороги между 5-м и 35-м километрами в различные моменты времени: 1 – до остановки, 2 – в конце одноминутной остановки, 3 – через 5 минут после восстановления движения, 4 – через 7 минут, 5 – через 10 минут, 6 – через 15 минут, 7 – через 20 минут

похоже на то, что происходит при 3000 машинах на МКД и «желанной» скорости 120 км/ч. Отметим, что продолжительность такой пробки, состоящей из действительно РАЗУМНЫХ водителей, составляет всего 8 минут.

Итак, повторяем: «Не приближайтесь к бамперу впереди идущей машины!»

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3
Глава 1. Пособие по физике для покупателей лампочек	5
Глава 2. Почему листья капусты и лотоса всегда чистые?	19
Глава 3. Трение: друг или враг?	24
Глава 4. Вода в воздухе: пар, туман и облака	40
Глава 5. Огонь	49
Глава 6. Ветер: энергия из ничего	56
Глава 7. Какая горка самая быстрая	68
Глава 8. Как мы плаваем	73
Глава 9. Что тянет Гольфстрим на север?	85
Глава 10. Физика стирки и чистки: как моют мыло и ультразвук	89
Глава 11. Тепло и холод: физика и биология	100
Глава 12. Что общего между чудом св. Януария и буровым раствором?	113
Глава 13. Как смотреть сквозь стену?	117
Глава 14. Как океаны говорят друг с другом: подводная акустика	123
Глава 15. Законы Ньютона для паникующей толпы	128
Глава 16. Молния: больше вопросов, чем ответов	140
Глава 17. Как быстрее спуститься на лифте в час пик	149
Глава 18. Кинетика социального неравенства	159
Глава 19. Пыль: дома и в космосе	172
Глава 20. Провода для света: световоды	177
Глава 21. Физика автомобильных пробок	183

Константин Юрьевич Богданов

Прогулки с физикой

Библиотечка «Квант». Выпуск 98

Приложение к журналу «Квант» №6/2006

Редактор *В.А.Тихомирова*

Обложка *А.Е.Пацхверия*

Макет и компьютерная верстка *Е.В.Морозова*

Компьютерная группа *Е.А.Митченко, Л.В.Калиничева*

ИБ № 83

Формат 84×108 1/32. Бум. офсетная. Гарнитура кудряшевская.

Печать офсетная. Объем 6 печ.л. Тираж 3800 экз.

Заказ №

119296 Москва, Ленинский пр., 64-А, «Квант»

Тел.: (495)930-56-48, e-mail: admin@kvant.info

Отпечатано в ОАО Ордена Трудового Красного Знамени

«Чеховский полиграфический комбинат»

142300 г.Чехов Московской области

Тел./факс: (501)443-92-17,(272)6-25-36,

e-mail:marketing@chpk.ru