

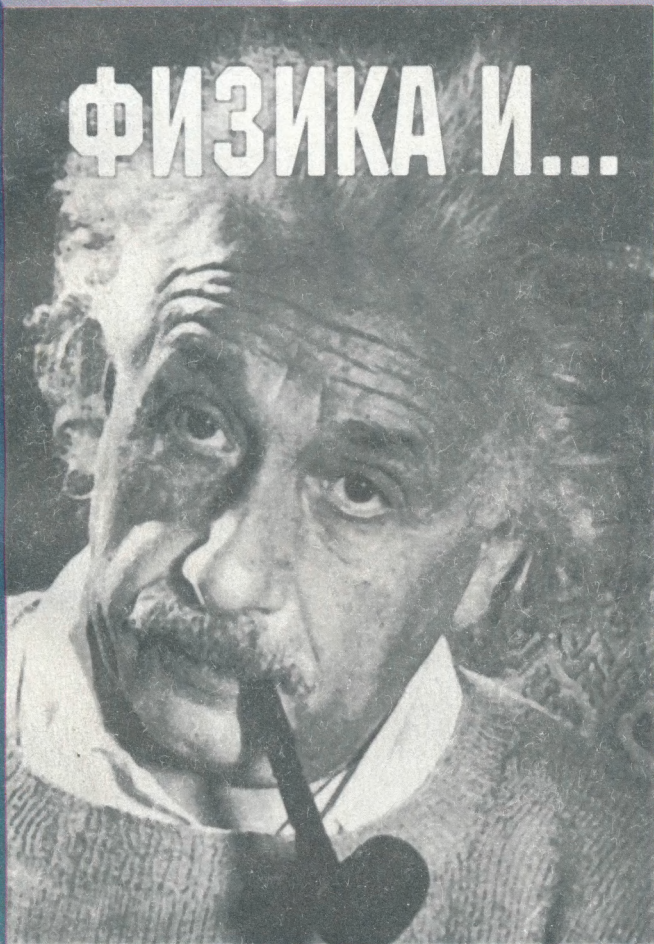
ВЫПУСК

87



Библиотечка КВАНТ

ФИЗИКА И...



Б Ю Р О



КВАНТУМ



БИБЛИОТЕЧКА

КВАНТ

В Ы П У С К

87

СОСТАВИТЕЛИ

С.С. Кротов

В.А. Тихомирова

А.И. Черноуцан

ФИЗИКА И...



УДК 53:1
ББК 22.3
Ф50

Серия «Библиотечка «Квант»
основана в 1980 г.

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

А.А.Болибрух, Б.М.Болотовский, А.А.Варламов,
В.Л.Гинзбург, Г.С.Голицын, Ю.В.Гуляев, М.И.Каганов,
С.С.Кротов (заместитель председателя), 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)

Научный редактор выпуска А.И.Черноуцан

Ф50 Физика и ... — Составители С.С.Кротов, В.А.Тихоми-
рова, А.И.Черноуцан — М.: Бюро Квантум, 2001. —
240 с. — (Библиотечка «Квант». Вып. 87)
ISBN 5-85843-033-3

Книга представляет собой сборник статей, опубликованных в журнале «Квант» в предыдущие годы. В статьях рассказывается, как физические идеи и методы исследования помогают объяснить различные проблемы таких областей общественной и научной жизни, как философия или биология, химия или криминалистика, метеорология или спорт. Завершается книга рассказом о некоторых физических игрушках.

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

ББК 22.3

ISBN 5-85843-033-3

© Бюро Квантум, 2001

ПРЕДИСЛОВИЕ

– Ну, что касается меня, – сказал Дятел, который был прирожденным философом, – я не нуждаюсь в физических законах для объяснения явлений. Если вещь такова сама по себе, то она сама по себе такова...

О.Уальд. Мальчик-звезда

Каких только «Физик» не знала история популяризации науки. Есть «Физика в школе», «Физика в ванне» ... Но «Физика и ...» – такого еще не было.

Несомненно, что в этом «и ...» содержится претензия на всеобъемлемость. И эта претензия не лишена основания. Уже в юной Элладе физика понималась как философия природы, обнимая собою почти всю сумму знаний. Но то была, в основном, качественная наука. Со временем определились два важнейших атрибута физики – *размерность* величины и *масштаб* для ее измерения. Первый из этих атрибутов придает рассматриваемой величине «окраску» (если угодно – «цвет», «запах», «вкус»). Второй позволяет охарактеризовать эту величину количественно. Эти два понятия совершили чудо в развитии техники – машины стали делать не на глазок, люди научились создавать оптимальные вещи с заранее заданными свойствами. И теперь трудно представить, как, например, можно пытаться достичь Марса «методом проб и ошибок».

Неудивительно, что методы физики стали внедряться в другие сферы человеческого интереса – некоторые из них можно увидеть прямо в Содержании этой книги. Например, в начале XX века один немецкий врач, пытаясь описать взаимную симпатию двух персон, рассуждал прямо-таки «физически». Пусть, – говорил он, – в каждой человеческой особи доля мужского начала равна α , женского β ; таким образом, для одной личности имеем $\alpha_1 + \beta_1 = 1$, для другой $\alpha_2 + \beta_2 = 1$ (нечто вроде закона сохранения). Тогда сила их взаимного притяжения (парного взаимодействия) может быть записана, например, так: $F_{12} \sim |\alpha_1 - \beta_2|^{-1}$. Тут ясно виден ход

«физической мысли» врача: если идеальный мужчина ($\alpha_1 = 1$) встречает идеальную женщину ($\beta_2 = 1$), сила их притяжения стремится к бесконечности (Ромео и Джульетта, Меджнун и Лейла, Иван да Марья ...).

Но что может человек ответить Дятлу, упомянутому в эпитафье? Наличие сотен философских систем, противоречащих друг другу, говорит о том, что тут что-то не так. Существование различных религиозных направлений и сект свидетельствует о трудности создания единой веры. Почему? В этих областях человеческой практики нет единиц измерения. А понятия и законы физики всюду одинаковы – в Африке, на Чукотке, на Солнце, и...

Из всех естественных наук только физика отважилась ответить на вопрос, *для чего* создан человек, – само существование Вселенной было бы лишено смысла без того, *кто* ее познает (это *антропный принцип*: антропос = человек). И только учитель физики (Н.Федоров, 1852 г.) имел смелость сформулировать цель науки: не создание оптимальных бомб и даже не посев хлебов, а достижение того, что недоступно самой природе, – индивидуального бессмертия. Причем не только для будущих поколений, но и воскрешение всех ранее ушедших людей, как ее бесценных творений. Какая наука ставила более высокую цель? Вот это «И...»!

Но кто же создавал физику? Ньютон и Паскаль были не просто верующими – они были богословами. А Лаплас был атеистом. Но ни вера, ни безверие (которое тоже есть религия) не помешали их именам остаться в истории науки. Это означает, что физика стоит над религиями и философиями. И хотя ее законы уточняются со временем, наличие размерностей и масштабов остаются догматически незыблемыми.

Прочитав эту книгу и вдохновясь мощью физики, этой единой количественной философии мира, возможно вы установите когда-нибудь единицы измерения и таких неуловимо прекрасных сущностей, как вера, надежда, любовь... И тогда физика действительно станет всеобъемлющей.

Итак, за дело, господа, – за «физику и ...»!

Профессор МФТИ А.Л.Стасенко

АПОЛОГИЯ ФИЗИКИ

М.И.Каганов

Нужно ли физику защищать? От кого? Эти вопросы, наверное, сразу возникают при взгляде на название статьи. И прежде всего всплывает мысль о защите физиков от обвинения в открытии способа массового уничтожения. Но не об этом пойдет здесь речь. Физика, будучи источником идей и технологий, используемых в инженерной практике, воспринимается многими как приземленная наука, техническая дисциплина, якобы бездуховная по самой своей сути. Вот от этой точки зрения и хочет защитить физику автор.

Трудно дать всех устраивающее определение духовности. Но мне кажется несомненным, что в него входит интерес человека к окружающему его миру не только как к удобной или неудобной среде обитания. Трудно назвать духовным человека, не замечающего красоты пейзажа, безразличного к восходам и закатам, не интересующегося миром животных и растений, не испытывающего почтительного удивления перед фантастическим «устройством» любого уголка живой природы. Удивление, испытываемое человеком при взгляде на окружающую природу, естественно превращается в любопытство, а развитое обучением и чтением — в любознательность. Конечно, у разных людей любознательность останавливается на разном уровне познания. Выясняется: для того чтобы ответить на «детские» вопросы «почему?» и «как?», необходимо создать глубокие теории, провести огромное число тонких экспериментов. Постепенно, переходя от простого наблюдения к фиксации строгих результатов экспериментов, а в дальнейшем все глубже проникая в суть вещей, человек постигает структуру Мира, начинает понимать движущие силы природных явлений.

В углублении процесса познания таится опасность. Любование солнечным закатом, его воспроизведение на холсте

обычно воспринимается как духовная деятельность¹, а выяснение спектрального состава солнечного света, исследование механизмов излучения световых квантов многим кажется скучным, узко профессиональным занятием, требующим знания конкретных методов – правил работы с формулами или с приборами.

Конечно, к исследованию явлений окружающего нас Мира необходимо подходить профессионально. Дилетантство и верхоглядство особенно нетерпимы в тех науках, которые имеют сложный аппарат и инструментарий. Есть, однако, своеобразное диалектическое противоречие между простотой наиболее глубоких вопросов, которые ставит перед нами Природа, и способов ответа на них. Иногда человек, занятый (профессионально!) исследованием определенного круга явлений, не видит связи этих явлений с устройством Мира, не ощущает, что его работа вносит дополнительный мазок в картину Мира. Даже в этом (по сути огорчительном) случае я бы не обвинил этого человека в бездуховности. Вполне могу себе представить, что он (этот гипотетический «приземленный» исследователь) бездну эмоций – а не только мыслей – потратил на разработку методов вычисления или измерения.

На памяти моего поколения физиков – катастрофа, происшедшая с Л. Д. Ландау². После автомобильной аварии спасенный врачами и физиками Лев Давидович не вернулся к научной деятельности. Прожил Л. Д. после катастрофы шесть лет, разговаривавшие с ним многократно убеждались, что у него сохранилась память, что он способен на тонкие оценки чужой деятельности, но работать как физик-теоретик он не мог. Врачи утверждали, что это – последствие травматического отключения той области мозга, которая ответственна за эмоциональную сферу.

¹ Конечно, только в том случае, если в пейзаж привнесено человеческое отношение к тому, что видит художник.

² Я думаю, нет необходимости представлять читателям академика, лауреата Нобелевской премии Л. Д. Ландау (1908–1968). Л. Д. – один из крупнейших физиков-теоретиков XX века, снискавший себе славу не только своими результатами, но и замечательной многотомной монографией «Курс теоретической физики», по которой учились и учатся многие поколения физиков-теоретиков, а также созданием одной из наиболее знаменитых и активных школ физиков-теоретиков.

Еще один пример, на первый взгляд далекий от предыдущего. Однажды на Ученном совете Института физических проблем (теперь институт носит имя Петра Леонидовича Капицы; тогда П.Л. был жив и вел Совет, о котором идет речь) выступил Яков Борисович Зельдович³ и высказал (не помню, по какому поводу) общие мысли о природе творчества. Основная мысль сводилась к тому, что любознательность – одна из потребностей человека. Наука – способ удовлетворения этой потребности. И ее необходимо удовлетворять, как потребность в пище, одежде и т.п. Речь, кажется, шла о финансировании фундаментальной науки. Поэтому Я.Б. подчеркивал не практическую ценность результатов научной деятельности, а именно удовлетворение потребности человека (человечества) в знании. Мне выступление очень понравилось (поэтому и запомнил). Как всякое интересное выступление, его активно обсуждали не только на Совете, но и после. Сильное впечатление на меня произвели слова молодого талантливого физика-теоретика. Он не то чтобы не соглашался с Я.Б., но признавался: когда он занят вычислениями, то любознательность, желание получить ответ на вопрос, который привел к постановке задачи, не играет большой роли, а волнует (хочется сказать, вдохновляет – так я его понял) сам процесс вычисления, радость от удивительной гармонии, которая ощущается в процессе использования строгих математических правил. И, может быть, подсознательное ощущение того, что вычисление имеет отношение к реалиям природы. Должен признаться, что слова этого молодого физика соответствуют и моему отношению к рутинному (казалось бы) процессу получения ответа.

Хочется, чтобы читатель-неспециалист имел в виду эту сторону работы физика и, думаю, любого научного работника. Есть затасканное, но точно отражающее суть дела слово – творчество. Научная работа – творчество. Творчество в любом виде человеческой деятельности вызывает вдохновение. И это превращает деятельность научных работников в духовную.

³ Я.Б.Зельдович (1914 – 1987) – талантливый и необычайно продуктивный физик-теоретик. Ему принадлежат выдающиеся достижения в физике горения, в физике элементарных частиц, астрофизике и космологии. Вместе с А.Д.Сахаровым и Ю.Б.Харитоновым принимал участие в создании советского атомного оружия. Академик, трижды Герой Социалистического Труда.

И все же. Есть процесс – творчество и есть результат. Тут, казалось бы, духовность не при чем. Получив результат (измерив или вычислив что-то), мы узнали то, что объективно существует. И, как уверено большинство научных работников, существует вне и независимо от нашего сознания. А имеет ли сам результат научной деятельности какое-либо отношение к духовности? Я уверен, что да. И попробую обосновать свою уверенность. Для этого нужно постараться понять процесс постижения устройства Мира. Далеким от физики людям может показаться, что он напоминает разгадывание головоломки. Знаете, есть такие головоломки: дается шарик или кубик, состоящий из отдельных неправильной формы кусочков. Надо уметь шарик (или кубик) разобрать и собрать из этих кусочков. При попытках разгадки головоломки очень важно то, что знаешь – решение есть. Еще: разобрав головоломку на части, уверен, что части неделимы. И наконец, всегда известны правила сборки. Они – как законы природы, если сравнить разгадывание головоломок с процессом познания. Так вот, о правилах сборки: априори известно, что они есть. Общие для всех головоломок: нельзя гнуть, прилагать силу и т.п. И вполне конкретные, для каждой головоломки свои: порядок разборки и сборки.

А теперь вернемся к Миру. Пожалуй, уже давно физики убедились, что все из чего-то состоит. Но из чего? Существует ли предел разложимости? Когда я учился в университете, все были уверены (и нас этому учили), что все построено из электронов, протонов и нейтронов, и для этих «кирпичей» мироздания создали специальный термин – элементарные частицы. Потом элементарные частицы посыпались, как из рога изобилия. Что ни год, то новая частица. Их классифицировали, распределяли по семействам, устанавливали разнообразные соотношения и... поняли, что все элементарные частицы недостаточно элементарны. «Появились» – теперь только в работах физиков-теоретиков – новые претенденты на роль «кирпичей» мироздания – кварки, удивительное создание человеческого ума, частицы с зарядом $1/3$ и $2/3$ от электронного заряда, частицы, которых никто не видел вне бывших элементарных частиц, но в реальности существования которых, пожалуй, никто не сомневается.

В контексте того, о чем я пишу, для меня важно следующее: кварки – порождение человеческого ума, необходимое

для построения стройной, непротиворечивой и красивой картины Мира.⁴

Остановимся на пути углубления внутрь мельчайших частиц вещества и задумаемся над тем, как из них строится весь окружающий нас Мир и мы сами, конечно.

Одно небезынтересное наблюдение. Углубление в структуру элементарных частиц не заставило нас пересмотреть свои взгляды на строение кристаллов, не изменило наших представлений о природе магнетизма или сверхпроводимости. В физике существует своеобразная иерархичность. Пытаясь понять свойства макроскопических объектов, нет необходимости добираться «до самой сути». Следует вовремя остановиться. Например, выясняя природу электропроводности и теплопроводности металлов, не следует задумываться о строении ядер тех атомов, из которых металл построен. Иерархичность, конечно, очень помогает и, в частности, обеспечивает консервативность (сохранность) добытых наукой результатов. Действительно, если бы не иерархичность, то любое продвижение вперед требовало бы коренной перестройки всего здания физики. По сути это означало бы невозможность движения вперед в познании свойств Природы.

Итак, вернемся к построению Мира (тел нашего Мира) из мельчайших частиц вещества. – Ну, это уж точно конструктор! Огромный, сложный, но все же конструктор. – Такое мнение часто приходится слышать. К сожалению, не только от людей, далеких от физики, но и от физиков. Особенно часто, если эти физики занимаются физикой элементарных частиц. И все же с этим суждением я в корне не согласен.

Не согласен потому, что для достижения понимания строения и устройства Мира вещей и тел нельзя сформулировать правила, пригодные для всех случаев жизни. Процесс постро-

⁴ Боюсь, в этих заметках не удастся сколь-нибудь подробно обсудить важную для нашего рассказа тему: «Эстетика и наука». Хочется только отметить два обстоятельства. Первое. В оценках научной красоты ученые более едины, чем в оценке бытовой красоты. И второе. По какой-то таинственной причине красивый результат редко бывает неправильным. Если бы я был верующим, то подумал бы, что эстетические критерии у Господа Бога и у ученых совпадают. Или даже так: Господь снабдил ученых эстетическими критериями, чтобы им легче было ориентироваться среди научных результатов. Наверное, чтобы последнюю фразу произнести искренне, надо быть глубоко верующим человеком.

ения, конечно, творческий процесс. Мы уже говорили об этом. Но дело не только в том, что приходится, преодолевая трудности, использовать все свои интеллектуальные способности. Главным образом дело в том, что приходится создавать, творить те сущности, из которых, собственно говоря, и строится Мир со всем богатством его свойств... Боюсь, читатель подумает, что ему морочат голову. «Ведь речь идет о строении Мира из электронов, протонов и нейтронов? – спросит он. – Зачем же создавать еще какие-то «сущности»?» Затем, что иначе ничего нельзя понять. Самый простой пример. Исследуя свойства твердых тел, мы обнаруживаем, что твердые тела очень похожи на... газы. «Ерунда какая-то, – скажет даже несколько обиженно читатель. – Ведь газ – совокупность почти невзаимодействующих частиц, а твердое тело состоит из сильно взаимодействующих частиц. Чтобы разделить твердое тело на части, надо потратить немало энергии... А вы говорите, что твердое тело похоже на газ *частиц*». «Но я и не говорил на газ *частиц*», – возразит автор. И действительно, твердое тело ведет себя не как газ частиц, а как газ *квазичастиц*⁵ – фононов, специально введенных сущностей, позволяющих понять свойства макроскопических тел. Можно долго спорить, есть ли фононы или они введены. Конечно, они есть, но не как структурные единицы вещества. Не из них состоит твердое тело, а из атомов и молекул или, бывает, из ионов разного знака. Но чтобы понять, как движутся атомные частицы, пришлось ввести фононы, т.е. выяснить (увидеть, почувствовать, угадать), что движутся атомные частицы так, будто тело состоит не из атомов (молекул, ионов), а, повторим, из квазичастиц – фононов. А введя фононы, получить бесконечное число следствий, подтверждающих факт существования фононов. Твердое тело проводит тепло так, как проводит тепло газ фононов. И поглощает звук так, как поглощает газ фононов. И так далее, и тому подобное.

Здесь не место перечислениям и подробным описаниям. Хочется подчеркнуть: фононы – творение ума, они «созданы» для понимания, они – результат духовной деятельности

⁵ Квази... (от лат. quasi – как будто, якобы) – приставка, соответствующая по значению словам «мнимый», «не настоящий», напр.: квазинаучный, квазиученый. (Словарь иностранных слов. М.: Русский язык, 1980.) В физике слово «квазичастица» не несет на себе уничижительного смысла.

человека, его творчества. Конечно, можно сказать и иначе: физики увидели и расшифровали, как движутся атомные частицы в твердом теле. Но что уж заведомо духовная деятельность, так это создание новых слов, а значит, и новых понятий. Для описания движения атомных частиц пришлось придумать новые слова: квазичастицы, фононы, магноны... – слова, которых не было в доквантовой физике твердого тела.

Объективность существования материи часто «доказывают» фактом существования Природы – в ее очень похожей на сегодняшнюю форме – до появления на земле человека. Мне, должен признаться, подобное утверждение кажется убедительным. Или, точнее, не столько логически убедительным, сколько соответствующим моему восприятию Природы – эволюционирующей и в результате эволюции сотворившей человека, способного постичь (постигать) устройство Природы.

Процесс постижения оказался необычайно трудным, необычайно продуктивным и (это – главное, что я хочу сказать) необычайно тесно связанным с самим процессом мысли. В Природе, в свойствах материи человек открывает то, что (казалось бы!) есть только продукт, результат деятельности человеческого мозга, прежде всего – логику. Математика есть материализованная логика. Почему Природа подчиняется математическим законам? Почему она описывается доступными человеческому уму законами?.. Опять хочется (в поисках уютного ответа) обратиться к религиозному мировоззрению и, как бы обратив всю постановку вопроса, сказать: «Природа создана такой, чтобы быть постижимой человеческим умом».

Я не знаю ответов на эти вопросы. И, наверное, не умею слишком строго их формулировать. Я не философ. В разное время, в разные периоды жизни к этим вопросам у меня было и есть разное отношение. Не всегда они меня волновали. Занятый решением конкретных задач, я просто не замечал, что подобные вопросы существуют. Встретившись с ними в статьях классиков (Эйнштейна, Бора, Шредингера, позднее Гейзенберга), я относился к ним с почтением, не допускающим «вмешательства». Но постепенно, не переставая заниматься вполне конкретной вычислительной деятельностью физика-теоретика, обнаружил, что меня волнуют общие проблемы, что интересны не только вполне определенные результаты теории или эксперимента, но и то, какое место занимают эти результаты в том, что принято называть научной картиной Мира. И, более того, возникла потребность обдумать, в каком

соотношении с Миром находится научная картина Мира. Не пытаясь переквалифицироваться в профессионального философа, я написал несколько статей и одну небольшую брошюру. Но ни разу я не высказался столь определенно, как здесь; не высказал своей уверенности, что наука – одна из сторон духовной жизни человечества. Что невозможно науку свести к полезной для развития производительных сил деятельности человека. И даже к удовлетворению любознательности как жизненно важной потребности людей. Что нет ни одного сколько-нибудь важного научного результата, в который не была бы вложена частица души человеческой. И хочу повторить еще раз. Частица души вложена не только в процесс добывания истины, но и в саму истину. Наука есть в каком-то смысле результат очеловечения Природы. Слова, понятия, соотношения – это то, чем наделил Природу человек. Если художник показал людям внешнюю красоту Мира, то ученый вскрыл существование внутренней интеллектуальной красоты, проявляющейся прежде всего в познаваемости законов Природы, в удивительном многообразии проявлений сравнительно просто формулируемых основных законов, управляющих движением материи.

ЧТО ЕСТЬ МЫСЛЬ?

В.В. Мещеряков

...мысль суть изменения тела.

Левкипп, Демокрит

*...нет разумного основания считать,
что ум соединен с телом.*

Аристотель

... мышление есть самое неясное...

Секст Эмпирик

Действительная реальность. Представьте себя помещенным в ядерный томограф – устройство для исследования молекулярной структуры живых организмов. Вы подвергаетесь электромагнитному излучению с частотой порядка 10^7 Гц и величиной магнитного поля порядка 1 Тл (для сравнения, магнитное поле Земли меньше 10^{-4} Тл) – а вашему мозгу хоть бы что! Излучение от компьютера мешает работать телевизору на дециметровых каналах, а вам и вашей голове – нет! Все окружающее пространство забито электромагнитными волнами, использующимися для радио- и телепередач, города опутаны проводами, в доме без электричества шагу ступить негде – на мозг это не влияет!

Это – современные примеры для современного человека. Но вспомним обычную молнию – грозовой электрический разряд, имевший место во все времена существования рода человеческого. Молния, как говорят, шумит на всех частотах, т.е. на любом канале радиоприемника слышен треск. А мысли как? Ну разве что кто-то страх испытывает, а так вообще никакого влияния молнии на человека не замечено за весь период цивилизованной жизни общества.

А дневной свет, ультрафиолетовые или инфракрасные лучи? Ведь это тоже электромагнитные волны. Большая часть их доходит до мозга, и не просто доходит, а проходит, проникает, пронзает!...

Взаимодействие электромагнитных волн с биосистемами определяется, в основном, двумя параметрами: интенсивностью излучения и частотой колебаний (или связанной с ней длиной волны). Поиск параметров электромагнитных волн, способных не разрушать, но управлять состоянием клеток биосистем и, как говорят, изменять информационную структуру организма, привел к миллиметровому диапазону длин волн малой интенсивности. Однако и в этом случае влияния электромагнитного поля на работу мысли замечено не было.

Но, может быть, лучше попытаться выяснить влияние мысли на внешнее поле? Есть такие приборы (один из них называется сквидом), которые измеряют магнитные поля мозга порядка 10^{-13} Тл, а связи с мыслями не регистрируют.

Какой же вывод напрашивается из всего сказанного? Может, не электромагнитные взаимодействия лежат в основе механизма рождения мыслей человека? Похоже, что так. И видно это не только из лавины экспериментального материала, а и из соображений здравого смысла тоже. Судите сами, допустил ли бы Бог существование электромагнитного механизма рождения мыслей, предоставляя докопаться до тайны электромагнетизма еще не повзрослевшему в XX веке человечеству. Вы только представьте себе возможность радиочастотного управления мозгом одного человека в руках другого. Это страшнее радиационного повреждения организма, при котором рвутся межмолекулярные связи и происходит ионизация атомов. При этом интенсивность радиоактивного распада уменьшается со временем, радиоактивное излучение достаточно большой интенсивности – дорогостоящая и труднодоступная вещь, а радиоволны дешевы и «коммуникабельны» – со всем миром провзаимодействуют везде и всегда.

Итак, сегодня в экспериментальном отношении возможны лишь два взаимных состояния ума человека и электромагнитного поля. Либо, при определенных параметрах поля, взаимодействия нет, либо, при других параметрах поля, взаимодействие разрушительно для мозга. И это не противоречит современным представлениям о взаимодействии поля и вещества, а теории взаимодействия поля и ума не существует, ибо, хотя и создана теория электромагнитного поля, но не понятно, что есть ум.

Может быть, это не актуально? Но мало ли людей озабочивалось не актуальными проблемами? Тут и поиски внеземных цивилизаций, и парапсихология, и телекинез, и перелеты в прошлое, будущее и даже параллельное, и телепортация, и

многое другое. Вспомним опыты красильщика Стивена Грея и священника Гренвилля Уилера. В начале XVIII века они строили токопроводящие линии, натирая стеклянные палочки и проводя избыточный заряд по бечевкам. Актуальным ли было их исследование, которое более чем на 100 лет опередило становление теории и практики электромагнетизма? Скорее всего – нет. Однако из всех работ Грея, в том числе по актуальным в то время вопросам оптики, астрономии и метеорологии, только статья по электричеству была опубликована в журнале Лондонского Королевского общества в период, когда его президентом был Ньютон. Умел далеко смотреть человек, сказавший, что гипотез не измышляет! Возможно, поэтому и сформулировал взгляд на биоструктуры в виде вопроса: «Не совершается ли Живое движение посредством колебаний живой Среды, возбуждаемых в Мозгу силой Воли и распространяющихся оттуда через сплошные, прозрачные и однородные капилляры нервов к мышцам, сокращая и растягивая последние?».

Так является ли сегодня проблема выяснения механизма работы человеческого мозга актуальной в общечеловеческом значении? Конгресс США объявил десятилетие после 1990 года десятилетием мозга, «...поскольку фундаментальные открытия на молекулярном и клеточном уровне организации мозга закладывают основу понимания механизмов мыслительной деятельности человека...».

Виртуальная реальность. Сегодня одним из главных свидетельств актуальности проблемы работы мозга служит создание перспективных нанотехнологий. Подтверждением этому является, например, возникновение понятия виртуальной (т.е. возможной) реальности. Суть в следующем.

Еще в 1959 году знаменитый американский физик Ричард Фейнман высказал предположение, что в будущем, научившись манипулировать отдельными атомами, человечество сможет синтезировать все что угодно. Неожиданным началом практической реализации этой идеи стал 1981 год, когда физики Г.Биннинг и Г.Рорер из швейцарского отделения фирмы IBM создали устройство, содержащее управляемый одноатомный контакт твердых тел. Первым применением этого устройства было сканирование поверхностей твердых тел с целью исследования их структуры. Последующие 10 лет его совершенствования привели к разработке приборов, позволяющих собирать по заранее спроектированной схеме молекулярные конструкции из отдельных атомов. В своей Нобелев-

ской лекции в 1987 году Бинниг и Рорер провозгласили: «...наконец, открывается возможность воздействовать на отдельные атомы и изменять отдельные молекулы...». Так возникло направление, получившее название нанотехнологии. Почему «нано»? Потому что, если типичное расстояние между атомами в конденсированных состояниях вещества имеет порядок 10^{-10} м, характерный линейный размер типичной молекулярной конструкции, составленной из атомов числом от сотен до тысяч, имеет порядок 10^{-9} м, т.е. 1 нанометр.

Чрезвычайная перспективность работы Биннига и Рорера была сразу же высоко оценена. И не столько тем, что они получили Нобелевскую премию, сколько последующей лавиной научных исследований, которая в истории развития человечества оказалась беспрецедентной по числу затронутых ею интересов. Здесь физика, электроника, биология, медицина, геронтология, кибернетика, экология, дизайн, искусство, религия, философия, фантастика и др. Человечество переживает сегодня то, что получило название nanoиндустриальной революции.

В свете перспектив нанотехнологии в высшей степени кстати пришлось работа того же Фейнмана, опубликованная в 1984 году, о возможности создания квантово-механической ЭВМ, логические элементы которой суть отдельные атомы. Тенденции этих возможностей таковы.

В 80-х годах использовались элементы ЭВМ с плотностью записи информации порядка 1 бит на 10^{11} атомов. Для типичного атомного объема 10^{-29} м³ однобитовый объем элемента памяти составляет 10^{-18} м³ и имеет линейный размер около 10^{-6} м = 1 мкм. Именно поэтому компьютерные чипы относятся к классу микроэлементов. В настоящее время размеры логических элементов ЭВМ приближаются к нанометровому диапазону, но еще не достигли его. Специалисты утверждают, что производство наноэлементов, т.е. чипов с плотностью порядка 1 бит на $10^2 - 10^3$ атомов, начнется в ближайшие 10 лет, несмотря на пока что не преодоленные трудности. Дело в том, что сегодня интегральная схемотехника носит планарный (т.е. плоский) характер, переход же к объемным структурам потребует промышленной доработки нанотехнологических методов. Перспектива построения чипов с плотностью 1 бит на 1 атом видится пока что отдаленной, но общая тенденция хорошо видна. Суть ее – в неуклонной миниатюризации компьютерной памяти с целью разработки

технологии так называемых терабитных кристаллов. Уже сегодня в США и Японии существует ряд проектов стоимостью от сотен миллионов долларов, объединяющих десятки частных фирм и государственных учреждений, направленных на разработку нанотехнологий.

Вот на этом пути и появилось то, что сейчас называют загрузкой. Идею загрузки легко представить, основываясь на нанотехнологических разработках. Берем индивидуальный человеческий мозг, в коре которого по оценкам экспертов содержится около 10^5 нейронов в 1 мм^3 . Учитывая, что кора мозга занимает объем около 10^{-3} м^3 , определяем полное число нейронов – по порядку величины это 10^{11} . Предполагая, что память человека построена из расчета не менее 1 бит на 1 нейрон, т.е. что полный объем информации составляет не менее 10^{11} бит, проводим понейронное сканирование (т.е. считывание характеристик физического состояния) коры головного мозга. Далее либо загружаем эту информацию в терабитные чипы емкостью по 10^{12} бит, которыми можно оснастить персональный компьютер или робота-полицейского, либо отправляем гулять по всемирной компьютерной паутине. Считанная информация имеет личностный характер, и потому возникают основания наделить этот индивидуализированный поток информации способностью принимать самостоятельные решения, т.е. порождать новую информацию, а значит – мыслить.

Итак, гипотетическое нечто, полученное сканированием мозга человека и загрузкой соответствующей информации в компьютерную систему, называется состоянием виртуальной реальности и определяет образ, возникший на основе нанотехнологических достижений.

Негативная реальность. Подойдем к этой теме с другой стороны, опуская пока что загадочный момент сканирования.

Представьте конструктор из всевозможных наборов атомов. Вы за рабочим столом собираете из атомов шарик, кубик, колечко. Форму этих предметов можно восстановить по памяти. Но если вы задались целью воспроизвести снежинку, вам понадобится по меньшей мере ее фотография, а лучше подробная карта расположения всех атомов. Эти мысленные эксперименты обращаются к тому, что принято считать неживой материей. Поэтому эксперимент продолжается, и теперь вы хотите сконструировать молекулу ДНК – одну из составляющих нейрона головного мозга. Чего проще – вот атлас

карт расположения атомов в молекулах разных типов. Распаковывайте купленные в магазине атомы и собирайте!

А давайте-ка прежде посмотрим в картах или иных руководствах, какая молекула в результате получится – живая или неживая? Нет ничего в современной литературе на этот счет. И на тот счет, если зададимся целью собрать нейрон или тем более мозг человека. Не знает современная наука, живым он будет или неживым, мыслящим или просто кучей атомов.

Вот место, где так иногда называемая традиционная наука отстала от прогрессивных веяний. Ее экспериментальная часть отстала в том, что до сих пор отсутствуют регулярные факты влияния внешних воздействий на человеческое мышление или, наоборот, мышления на измерительные приборы, а ее теоретическая – в том, что до сих пор нет понимания, чем же отличается живая группа молекул от неживой, мыслящая от немыслящей. И понимания не словесного, кто длиннее и мудренее скажет, а понимания конструктивного, созидательного, т.е. такого понимания, на основании которого окажется возможным создать искусственный интеллект. Критерий здесь однозначен. Знаешь механизм возникновения и передачи электромагнитной волны или мысли – умеешь сделать радиоприемник или искусственный мозг.

В то же время, экспериментальные физика и биология могут уже сейчас манипулировать отдельными атомами и молекулами и собирать атомные кластеры, т.е. то элементарное, из чего состоит и живое и неживое, и мыслящее и не очень мыслящее. (Хотя, надо признаться, все это пока что возможно в условиях научной лаборатории. До статуса промышленного применения сегодня доведен лишь нанотехнологический контроль компакт- и DVD-дисков.) Поэтому идет поиск. Ищут все: теологи, биологи, физики и, конечно, фантасты.

На этом терновом пути прежде всего надо заметить, что никакое самое совершенное нанотехнологическое воспроизведение исходного живого или мыслящего образца принципиально не может привести ни к созданию полного дубликата, ни даже к объяснению причин его отличия от оригинала. Дело в том, что считывание физических состояний атомов проводится измерительными приборами, т.е. просканировать можно только то, что можно измерить. Но человек не придумал еще устройства, способного регистрировать мысль. Трудность в том, что мысль, судя по всему, не может быть выражена статическим набором молекул, атомов, ионов или электронов.

Мысль — это процесс, движение. Известно, что движется, но не известно как.

Итак, попытка человечества создать искусственный интеллект неизбежно должна быть связана с поиском механизма работы мозга, данного нам природой, Богом. Но делать это надо, основываясь на современных представлениях о мире, на многовековом опыте человечества, говорящем о безусловной преемственности знаний и отвергающим если не сами интеллектуальные и экспериментальные попытки выскочить в запредельное, то, во всяком случае, ожидание от них каких-либо конструктивных, т.е. созидательных или общепользовательных следствий.

Но правоверная, строго придерживающаяся своих принципов наука пока молчит. Причина проста. С одной стороны, имеется отличный вариант модели мозга: сложная интегральная система, включающая конечное число элементов, работающих на основе переноса электронного заряда или возбуждений в электронной подсистеме и, как следствие, приема и передачи информации, закодированной в терминах характеристик электромагнитного поля. А с другой стороны, вот уже более 100 лет практического использования подобных систем не привели ни случайно, ни целенаправленно к установлению факта влияния электромагнитного поля на процесс мышления.

Другими словами, с одной стороны, имеется компьютер как наиболее яркое выражение названного отличного варианта модели мозга, а с другой стороны, всегда можно найти соответствующий набор параметров внешнего электромагнитного поля, который будет не разрушать, но заданным образом изменять работу резисторов, конденсаторов, транзисторов и всех других компонентов интегральных схем, начинающих этот компьютер.

Так может ли сегодняшний или будущий, пусть даже супермощный, построенный на тера chips, компьютер являться хотя бы приближенной моделью мозга человека? Похоже, что нет.

Перспективная реальность. Теперь вы вправе спросить: неужели не существует других моделей работы мозга? Ситуация здесь сложная. Представьте, человек, незнакомый с физикой, хочет понять механизм работы автомобиля. На чем ему остановить взгляд? На колесах, системе зажигания, карбюраторе, двигателе или бензобаке? Наконец, он может сообразить, что все дело в сгорании бензина, и объявить это механизмом работы автомобиля. Многие будут удовлетворе-

ны. Но согласитесь, что от этого умозаключения до цикла Карно еще очень большой путь. Так же и с механизмом работы нейрона. Известны структура, химический состав, характер диффузионных потоков, тепловые режимы, распределения электрических и магнитных полей, электро- и теплопроводность и многое другое, но на вопрос, какой физический процесс формирует мысль человеческую, ответа до сих пор нет.

А не попытаться ли нам сначала самим прощупать почву для построения качественно новой, не электромагнитной модели мозга, модели, основанной не на переносе электронов или каких-нибудь других заряженных частиц или возбужденных состояний этих частиц?

Отметим сразу же в сторону попытки использования чего-либо потустороннего, вроде биополя. И вспомним, что для передачи информации, не говоря уже о ее создании, нужен материальный носитель. Выбор здесь невелик. Человечеству известны только две требуемые субстанции: электромагнитное поле и вещество, составленное из атомов, которые в свою очередь состоят из протонов и нейтронов, образующих ядро атома, и электронов, распределенных в окрестности ядра и, кстати, занимающих большую часть атома. Протоны и электроны заряжены. Поэтому произвольно взятый кусочек вещества объединен силами межатомных связей, имеющих электромагнитную природу, но в равновесном состоянии этот кусочек является «электромагнитнонейтральным».

Зададимся вопросом: каким образом с помощью нейтрального набора атомов, находящихся в сложных электромагнитных взаимодействиях, можно создавать или передавать информацию без нарушения электронейтральности? Ответ очень прост. Толкнем близлежащую группу атомов образца. Поскольку атомы объединены межатомными силами, а образец в целом представляет собой в той или иной мере упругую среду, привнесенное возмущение в виде смещений атомов из исходных равновесных позиций будет распространяться по образцу. Задавая определенный характер силового воздействия на один конец образца, на другом его конце будем получать через некоторое время сигнал, аналогичный исходному.

Как уже говорилось, для выяснения влияния электромагнитного поля на работу мозга можно поместить себя в ядерный томограф. А куда бы поместить свою голову для выяснения влияния силовых воздействий? Простейший эксперимент

здесь не нуждается ни в какой аппаратуре – упругие волны существуют повсеместно. Тикают часы, доносится разговор из телевизора, мелодично звонит телефон – это дома. На улице: шум листвы, хлопанье дверей, визг тормозов, рев самолета. Еще в природе: удар молнии, раскаты грома, грохот прибоя, гул землетрясения. Замечено ли влияние чего-либо названного на работу ума? Нет, не замечено. А вообще, могло ли бы происходить устойчивое образование мыслей в мозгу, функционирующем на основе упругих волн, в условиях полного шумового беспредела, устраиваемого и природой, и самим суетливым человечеством? Перестраховался Создатель наш, упрятал механизм работы мозга подальше от него.

Впрочем, можете поэкспериментировать сами. Попробуйте в лабораторных условиях с помощью наушников и звукового генератора определить нижнюю и верхнюю границы частот звуковых волн, воспринимаемых ухом, т.е. попросту слышимых. С нижней границей проблем не будет. Ниже 20 Гц мембрана наушников перестает издавать чистый тон и переходит на щелчки. Результат в 20 ± 10 Гц нас вполне устроит. Трудности возникают с верхней границей. Невозможно с той же точностью уловить изменение уровня громкости на частотах выше 18 кГц, т.е. там, где должен располагаться верхний порог слышимости. Кажется, что звук продолжает быть слышимым, т.е. возникает иллюзия звука, и невозможно точно зафиксировать момент падения чувствительности уха к генерируемым наушниками упругим колебаниям. Этот эксперимент нельзя повторять часто, достаточно убедиться в существовании этой иллюзии, иначе разболится голова.

Хотелось бы, конечно, основываясь на этом опыте, т.е. на существовании звуковой иллюзии, признать, что существует некий тип, если так можно сказать, не разрушительного, но конструктивного взаимодействия упругих волн с мозгом. Но возникает новая проблема. Частоты порядка 10^4 Гц создают упругие волны с длиной порядка сантиметра, т.е. в упругой волне, распространяемой по мозгу, колеблются относительно друг друга огромные объемы, в которых число атомов превосходит 10^{23} . Это значит, что если элемент человеческой памяти даже не атом, не наночип, а хотя бы микрочип с числом атомов 10^{11} , то в такой звуковой волне должно одновременно смещаться около 10^{12} ячеек памяти. Ясно, что управление одной из этих 10^{12} микрометровых ячеек звуковой волной с длиной волны порядка сантиметра невозможно. Столь длинная волна

не может изменить состояние одной ячейки, не затронув при этом соседние. (Так же и морской прибой окатывает или не окатывает всех, находящихся на одинаковых расстояниях от края берега.) Иными словами, уж если упругие волны и принимают участие в формировании процесса мышления, то их длина должна быть не больше нанометра – типичного размера молекулярных конструкций, образующих мозг. (Например, диаметр молекулы ДНК составляет 2 нм.) Для генерации таких волн нужны частоты упругих колебаний выше сотен гигагерц.

Стоп! Что-то здесь есть. Настораживает, что именно до этого частотного уровня упругих колебаний современная экспериментальная техника еще не добралась. Сегодня нет возможности регулярного воспроизведения гиперзвука сверх-высоких частот при условии контролируемости изменений его параметров как необходимого условия для постановки физического эксперимента. Тем не менее для любопытного человечества отсутствие экспериментальных данных никогда не было помехой на пути исследования природы. Так, физика атомных ансамблей стала понятной во времена Максвелла и Больцмана, но только после их смерти было найдено экспериментальное подтверждение существования атомов.

К настоящему времени разработаны десятки механизмов для хранения и передачи информации в биологических и вообще молекулярных структурах. Среди них есть и модели, близкие к упругим. Кратко остановимся на общепризнанно неверной, но тем не менее до сих пор цитируемой модели, предложенной в 70-х годах замечательным английским физиком Гербертом Фрелихом. Для объяснения способа передачи информации в биосистемах он предложил механизм генерации упругих колебаний среды, состоящей из заряженных частиц, с частотой порядка 10^{12} Гц. Но колебания в этой области частот имеют квантовый характер. Это плохо, потому что при переходе нейрона (или какой-либо его составляющей) из одного состояния в другое он должен оставаться в предыдущем состоянии достаточно долго для того, чтобы управляющее воздействие могло однозначно перевести нейрон в новое состояние. Это требование не выполняется для колебательных состояний с временами жизни 10^{-12} с. Поэтому Фрелих предложил использовать концепцию так называемого когерентного возбуждения – классического пакета упругих волн, построенного из квантовых состояний. Распространяется такой пакет со скоростью обычного звука и, главное, может

надолго изменить деформационное состояние нейрона. Модель Фрѐлиха детально не прорабатывалась из-за того, что, как вскоре выяснилось, образование таких когерентных пакетов невозможно. Однако она очень привлекательна в концептуальном плане, а именно с точки зрения отказа от электромагнитного принципа устройства ячейки памяти и перехода к деформационному.

В этой связи обращает на себя внимание тема деформируемости биологических объектов. Еще в 1678 году голландский исследователь А. Левенгук заметил, что, когда он был сильно болен, эритроциты его крови выглядели жесткими и недеформируемыми, но становились мягче и податливее, когда он выздоравливал. Однако за три столетия, прошедшие с тех пор, установлено лишь, что упругость, т.е. способность эритроцитов обратимо менять свою форму под действием внешних сил, относится ко всем типам биологических объектов, в том числе и к нейронам. И экспериментальные, и теоретические попытки понять механизм этой деформируемости остаются пока что безуспешными.

Подводя итог перспективной реальности, зададимся вопросом: не является ли согласованность отсутствия экспериментальной техники сверхгиперзвука и удовлетворительного объяснения деформируемости биологических нанообъектов той красной нитью, которая приведет к пониманию механизма работы человеческого ума? К тому же, сегодня исследование того, каким образом молекулярная конструкция наноскопических размеров откликается на действие сторонних сил, т.е. исследование упругих свойств нанокристаллов, является одной из разрабатываемых ветвей нанотехнологии. Может быть, именно анализ силовых воздействий на молекулы, атомные кластеры или нанокристаллы сможет дать ответ на вопрос «Что есть мысль?» и, следовательно, откроет путь к созданию искусственного интеллекта?

В качестве заключения и, если хотите, руководства к раскрытию тайны мозга приведем научную позицию одного из основателей биофизики Эмиля Дюбуа-Реймона, работавшего в середине прошлого века. В блестящей книге М. Б. Беркинблита и Е. Г. Глаголевой «Электричество в живых организмах» (Библиотечка «Квант», вып.69) она выражена следующим образом: «Нельзя приписать частицам материи в организме каких-либо новых сил, которые бы не действовали и вне организма».

САМАЯ ГЛАВНАЯ МОЛЕКУЛА

М.Д. Франк-Каменецкий

*Потрясающие вещи происходят в биологии.
Мне кажется, Джим Уотсон сделал открытие,
сравнимое с тем, что сделал Резерфорд в 1911
году.*

Макс Дельбрюк (из письма Нильсу
Бору от 14 апреля 1953 года)

Из всего, что нас окружает, наиболее необъяснимой кажется жизнь. Мы привыкли, что она всегда вокруг нас и в нас самих, и потеряли способность удивляться. Но пойдите в лес, взгляните на деревья, траву, цветы, на птиц и муравьев так, будто видите их впервые, и вас охватит чувство беспомощности перед лицом великой тайны жизни. Неужели во всем этом есть нечто общее, нечто такое, что объединяет все живые существа, будь то человек или невидимый глазом микроб? Чем определяется преемственность жизни, ее возрождение вновь и вновь из поколения в поколение? Эти вопросы стары, как мир, но только нам, живущим во второй половине XX века, посчастливилось впервые узнать ответы.

Революционные преобразования, произошедшие в физике в первой трети нашего века, оказали глубокое влияние на другие области науки, в первую очередь — на химию и биологию. Одной из главных вех на пути создания новой физики было открытие Резерфордом в 1911 году атомного ядра. Само существование «атома Резерфорда» находилось в вопиющем противоречии с классической теорией. Начался период создания новой физики, известной теперь как квантовая механика. Эта новая теория, разработка которой была начата Планком, Эйнштейном и Бором, нашла свою окончательную и замечательно ясную формулировку в знаменитом уравнении Шредингера. Это уравнение не только позволило физикам решать все «головоломки», которые накопились в области атомных спектров, но, будучи дополнено принципом

Паули, поставило на прочный теоретический фундамент всю химию. Наконец-то стал понятен смысл атомного номера в таблице Менделеева, ясен истинный смысл валентности, выяснена природа химической связи.

У физиков появилось ощущение всемогущества. И их взоры обратились к святой святых – к самой жизни. Не поможет ли новая физика разгадать тайну жизни? Или, может быть, наоборот – удастся доказать, что жизнь противоречит квантовой механике, и тогда придется «изобретать» какие-то новые законы. Это было бы особенно интересно.

...В августе 1932 года в Копенгагене проходил Международный конгресс по светотерапии. На одном из заседаний выступил Нильс Бор. Его лекция называлась «Свет и жизнь». В ней Бор поделился своими мыслями о проблеме жизни в связи с последними достижениями квантовой механики. На лекции присутствовал молодой немецкий физик-теоретик, стажер Института Бора в Копенгагене Макс Дельбрюк. До сих пор он никогда не интересовался биологией. Он занимался квантовой химией, потом ядерной физикой, но не мог найти себе занятие по вкусу. Лекция Бора все определила: Дельбрюк твердо решил, что отныне он посвятит себя биологии.

Вернувшись в Берлин, Дельбрюк стал искать контактов с биологами. Ему повезло. В это время в Берлине работал известный генетик Николай Владимирович Тимофеев-Ресовский. Продолжавшиеся всего несколько лет дружба и сотрудничество физика Дельбрюка и генетика Тимофеева-Ресовского явились тем началом, из которого двадцать лет спустя родилась разгадка тайны наследственности.

Дельбрюк стал собирать у себя дома друзей-физиков и приглашать Тимофеева-Ресовского, который часами обучал их своей науке – генетике. Рассказывая, Тимофеев-Ресовский бегал, по своему обыкновению, из угла в угол, словно тигр в клетке. Он говорил о математически строгих законах Менделя, управляющих наследственностью. О генах и о замечательных работах Моргана, установившего закономерность расположения генов в хромосомах. О плодовой мушке дрозофиле и о мутациях, которые можно вызвать у нее рентгеновским излучением. Этим последним вопросом он как раз занимался вместе с физиком-экспериментатором Циммером.

Дельбрюка крайне заинтересовала их работа. Вообще в генетике было столько созвучного квантовой механике! Ведь квантовая механика принесла в физику дискретность, скачкообразность. Она также заставила серьезно относиться к

случайности. И вот оказывается, что биологи тоже обнаружили дискретную неделимую частицу наследственности – ген, – которая может случайным образом переходить из одного состояния в другое (этот переход называют мутацией).

Что же такое ген? Как он устроен? Об этом часто спорили на вечерах у Дельбрюка. Тимофеев-Ресовский говорил, что вообще-то этот вопрос мало интересует генетиков. Для них ген – то же, что для физиков электрон. Ген – элементарная частица наследственности.

– Что вы ответите, если я спрошу, из чего состоит электрон? – сказал однажды Тимофеев-Ресовский. Все рассмеялись.

– Вот так же смеются генетики, когда их спрашивают, из чего состоит ген. Вопрос о том, что такое ген, выходит за рамки генетики, и его бессмысленно адресовать генетикам, – продолжал он. – Вы, физики, должны искать ответ на него.

– И все-таки, – настаивал Дельбрюк, – неужели нет никаких гипотез, пусть чисто умозрительных?

– Есть, – ответил Тимофеев-Ресовский, немного подумав. – Мой учитель Николай Константинович Кольцов считает, что ген – это полимерная молекула, скорее всего – молекула белка.

– Ну и что это объясняет? – тощий, длинный Дельбрюк прямо-таки кричал на широкоплечего, могучего Тимофеева-Ресовского. – Оттого, что мы назовем ген белком, мы поймем, как гены удваиваются? Ведь главная-то загадка именно в этом! Не ты ли рассказывал нам, как характерная форма губы переходила из поколения в поколение в роду Габсбургов? Какой механизм обеспечивает столь точное копирование генов в течение веков? Разве химия дает нам такие примеры? Во всяком случае, я никогда ничего подобного не слышал. Нет, тут нужна совершенно иная идея. Тут действительно таится загадка. Великая загадка. Возможно, новый закон природы. Сейчас главный вопрос – как к этому подступиться экспериментально.

Великая тайна, скрывавшаяся за коротким словом «ген», не давала покоя Дельбрюку. Как происходит удвоение, или редупликация, генов при делении клеток? В особенно сильное возбуждение пришел Дельбрюк, когда узнал о существовании бактериофагов. Эти удивительные частицы, которых и живыми-то не назовешь, вне клетки ведут себя просто как большие молекулы – из них даже выращивают кристаллы. Но если такая частица попадает в клетку, то минут через двадцать

клеточная оболочка лопается, и из нее вываливается сотня точных копий исходной частицы. «Вот он — ключ к разгадке, — думал Дельбрюк. — Это очень простое явление, гораздо более простое, чем деление целой клетки. Здесь нетрудно будет разобраться. В самом деле, надо посмотреть, как внешние условия будут влиять на воспроизводство вирусных частиц. Надо провести эксперименты при разных температурах, в разных средах, с разными вирусами».

Так физик-теоретик превратился в биолога-экспериментатора. Но мышление осталось чисто физическим. А главное — цель. Во всем мире не было другого человека, который занимался бы вирусами с единственной целью — узнать, как устроен ген.

...В 1937 году Дельбрюка приглашают работать в США, где он мог бы целиком посвятить себя проблеме редупликации бактериофагов. Он спешит воспользоваться этим предложением, так как жизнь в нацистской Германии становится невыносимой.

В Америке Дельбрюк собрал вокруг себя горстку энтузиастов, заразившихся его идеей изучения природы наследственности на бактериофагах. Так возникла «фаговая группа». Шли годы, и участники фаговой группы все больше и больше узнавали о том, как протекает фаговая инфекция, как процесс воспроизведения фагового потомства зависит от внешних условий и т.д. Было проведено много замечательных исследований, в особенности в области изучения мутаций у бактерий и бактериофагов. Но все это, казалось, даже не приближало к решению основной проблемы.

Как часто бывает в науке, люди, объединившиеся для решения большой и важной задачи, постепенно занялись скрупулезным изучением частных вопросов, сделались мастиными специалистами в своих конкретных областях, но перестали видеть перед собой исходные цели. Так путники видят издали сияющие горные вершины, но затем, приближаясь к ним, попадают в лесистые предгорья, откуда этих вершин не видно. Эти леса изобилуют грибами, ягодами... Если долго бродить по предгорьям, то виденные издали снежные вершины начинают казаться миражем. Может быть, это были лишь облака, похожие на снежные горы? Но даже если это и в самом деле были горы, зачем туда спешить? Ведь здесь, в этих нехоженных лесах, так хорошо. Чтобы люди вновь вспомнили о цели, нужен громкий голос лидера. И такой голос прозвучал. Это был голос замечательного физика-

теоретика, одного из создателей квантовой механики Эрвина Шредингера.

В 1944 году вышла в свет небольшая книга Шредингера под броским заголовком «Что такое жизнь с точки зрения физики?». Тогда она не привлекла почти никакого внимания. Шла война, и большинство тех, кому была адресована книга, с головой ушли в научно-технические проблемы, от решения которых во многом зависел исход борьбы с фашистской Германией. Но когда война кончилась, появилось много специалистов, особенно среди физиков, которым надо было все начинать сначала, снова искать себе место в мирной науке — вот для них книжка Шредингера оказалась как нельзя кстати.

В своей книге (на русском языке она вышла впервые в 1947 году) Шредингер прежде всего дал очень ясное и сжатое изложение основ генетики. Для физиков это была уникальная возможность узнать, причем в блестящем и, главное, доступном изложении их прославленного коллеги, в чем же состоит суть этой загадочно привлекательной науки. Но мало того. Шредингер изложил и блестяще развил идеи Дельбрюка и Тимофеева-Ресовского о связи генетики и квантовой механики. Пока эти идеи выдвигались неизвестными физикам людьми, на них не обращали особого внимания. Но когда об этом заговорил сам Шредингер... По признанию всех, кто в последующие годы штурмовал проблему гена, именно книга Шредингера послужила для них главным толчком. Шредингер был тем, кто как бы крикнул: «Вот они, сияющие вершины, посмотрите — они совсем уже близко. Что же вы мешкаете?»

Из многих, откликнувшихся на призыв Шредингера, двоим посчастливилось первыми увидеть дали, открывавшиеся с самого верха. Это были совсем еще юный воспитанник фаговой группы Джим Уотсон и сотрудник прославленной Кавендишской лаборатории Фрэнсис Крик. Не будем подробно проследживать их путь к вершине — об этом рассказал сам Уотсон в своей книге «Двойная спираль». Давайте попробуем кратчайшим путем достичь этой вершины, одной из величайших, когда-либо покоренных человеком, и хоть чуть-чуть ощутим те чувства, которые испытали первопроходцы и те, кто шел за ними следом.

Будучи одержим идеей узнать, как устроен ген, и считая, что фаговой группе эта задача не по плечу, Уотсон в 1951 году едет работать в Европу. Вскоре он «осел» в Кавендишской лаборатории, так как встретил там Крика, который был

настроен так же по-боевому, как и он сам. Уотсон к тому времени уже был уверен, что ключ к разгадке тайны гена – в выяснении структуры ДНК.

Дело в том, что в том же 1944 году, когда вышла книга Шредингера, в одном из медицинских журналов была опубликована статья трех американских бактериологов во главе с шестидесятилетним Эвери, которая в послевоенные годы привлекла в гораздо большей степени внимание генетиков, химиков и физиков, чем медиков. В этой скрупулезно выполненной работе было абсолютно однозначно доказано, что когда из убитой бактерии некоторые генетические признаки передаются другой, живой бактерии (это явление было к тому времени уже давно известно и называлось трансформацией), то происходит передача только молекул дезоксирибонуклеиновой кислоты (ДНК). Ни белки, ни какие-то другие составляющие убитой клетки в трансформации не участвуют. Собственно, эта работа Эвери теперь считается первым доказательством того, что гены представляют собой именно молекулы ДНК. Так что же, Эвери со своими двумя помощниками, а вовсе не Уотсон и Крик впервые побывали на вершине?!

Бесспорно, Эвери сделал очень важный шаг в нужном направлении, но до вершины он не добрался. Эйнштейн как-то сказал изумительные по своей глубине слова: «Лишь теория решает, что мы ухитряемся наблюдать». У Эвери не было в запасе ничего такого, что можно было бы назвать теорией, и он ограничился сухим изложением фактов. Это, однако, не делало проблему менее острой. Генетики оказались перед выбором – либо надо отказаться верить данным Эвери, либо признать, что веществом наследственности является ДНК, а не белок, как принято было считать. Не верить Эвери было трудно – в его работе просто не к чему было придаться. И все-таки генетики ни за что не хотели отказаться от устоявшегося представления о белковой природе гена. Опытам Эвери было дано следующее объяснение: ДНК, конечно, никаких генов не содержит и содержать не может, но она может вызывать генные мутации, т.е. изменять гены, которые, как им и положено, состоят из белка. Такое объяснение спасало белковую теорию гена. Правда, действие ДНК оказалось весьма необычным: вызываемые ею мутации повторялись от опыта к опыту. И это, конечно, не могло не заинтересовать генетиков, уже давно искавших способы направленного изменения наследственности. И генетики, и все, кто занимался проблемой химической (или физической) природы

наследственности, вынуждены были, наконец, признать, что на ДНК следует обратить серьезное внимание.

Дело в том, что, хотя ДНК была открыта Мишером еще в 1869 году, она оставалась «падчерицей» даже у биохимиков, не говоря уж о генетиках или физиках, занимавшихся биологией. Было общепризнанно, что ДНК – это регулярный полимер, состоящий из строго повторяющихся четверок мономерных звеньев (аденинового, гуанинового, тиминового и цитозинового), и эта молекула, скорее всего, выполняет какую-то чисто структурную функцию в хромосомах, но ни в коем случае не связана с хранением и передачей генетической информации. Работа Эвери заставила усомниться в этих взглядах.

Той теорией, которая решила, что же на самом деле ухитрились наблюдать Эвери и его последователи, была модель строения молекулы ДНК, придуманная Уотсоном и Криком в 1953 году.

Если отбросить детали, то суть модели Уотсона – Крика предельно проста. Молекула ДНК состоит из двух полимерных цепочек. Каждая из цепочек представляет собой некоторую последовательность из звеньев четырех сортов – А (адениновое), Г (гуаниновое), Т (тиминовое) и Ц (цитозиновое). Последовательность в одной из двух цепей может быть совершенно произвольна. Тогда последовательность в противоположной, или, как говорят, комплементарной, цепи однозначно задается с помощью следующего принципа комплементарности (рис.1):

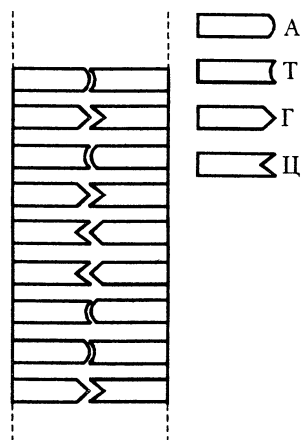


Рис. 1

против А должно быть Т,
против Т должно быть А,
против Г должно быть Ц,
против Ц должно быть Г.

Принцип комплементарности был выведен из известного к тому времени пространственного строения мономерных звеньев ДНК. В этом Уотсон и Крик следовали общему методу построения молекулярных моделей, разработанному Лайнусом Полингом. Если внутри каждой из взаимно комплементарных полимерных цепочек атомы скреплены очень мощными ковалентными связями, то между це-

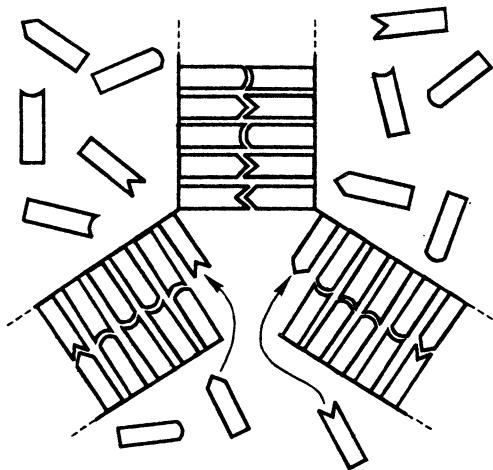


Рис. 2

почками действуют сравнительно слабые связи, подобные тем, которые удерживают молекулы друг возле друга в кристаллах.

Самой замечательной особенностью модели Уотсона – Крика было то, что она с необыкновенным изяществом решала главную проблему – проблему редупликации гена. Ведь если мы разведем две нити, а потом на каждой нарастим, согласно принципу комплементарности, по новой нити, то мы получим из одной молекулы ДНК две, причем обе будут идентичны исходной (рис.2).

Можно себе представить, в какое возбуждение пришел Дельбрюк, когда получил от Уотсона письмо, содержащее решение загадки удвоения гена. Он сразу и безоговорочно поверил в модель Уотсона – Крика. Под впечатлением письма Уотсона он и написал те слова, которые мы привели в качестве эпиграфа. Конечно, он тогда испытывал особую благодарность Бору за то, что тот вдохновил его в свое время заняться биологией. Нет, новых законов физики в биологии не обнаружили. Но центральную проблему, проблему физического строения гена, решить удалось.

Молекула ДНК – не просто «веревочная лестница», как можно подумать, глядя на рисунок 1. Уотсон и Крик, исходя из данных рентгеноструктурного анализа, полученных Морисом Уилкинсом и Розалиндой Франклин, пришли к заключению, что она представляет собой двойную спираль, точнее –

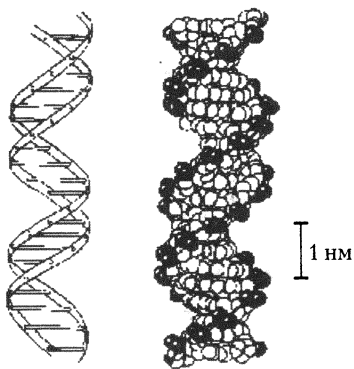


Рис. 3

винтовую линию (рис.3). При этом нити ДНК закручены вправо (т.е. так же, как нарезка на шурупах и винтах) и полный оборот спираль делает через 10 звеньев. Все эти подробности были важны, потому что позволяли сравнивать модель с физическим экспериментом.

Не только Дельбрюк, очень многие были сразу покорены красотой модели. И хотя некоторые генетики продолжали держаться за белки как за палочку-выручалочку, их единственным аргументом остался

такой: не может быть, чтобы такая сложная штука, как жизнь, была в своей основе устроена так просто. Аргумент, прямо скажем, не из сильных.

Так было установлено, что ДНК является самой главной молекулой живой природы. Теперь, много лет спустя, можно констатировать, что открытие структуры ДНК действительно сыграло в развитии биологии такую же роль, какую для развития физики сыграло открытие атомного ядра. Подобно тому как выяснение строения атома привело к рождению новой, квантовой, физики, открытие строения ДНК привело к новой, молекулярной, биологии.

Эту параллель можно продолжить. Чисто теоретические исследования атома привели к овладению человеком практически неисчерпаемым источником энергии. Аналогично, молекулярная биология привела в последние годы к возможности неслыханным образом вмешиваться в самые интимные свойства живой клетки, изменяя направленным образом ее наследственность. Это, безусловно, окажет в будущем не менее радикальное воздействие на жизнь людей, чем овладение энергией атомного ядра.

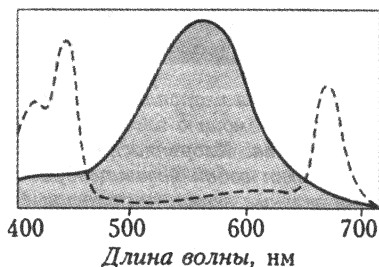
«ЗЕЛЕНАЯ, ЗЕЛЕНАЯ ТРАВА...»

И.Э.Лалаянц, Л.С.Милованова

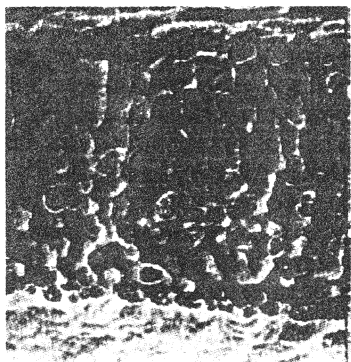
Так пелось в некогда популярной песне. И вряд ли при этом кто-нибудь задумывался: а почему действительно трава зеленая? А если задать этот вопрос?

Стандартный ответ можно предугадать: трава зеленая потому, что в ней содержится хлорофилл. А почему он зеленый? Известно, что в процессе фотосинтеза хлорофилл поглощает световую энергию и превращает ее в энергию химическую — энергию связей органических веществ. При этом поглощает он избирательно — в синей области спектра (длина волны около 450 нм) и в оранжевой (примерно 670 нм). А зеленые, желтые и красные лучи пропускает практически не поглощая. На зеленую область спектра солнечного света приходится максимум энергии. И глаз наиболее чувствителен к зеленому свету... Вот, пожалуй, и ответ. Но из него возникает чисто практический вопрос: как же так получилось, что эволюция лишила высшие растения большого куска энергии? Почему центральная, наиболее энергоемкая, часть солнечного спектра используется так неэффективно? Для того чтобы разобраться в этом вопросе, необходимо заглянуть в глубь веков — на три с лишним миллиарда лет назад.

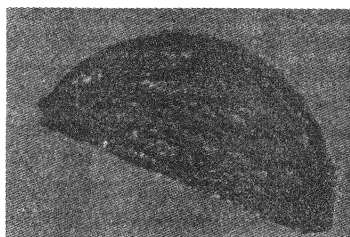
До этого времени жизненная энергия черпалась из накопленных природой органических источников. Но эти запасы были небесконечны, и наступило время, когда для дальнейшего развития жизни стали необходимы новые источники энергии. Единственный такой источник для биосферы — солн-



Спектры поглощения бактериородопсина и хлорофилла (пунктирная кривая)



Поперечный срез зеленого листа (снимок сделан с помощью электронного микроскопа). Хорошо видны поверхностные слои клеток, защищающие лист сверху и снизу. В середине листа — клетки, в которых находятся многочисленные хлоропласты (они видны как зернистая структура внутри срезанных клеток). В этих зеленых пластидах и происходит фотосинтез



Фотография хлоропласта, полученная с помощью электронного микроскопа. Хлоропласты представляют собой чечевицеобразные зеленые зерна, построенные из мембран (тонкие полоски на снимке), в которых располагаются белковые комплексы, несущие хлорофилл (темные участки мембран). Именно в этих участках происходит фотосинтез

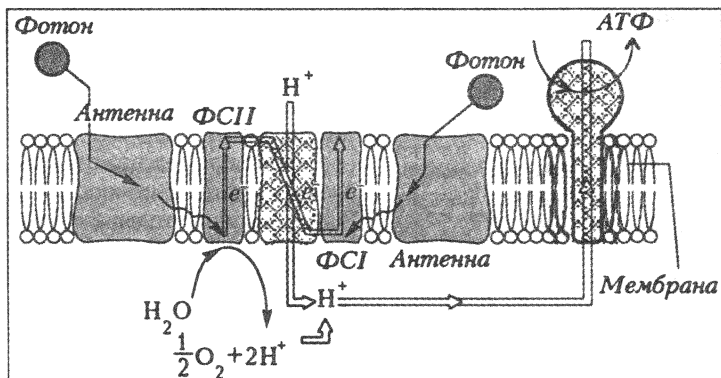
це. Но чтобы воспользоваться этой энергией, необходимы были, прежде всего, светоулавливающие устройства. И природа создала их в виде молекул так называемого бактериородопсина.

Бактериородопсин (БР) представляет собой белок, соединенный с ретиналем — молекулой, реагирующей на свет: она может поднимать и опускать хвост. Когда света нет — хвост опущен, когда же на молекулу ретиналя падает квант света (фотон) — хвост поднимается и запускает каскад реакций в мембране бактериальной клетки.

Мембрана представляет собой двойной слой жирных молекул. Это оболочка клетки, отгораживающая ее от внешней среды. Жизнь тем и отличается от неживой природы, что может отгородиться от своего окружения. Но не совсем, не абсолютно. Она общается с внешней средой через мембрану — ведь клетка должна питаться, получать энергию, выбрасывать наружу отходы своей жизнедеятельности и т.д. Делается это все с помощью мембранных белков-переносчиков, одним из которых и является БР. Бактериородопсин был открыт у соелюбивых бактерий, или галобактерий (от греческого «гало» — соль), живущих в рассолах с концентрацией соли до 20%.

С самого начала клетки нуждались в активном удалении из них ионов водорода — протонов (p^+), которые постоянно рождаются в процессе обмена веществ. Но снаружи концентрация протонов была примерно в сто раз выше, и для выталкивания их из клетки необходима была энергия. Вот эту-то энергию и начал улавливать БР. При поглощении фотона солнечного света хвост ретиналя выпрямляется и выбивает протон из клетки. Но поскольку «свято место не пустует», вместо p^+ в клетку поступает молекула питательного вещества. Молекулу БР можно сравнить с качелями, на одном конце которых сидит протон, а на другом — питательная молекула. Работают эти молекулярные качели за счет энергии солнца.

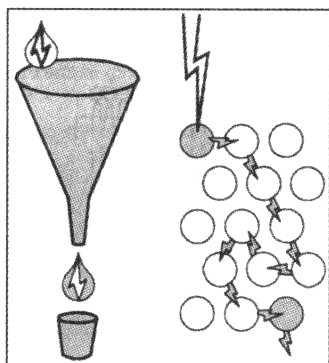
Но резкое уменьшение внутриклеточной концентрации p^+ привело к тому, что, по законам диффузии, наружные протоны еще активнее устремились внутрь клетки. И это стремление клетка приспособила себе на пользу: энергия проходящих сквозь мембрану протонов стала использоваться для образования АТФ.



Мембрана, в которой располагаются фотосинтезирующие системы (ФС), представляет собой двойной слой молекул жирных кислот, обращенных хвостами друг к другу (тонкие двойные искривленные линии), с которыми соединены остатки фосфорной кислоты (кружочки сверху и снизу). Толщина мембраны 4—4,5 нм. Фотоны солнечного света, падающие на мембрану, улавливаются антеннами и направляются на хлорофилл реакционных центров фотосистем. За счет кинетической энергии выбитого из хлорофилла электрона ФСII расщепляет молекулу воды; при этом в атмосферу высвобождается кислород, а в хлоропласте остается ион водорода. ФСI накачивает водород извне, и оба потока протонов направляются на АТФ-комплекс, который синтезирует АТФ

АТФ расшифровывается довольно просто: АденозинТри-Фосфорная кислота. Это — «ее энергетическое высочество» клетки, аккумулятор внутриклеточной энергии. Все процессы жизнедеятельности в живой природе идут за счет энергии АТФ. При распаде молекулы АТФ выделяется огромная (по масштабам клетки) энергия, которая идет на различные нужды клетки. Таким образом, галобактерии, эти живые ископаемые на Земле, которые возникли порядка трех-четырех миллиардов лет назад, сумели успешно запрячь фотон в энергетическую колесницу.

Однако расцвет микроорганизмов, содержащих в своей мембране БР, предопределил и их закат — они сошли со сцены эволюции. Ведь для того чтобы построить новую клетку, необходим углерод — все в нашем живом мире состоит из цепочек атомов этого элемента. Но галобактерии «выедали» все органические соединения, состоящие из цепочек углерода. В качестве оставшегося неиспользованным был только углекислый газ CO_2 , который постоянно выделялся из вулканов и накапливался в атмосфере. Но как усвоить, или, как говорят ученые, зафиксировать атмосферный CO_2 ?



Светоулавливающая антенна — гигантский комплекс, объединяющий до 300—400 молекул хлорофилла, — действует подобно воронке: она собирает фотоны и передает их энергию на реакционный центр, который срабатывает при поступлении на него одного-единственного фотона

Ведь чтобы перевести его в органическую форму, нужно его химически восстановить. А для этого необходима энергия.

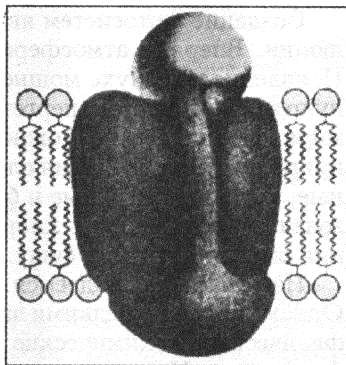
Галобактерии не стали решать задачу фиксации атмосферного CO_2 и вышли из игры, законсервировавшись на миллиарды лет в одноклеточном состоянии. На сцену вышли новые участники эволюции — обладатели хлорофилла. Конструктивное решение, придуманное природой, было очень четким. Мы уже говорили, что все процессы в клетке идут за счет АТФ. Следовательно, для того чтобы восстановить CO_2 , нужна дополнительная АТФ. Значит, нужны дополнительные протоны. Протоны можно взять из воды — там их неограниченное количество. Надо только расщепить эту воду,

для чего нужна... новая энергия.

Но большую часть энергии солнца уже улавливал БР галобактерий, и неиспользованными оставались только крайние области спектра солнечного света. Пустить эту энергию на нужды растительной клетки и призван был хлорофилл. Процесс синтеза органических веществ за счет световой энергии мы и называем фотосинтезом.

Для осуществления фотосинтеза природа сконструировала замечательное устройство. Улавливание фотонов происходит в гигантских комплексах, которые объединяют до 300 — 400 молекул хлорофилла. Эти светоулавливающие антенны находятся в мембране хлоропласта. Энергия уловленных отдельными молекулами фотонов передается на хлорофилл реакционного центра (РЦ). За счет этой энергии в РЦ из молекулы хлорофилла выбивается электрон, который улавливается системой молекул, способных передать его кинетическую энергию на фермент, расщепляющий воду. Освобождающийся кислород, который для растительной клетки является ядом, выделяется в атмосферу. А ионы водорода (H^+) поступают в АТФ-комплекс, синтезирующий дополнительную АТФ.

Систему, осуществляющую эту деятельность — от улавливания фотонов до высвобождения протонов из воды, называют фотосистемой II. Называют так потому, что есть еще фотосистема I, более старая в эволюционном отношении. Она была создана тогда, когда кислорода в атмосфере еще не было, и зеленые водоросли жили в воде, ведя борьбу с пурпурными не на жизнь, а на смерть. Именно эта система обеспечивала АТФ протонами до появления фотосистемы II.



Реакционный центр построен из трех белков, цепи которых имеют разные массы и строения. Две более мелкие цепи как бы окружены большой, имеющей длинный хоботок, поднимающийся с нижней поверхности мембраны к верхней (молекулы жирных кислот, образующих мембрану, представлены линиями в виде пилы, а остатки фосфорной кислоты изображены кружочками). Сверху расположена молекула белка цитохрома

Создание фотосистем является одним из достижений эволюции. Впервые атмосфера стала обогащаться кислородом. Появление в воздухе мощнейшего окислителя резко подстегнуло эффективность энергетических процессов во всем живом мире. Появилась возможность более активного творчества природы в деле создания сложных животных форм. Пурпурные, красные, багряные и бурые водоросли проиграли битву зеленым, обладающим хлорофиллом. Только зеленые растения смогли выйти на сушу.

Наш рассказ, надеемся, кажется простым и понятным. Однако мы лишь редкими штрихами обозначили сложнейшие физические и химические процессы, которые составляют фотосинтез. И многое еще неясно в этих процессах, ответы на многие вопросы еще только предстоит найти. Но успехи в исследовании фотосинтеза огромны. За работы в этой области уже присуждены две Нобелевские премии. На этой проблеме сконцентрировались усилия физиков и химиков, биологов и математиков. Лазеры и электронные микроскопы, мощные компьютеры и рентгеновские установки — все это использует наука для раскрытия тайн фотосинтеза.

Сегодня, конечно, еще далеко до практического применения знаний, полученных в ходе этих кропотливых и дорогостоящих работ. Но в перспективе видится возможность создания совершенно новых солнечных батарей, при конструировании которых будут использованы принципы построения фотосинтезирующих мембран. Такие источники энергии смогут производить ее экологически чисто и с большим КПД. Эта чистота, можно сказать стерильность, фотосинтеза особенно привлекает нас, живущих в загазованном и постоянно утепляющемся мире...

ХИЩНИК И ЖЕРТВА

К.Ю.Богданов

Вольтерра и Мальтус. Попытки математического описания динамики численности отдельных биологических популяций и сообществ имеют солидную историю. Одна из первых моделей динамики роста популяций принадлежит Т.Мальтусу (1766—1834), английскому экономисту и священнику.

В своем труде «Опыт о законе народонаселения» (1798 г.) Мальтус утверждал, что в человеческом обществе, как и во всей живой природе, существует абсолютный закон безграничного размножения особей. При этом рост населения Земли идет в геометрической прогрессии, в то время как средства существования увеличиваются лишь в арифметической. Мальтус, абсолютизируя роль биологических факторов в воспроизводстве населения, рисует жестокие последствия открытого им закона народонаселения: «Человек, появившийся на свет, уже занятый другими людьми, если он не получил от родителей средств к существованию, на которые он вправе рассчитывать, если общество не нуждается в его труде, не имеет никакого права требовать для себя какого-нибудь пропитания, ибо он совершенно лишний на этом свете. На великом пиршестве природы для него нет прибора. Природа приказывает ему удалиться, и если он не может прибегнуть к состраданию кого-либо из пирующих, она сама принимает меры к тому, чтобы ее приказание было приведено в исполнение». Врачебную деятельность Мальтус считал противоестественной, так как она сохраняет жизнь «лишним людям».

Модель Мальтуса в математической форме выглядит довольно просто. Пусть $N(t)$ – численность изучаемой популяции в момент t . Согласно Мальтусу, скорость прироста популяции прямо пропорциональна ее численности в данный момент:

$$dN/dt = aN,$$

где a — разность между коэффициентами рождаемости и смертности. Интегрируя это уравнение, получаем

$$N(t) = N(0)e^{at},$$

где $N(0)$ — численность популяции в момент $t = 0$. Очевидно, что модель Мальтуса при $a > 0$ дает бесконечный рост численности, что никогда не наблюдается в природных популяциях, где ресурсы, обеспечивающие этот рост, всегда ограничены. Изменения численности популяций растительного и животного мира нельзя описывать простым законом Мальтуса, на динамику роста влияют многие взаимосвязанные причины — в частности, размножение каждого вида саморегулируется и видоизменяется так, чтобы этот вид сохранялся в процессе эволюции.

Математическим описанием этих закономерностей занимается математическая экология — наука об отношениях растительных и животных организмов и образуемых ими сообществ между собой и с окружающей средой.

Первым успехом математической экологии стала модель, предложенная итальянским математиком Вито Вольтерра (1860—1940) в книге «Математическая теория борьбы за существование» (1931 г.). Интересна биография этого ученого, известного своими классическими работами по интегральному исчислению и функциональному анализу. Во многом она созвучна названию только что упомянутой книги.

Когда Вито было 2 года, умер отец, и семья осталась практически без средств к существованию. И все же, как это ни было трудно, Вито удается получить образование. Еще подростком он изучает дифференциальное исчисление; не зная интегрального исчисления, вновь открывает его. Он блестяще оканчивает естественный факультет университета во Флоренции. Вольтерра очень быстро завоевывает мировую известность своими работами в различных областях чистой математики. Но всегда его интересуют и прикладные задачи.

В 1925 году из бесед с молодым зоологом Умберто Д'Анконом он узнает любопытный факт из статистики рыбных рынков на Адриатике. Оказывается, когда в годы первой мировой войны и сразу после нее интенсивность промысла резко сократилась, то в улове выросла относительная доля хищных рыб. Чтобы объяснить это, Вольтерра предложил математическую модель, описывающую отношения между хищником и жертвой и происходящие при этом изменения их численности. Математическая экология в дальнейшем

становится его основной темой, и он занимается ею до конца жизни.

В Вито Вольтерра сочетались талант исследователя и темперамент активного политика. В 1905 году он был самым молодым сенатором в Итальянском королевстве. Человек прогрессивных взглядов, активный противник фашизма, он был единственным сенатором, проголосовавшим против передачи власти Муссолини в 1922 году. Последовала политэмиграция во Францию. Муссолини, пытаясь укрепить престиж фашистской диктатуры, приглашает Вольтерра вернуться в Италию, обещая почетные титулы и посты, — но ученый отказывается.

Один из фрагментов книги Вольтерра посвящен анализу «взаимоотношений» между хищником и жертвой. В следующем разделе мы посмотрим, как решал эту задачу сам Вольтерра, а потом попробуем исследовать эволюцию системы «хищник — жертва», моделируя ее с помощью компьютера. Итак, начинаем.

Борьба за существование. Пусть имеется два вида животных, один из которых пожирает другой (хищники и жертвы). При этом относительный прирост в единицу времени численности жертв, живущих изолированно (в отсутствие хищников), равен e_1 , в то время как хищники, отделенные от своих жертв, постепенно умирают с голоду, так что относительное падение их численности в единицу времени составляет e_2 .

Как только хищники и жертвы начинают обитать в непосредственной близости друг от друга, изменения численности их популяций становятся взаимосвязанными. В этом случае, очевидно, относительный прирост численности жертв будет уже зависеть от размеров популяции хищников и будет уменьшаться с ростом этой популяции. Для относительного прироста популяции хищников, который можно считать пропорциональным размерам популяции жертвы, будет верна противоположная зависимость. Все, что было только что сказано, можно записать в виде

$$\begin{cases} dN_1/dt = N_1(e_1 - a_1N_2), \\ dN_2/dt = -N_2(e_2 - a_2N_1), \end{cases} \quad (1)$$

где N_1 , N_2 — числа жертв и хищников, соответственно, в момент t ; a_1 , a_2 — постоянные коэффициенты.

Читатель, наверное, заметил, что как в модели Мальтуса, так и при формализации отношений «хищник – жертва» (модель известна под названием «модель Вольтерра – Лотка») априори считается, что все хищники (и все жертвы) находятся в одинаковых условиях. Иными словами, коэффициенты в системе (1) не зависят от того, какую именно часть популяции мы хотим описать (такую популяцию называют пространственно однородной). Очевидно, что такое предположение оправдано далеко не всегда. Можно представить реальные ситуации, когда несколько хищников находятся очень далеко от жертв (a_2 мал), а другие – вблизи (большой a_2), и описание всей популяции только одной системой (1) становится невозможным. Чуть позже мы покажем, как компьютер помогает нам моделировать эти реальные ситуации. Ну а сейчас опять вернемся к системе уравнений (1).

К сожалению, решить эту систему уравнений аналитически, т.е. выразить $N_1(t)$ и $N_2(t)$ через известные элементарные функции, невозможно. Конечно, можно было бы решить эти уравнения численно, с помощью компьютера, который выдал бы, например, графики функций $N_1(t)$ и $N_2(t)$. Меняя параметры, можно было бы увидеть, как изменяется вид этих графиков. Вместо этого мы проведем качественный экспресс-анализ уравнений, который позволит нам понять основные свойства их решений. А именно, рассмотрим такие случаи, когда вид уравнений сильно упрощается.

Посмотрите внимательно на систему (1), и вы легко найдете одно из решений системы – стационарное. Если считать, что числа жертв и хищников не изменяются со временем, то левые части (1) обращаются в ноль, а из правых мы найдем, что такое равновесие будет возможно, только если $N_1 = e_2/a_2$, а $N_2 = e_1/a_1$. Это и является одним из решений системы.

Теперь предположим, что система «хищник – жертва» каким-то образом оказалась вблизи равновесия, и численности хищников и жертв мало отличаются от соответствующих стационарных значений. Пусть $N_1 = e_2/a_2 + n$, а $N_2 = e_1/a_1 + x$, где n и x мы будем считать малыми по сравнению с N_1 и N_2 . Подставляя эти выражения в (1) и пренебрегая произведением nx по сравнению с остальными членами, получаем

$$\begin{cases} dn/dt = -xa_1e_2/a_2, \\ dx/dt = ne_1a_2/a_1. \end{cases} \quad (2)$$

Введем вместо n новую переменную $v = na_2e_1/a_1$. После соответствующей замены система (2) преобразуется в следующую:

$$\begin{cases} dv/dt = -e_1e_2x, \\ dx/dt = v. \end{cases} \quad (3)$$

А теперь вспомним систему уравнений, описывающую движение пружинного маятника. Пусть x — смещение центра тяжести этого маятника от положения равновесия, а v — скорость. Ну конечно же, система (3) может описывать движение такого маятника, если e_1e_2 положить равным отношению жесткости пружины к массе маятника. А значит, наша система уравнений будет иметь такое же решение, как и «школьная задача» о колебаниях пружинного маятника.

Совпадение уравнений, описывающих колебания пружинного маятника и численность особей в системе «хищник — жертва», позволяет утверждать, что числа хищников и жертв должны изменяться колебательным образом с периодом $2\pi/\sqrt{e_1e_2}$. Кроме того, известно, что колебания скорости маятника опережают колебания его координаты на четверть периода. Поэтому колебания численности жертвы также должны опережать колебания численности хищников на четверть периода.

Итак, решением системы уравнений Вольтерра — Лотка являются колебания численности хищников и жертв, сдвинутые друг относительно друга по фазе, с периодом, равным $2\pi/\sqrt{e_1e_2}$. Конечно, когда размах этих колебаний увеличивается, они перестают быть синусоидальными, однако их период остается прежним. (Это подтверждается численным решением системы уравнений (1).)

И все-таки согласитесь, не очень верится, что система «хищник — жертва» служит таким незатухающим генератором колебаний! Может быть, моделирование отношений между хищником и жертвой системой уравнений (1) слишком упрощает ситуацию?

Забудем об уравнениях. Действительно, забудем об уравнениях. Представим себе, что перед нами гипотетический двухмерный океан, разделенный на одинаковые квадраты взаимно перпендикулярными прямыми. Наш океан населяют только два вида рыб — безобидные скумбрии и пожирающие их акулы. При этом в каждом месте пересечения прямых (узле) может в данный момент времени находиться либо одна

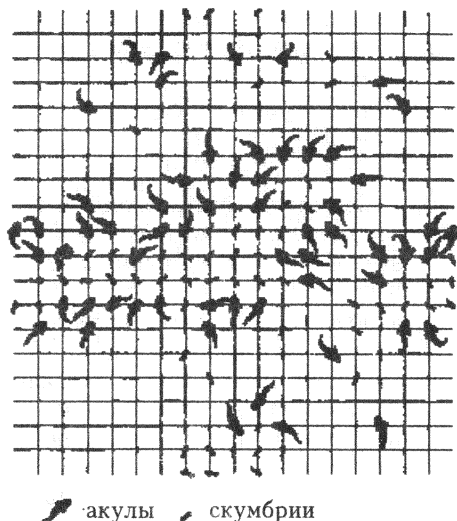


Рис.1. Двухмерная модель океана, в котором обитают только акулы и скупбрии

из этих рыб, либо вообще ничего (рис.1). Теперь опишем поведение животных, которыми мы заселили океан.

1. Скупбрии и акулы могут плавать, перемещаясь за единицу времени из того узла, в котором они находятся, в один из соседних. При этом скупбрия перемещается с равной вероятностью в любой из незанятых соседних узлов. Акула же сначала определяет, находится ли рядом скупбрия, и если это так, то плывет именно к тому узлу и поедает ее. Если рядом с акулой скупбрии отсутствуют, то она с равной вероятностью переплывает в любой из соседних узлов.

2. Акулы и скупбрии «взрослеют», и их возраст увеличивается на единицу, когда истекает один тактовый интервал жизни океана (о том, из чего состоит этот интервал, — несколько позже). При достижении определенного возраста (T_c — для скупбрии и T_a — для акулы) каждая рыба начинает через равные промежутки времени производить на свет по одному детенышу. Родившийся детеныш сначала размещается в любом из узлов, соседних с матерью, а потом на него распространяются те же законы, что и на остальных.

3. Если акула в течение некоторого количества (Γ) последовательных тактовых интервалов ни разу не поймала скупбрию, она погибает от голода. Скупбрия в нашем океане

может погибнуть только в пасти акулы, потому что она питается планктоном, который всегда в избытке.

4. Океан имеет конечные размеры и прямоугольную форму, а животные, оказавшиеся вблизи его берегов, никогда не выбрасываются на берег, а те, которые в отчаянии все-таки хотят это сделать, оказываются сразу на противоположной стороне океана. Другими словами, наш океан покрывает поверхность тороидальной планеты.

Итак, условия жизни обитателей океана заданы. Жизнь начинается! Случайным образом 1) разбрасываем акул и скумбрий по океану и перенумеруем их, 2) установим возраст каждому животному и 3) для каждой акулы определим момент, когда она умрет с голоду, если не съест скумбрию. Все это, конечно, мы сделаем с помощью компьютера, который и будет следить за жизнью придуманного нами океана.

Начинается первый такт жизни океана. Пусть сначала на один шагок переместится первая скумбрия и, если подошел срок, размножится, затем вторая, третья..., а после начнут свою одноактовую охоту акулы. В конце такта подведем итог, исключив акул, умерших от голода, и скумбрий, съеденных акулами, а также прибавив родившихся животных. После этого можно начинать следующий такт и т.д. В результате мы (т.е. компьютер) сможем проследить, как изменяются со временем численности акул и скумбрий в океане.

На рисунке 2 показаны результаты такого компьютерного моделирования для различных значений T_c и T_a (значения Γ , а также начальные численности акул и скумбрий оставались неизменными и составляли 5, 20 и 200 соответственно). Видно, что число акул и скумбрий в океане колеблется с определенной частотой, и максимум численности у скумбрий всегда достигается чуть раньше, чем у акул.

Кроме того, анализируя изменения параметров на рисунке 2, можно заключить, что период колебаний численности животных пропорционален $\sqrt{T_a T_c}$. Действительно, увеличение T_c в 4 раза (сравните рис. 2,а и 2,б) привело к 2-кратному росту периода колебаний. Такие же изменения происходят при росте T_a (сравните рис. 2,а и 2,в) и одновременном росте T_c и T_a (рис. 2,г).

Однако не всегда колебания численности протекают так гладко, как это изображено на рисунках 2,а—г. Довольно часто колебания сбиваются или их периоды начинают изменяться в широких пределах (как, например, на рисунке 2,д).

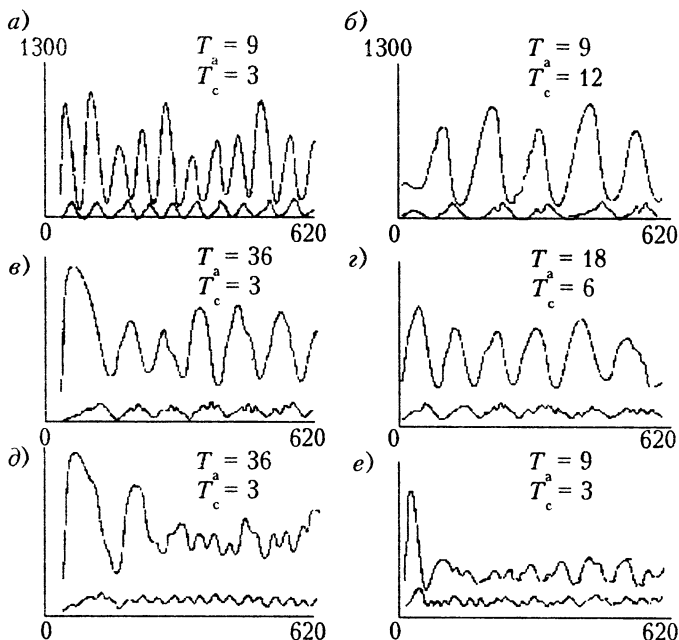


Рис. 2. Изменение численности акул и скумбрий в воображаемом океане (результаты моделирования на компьютере). По ординате – число особей, по абсциссе – время в относительных единицах, T_c и T_a – интервалы времени, через которые у скумбрий и акул, соответственно, появляется потомство. Верхние кривые – изменение численности скумбрий, нижние – акул

В некоторых случаях акулы, оказавшись волею судеб вдалеке от своих жертв, все погибают, и численность рыб начинает монотонно расти, пока они не займут весь океан. Отметим, что такие аномальные ситуации, связанные со случайно-неравномерным распределением особей, не описываются уравнениями (1).

Таким образом, моделирование с помощью компьютера «реальной» жизни в системе «хищник – жертва» дало почти те же результаты, что и уравнения Вольтерра, хотя и высветило ситуации, не описываемые этими уравнениями.

Почему же в действительности мы не наблюдаем таких резких изменений численности животных? Ведь, судя по графикам на рисунках 2,а и 2,б, число хищников и жертв должно изменяться в десятки раз! Ответ прост. Уравнения

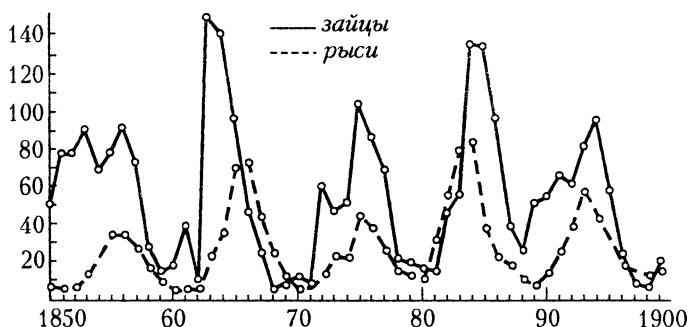


Рис.3. Данные промысла зайца (сплошная кривая) и рыси (пунктирная) в Гудзоновом заливе в течение второй половины XIX века

Вольтерра и наша модель описывали жизнь изолированного сообщества, состоящего из хищников одного вида, питающихся только одним видом жертв. А это бывает крайне редко. Обычно на одной территории проживают несколько видов хищников, питающихся несколькими видами животных, в том числе и хищниками. Каждая система «хищник – жертва» имеет свою собственную частоту и фазу колебаний. Если таких систем много и они перекрываются между собой, то колебания численности животных становятся меньше. Механизм гашения здесь такой же, как в случае маятников, колеблющихся с разными периодами.

И все же бывают такие случаи, когда на большой территории один вид хищников противостоит только одному виду жертв. В результате численность этих видов претерпевает со временем очень большие изменения, что полностью согласуется с моделью Вольтерра – Лотка. Классическим примером этого может служить сообщество «рысь – заяц» в районе Гудзона залива в Северной Америке. На рисунке 3 показано, как изменялся ежегодный отлов рысей и зайцев одной из североамериканских компаний в течение последних пятидесяти лет.

Неужели мы «попали в десятку» и, даже не побывав в Гудзоновом заливе, прекрасно разобрались во взаимоотношениях рысей и зайцев, обитавших там сотню лет тому назад? А может, это случайное совпадение? Ведь только что описанная модель очень груба. По установленным в ней правилам хищники умирают только от голода, а их жертвы – только в пасти хищников. Но мы-то знаем, что и тех и других ждет еще смерть от старости. Да и животные обрисованы в модели очень

примитивно. Где вы видели животных, которые не умнели бы с возрастом? Кроме того, в компьютере хищники и жертвы перенумерованы и двигаются не одновременно, а по очереди. А вдруг результат моделирования изменится, если животных перенумеровать по-другому? Или, например, поместить особей не на прямоугольную сетку, а на треугольную? Или, может быть, нельзя использовать плоскую модель, а нужно поместить хищников и жертв в узлы пространственной сетки?

Можно убедиться, что подобные «технические» видоизменения модели не влияют заметным образом на результаты. Однако, если правила поведения жертв и хищников изменить более существенно, последствия могут быть весьма значительными. На рисунке 2,е показаны результаты моделирования, если полагать, что рыбы стали «осторожными», т.е., перед тем как сделать очередной свой шаг, они оглядываются вокруг. И если рядом акула, рыба поплывет в противоположную от хищника сторону. При таком алгоритме поведения рыб значительные и регулярные колебания численности возникают гораздо реже.

Вопросы о корректности модели возникают почти всегда, когда пытаются моделировать сложные процессы в природе и обществе. С одной стороны, всякое моделирование невозможно без упрощения процесса, без пренебрежения второстепенными деталями. С другой стороны, есть риск «переупростить» модель, отбросив важные черты явления – ведь довольно трудно понять, какая черта процесса второстепенна, а какая нет, пока он не изучен. Поэтому задача исследователя – найти золотую середину, создать модель процесса, не лишая его первостепенных черт. И здесь нельзя дать никаких «верных» рекомендаций – приходится надеяться только на опыт и интуицию.

Экология и физика (вместо заключения). Тому читателю, который добрался до конца наших рассуждений, будет интересно и приятно узнать, что, наблюдая за захватывающими приключениями акул и скумбрий, он одновременно и совершенно бесплатно приобрел представление, например, о... кинетике химических и ядерных реакций. (Кинетика описывает развитие процесса во времени.) Частицы – назовем их реагентами – за счет диффузии движутся, встречаясь друг с другом, вступают в реакции, в которых они «гибнут», производят новые частицы и т.д. Размножение рыб соответствует, например, цепной ядерной реакции, их умирание – поглощению частиц в реакторе.

Для решения таких задач обычно используют как раз один из описанных нами приемов. Записывая уравнения, похожие на уравнения системы (1), получают более грубое, усредненное понимание того, как меняется со временем количество частиц в системе. Другой подход – компьютерное моделирование системы – позволяет получить более подробное (с учетом пространственных неоднородностей) описание процессов, но требует гораздо больших затрат компьютерного времени. Решая эти задачи, физики активно используют качественный экспресс-анализ, моделируют систему на современных компьютерах, ломают голову над тем, какие «правила игры» больше соответствуют реальной системе. Словом, делают то же самое, что делали мы с вами, решая «чисто экологическую» задачу – исследуя численность популяций в животном мире.

БОЛЬШИЕ И МАЛЕНЬКИЕ НА ПРОГУЛКЕ

К.Ю.Богданов

По воде, как посуху. Все мы привыкли делить животных на тех, которые обитают в воде, и на «сухопутных». Однако существует несколько видов насекомых, которые почти всю свою жизнь проводят на границе воды и воздуха. Одни из них – водомерки.

Водомерки быстро скользят по поверхности воды, напоминая конькобежцев на льду. Широко расставленные длинные лапки поддерживают тонкое продолговатое тело. Поверхностная пленка воды с ее большим поверхностным натяжением служит для водомерки надежной опорой. Если же на пути ее движения попадется «полынья» – участок, где поверхностное натяжение много меньше, – насекомое погрузится в воду и будет беспомощно барахтаться в ней. Такую «полынью» можно устроить, капнув в воду немного гексана – его коэффициент поверхностного натяжения (на границе с воздухом) $\sigma = 18 \text{ мН/м}$ почти в четыре раза меньше, чем у воды ($\sigma_{\text{воды}} = 70 \text{ мН/м}$). (Наблюдения показывают, что водомерки хорошо отличают «подходящую» водную поверхность от «неподходящей». Так, несколько упавших водяных капель нарушают гладкость поверхности, и водомерки сразу устремляются к берегу, где спрячутся до тех пор, пока вода не станет спокойной.)

Попробуем оценить, каким запасом плавучести должна располагать водомерка. Длина ее туловища немногим более 5 мм. Она имеет две пары длинных лапок, которые, в основном, и держат ее на поверхности воды, и одну пару коротких, которыми она манипулирует с добычей. Масса m большой водомерки не превышает 0,05 г. Силу поверхностного натяжения, удерживающую насекомое на плаву, можно оценить как произведение $\sigma_{\text{воды}} L$, где L – длина кривой, вдоль которой сила действует. Из равенства $mg = \sigma_{\text{воды}} L$ (это условие удержания на поверхности воды) следует, что L

должно быть равно приблизительно 7 мм. Что же на самом деле? Оказывается, секрет способности насекомого держаться на поверхности воды скрыт в концах его ножек. Они густо покрыты водоотталкивающими волосками, и максимальная длина кривой, перпендикулярно которой действует сила поверхностного натяжения, составляет около 12 мм.

Интересно, что некоторые из насекомых, обитающих на поверхности воды (например, жук стенус), в опасных для себя ситуациях выпускают струю жидкости с низким коэффициентом поверхностного натяжения. Пускаясь наутек, они создают позади себя «непроходимую» область, в которой преследователи начинают тонуть.

Отважные стеклолазы. Как могут мухи прогуливаться по вертикальной поверхности оконного стекла? Этот вопрос волновал еще Роберта Гука. Он полагал, что мухе помогают коготки, которые находятся на концах каждой из шести ее лапок. (В 1665 году Гук в своей работе «Микрография» подробно описал эти коготки.) Может быть, это и так, но только когда муха ползает по шероховатой поверхности, а не по стеклу.

Английские ученые, вооружившись современной техникой, показали, что способность мух передвигаться по очень гладкой поверхности объясняется опять-таки силами поверхностного натяжения. Они обнаружили, что на конце каждой лапки между коготками находятся волоски, образующие щетину. Каждый из волосков оканчивается присоской, имеющей форму диска площадью около $2 \cdot 10^{-12} \text{ м}^2$.

Изучая следы мух, гуляющих по чистым поверхностям, ученые обнаружили, что они идентичны этим дискам. Отпечатки не испарялись, а их химический анализ показал, что это жиры. Несмотря на то, что жир скользкий, он способствует слипанию волосков и стекла. Это происходит из-за того, что поверхностное натяжение у жира очень большое. (Если лапки мухи обезжирить, опустив их на короткое время в гексан, то муха на некоторое время теряет способность передвигаться по стеклянной поверхности из-за скольжения.)

Были проведены измерения силы, удерживающей муху на горизонтальной стеклянной поверхности. Для этого муху прикрепляли на привязи к специальным весам и измеряли силу, необходимую для отрывания мухи от этой поверхности. Средний вес мухи составлял 0,72 мН. Когда она стояла на четырех лапках, для ее отрыва требовалась сила 1,03 мН, а если она опиралась на все шесть своих лапок, требовалась

сила 2,4 мН. Это и доказывало, что муху удерживали силы поверхностного натяжения. (Тот факт, что зависимость измеренной силы от количества лапок, касающихся поверхности, оказалась не линейной, по-видимому, объясняется различным количеством волосков на передних и задних лапках мухи.)

С ведром на голове. Если вам не доводилось путешествовать по Африке или Азии, то уж в кино или по телевизору вы наверняка видели, как женщины носят на голове грузы огромных размеров. Нередко вес такой поклажи достигает 70% веса человека. Естественно, поднять себе на голову такую ношу женщина без посторонней помощи не может, и иногда двое мужчин с трудом поднимают груз, который после этого одна женщина с легкостью уносит. Неужели им легче переносить грузы на голове?

Известно, что показателем энергетических затрат человека может служить скорость потребления им кислорода, при этом 1 литр израсходованного кислорода соответствует энергии 20,1 кДж. Ученые в опытах на добровольцах установили, что при обычном способе ношения груза (за спиной) потребление кислорода растет пропорционально увеличению ноши так, что груз, равный 50% веса тела носильщика, увеличивает на 50% его энергетические затраты. Такая же зависимость имела место и в тех случаях, когда добровольцев просили переносить груз на голове, чему их раньше не обучали. Каково же было удивление ученых, когда они обнаружили, что африканские женщины при переносе на голове груза в 50% собственного веса увеличивают потребление кислорода лишь на 30%! Как им это удастся? Ответить на этот вопрос помогли наблюдения.

Обычная для тех мест картина – женщина возвращается домой с наполненным до краев сосудом с водой на голове. И как это ни удивительно, вода не расплескивается по дороге. А это значит, что при движении отсутствует (или почти отсутствует) вертикальная составляющая ускорения. Следовательно, и центр тяжести «носильщицы» не движется в вертикальном направлении.

Известно, что при обычной ходьбе высота центра тяжести заметно колеблется. Если считать, что при ходьбе нога, соприкасающаяся с землей, выпрямлена, не согнута в колене, то очевидно, что центр тяжести будет располагаться ниже всего тогда, когда обе ноги касаются земли. Наивысшему положению центра тяжести будет соответствовать момент, когда соприкасающаяся с землей нога находится в вертикаль-

ном положении. Можно считать, что центр тяжести движется по дуге окружности, радиус которой равен длине ноги, периодически поднимаясь и опускаясь на несколько сантиметров. Естественно, что при каждом шаге на, вообще говоря, никому не нужное поднятие центра тяжести мы вынуждены затрачивать вполне определенную энергию. Поэтому такой (обычный для нас) способ ходьбы можно сравнить с ездой начинающего автолюбителя, который, пытаясь сохранить постоянную среднюю скорость движения, попеременно нажимает то на акселератор, то на тормоз, расходуя в результате гораздо больше топлива.

В отличие от европейцев, у многих жителей стран Азии и Африки выработалась такая походка, при которой они удерживают свой центр тяжести на постоянной высоте, что значительно уменьшает энергетические затраты при ходьбе.

Кое-что об аэробике. Каждый, наверное, помнит школьный урок физики, на котором речь шла о двух маятниках, подвешенных на одной перекладине. Колебания одного маятника уже через несколько циклов приводили к синфазным колебаниям другого. Что-то похожее можно встретить и в организме бегущего животного, когда происходит взаимодействие двух «маятников» – периодических движений животного, как целого, и его легких.

На рисунке 1 схематически показан дыхательный «маятник» кенгуру. При вдохе, когда легкие животного наполняются воздухом, центр масс брюшной полости сдвигается влево, а при выдохе – вправо. Эластические свойства диафрагмы и других тканей на схеме представлены пружиной, а органы, гасящие дыхательные колебания, – демпфером. Таким образом, органы брюшной полости служат своеобразным поршнем, колебания которого происходят синхронно с дыхательными движениями.

Очевидно, что наименьшим энергетическим затратам при беге должен соответствовать тот случай, когда силы инерции, возникающие в теле животного при периодическом его ускорении и замедлении, помогают (а не препятствуют) совершать дыхательные движения. Подобные рассуждения приводят к

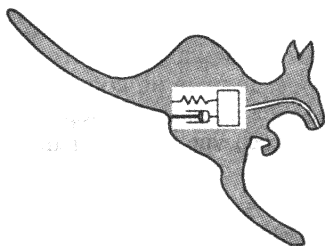


Рис.1. Моделирование дыхательного «маятника» поршнем, скользящим внутри тела животного под действием пружины и демпфера

мысли, что частота дыхания у животного должна быть очень близка к частоте его прыжков при беге.

В специальных опытах, проведенных на кенгуру, лошадях, зайцах и собаках, эта идея была проверена. Оказалось, что наиболее вероятным отношением частоты прыжков к частоте дыхания (особенно при быстром беге галопом) является 1:1. У человека связь между частотой бега и частотой дыхания выглядит более сложно — отношение частот может принимать целый спектр значений (4:1, 3:1, 2:1, 1:1, 5:2, 3:2), хотя отношение 2:1 представляется более вероятным.

Причина кажущейся независимости частот дыхания и бега у человека кроется, по-видимому, в вертикальном положении его тела. Дыхательные движения у него сопровождаются вертикальными перемещениями органов брюшной полости, а следовательно, силы инерции при беге, направленные горизонтально, влияют на дыхательный «маятник» человека в гораздо меньшей степени, чем это имеет место у четвероногих.

Возвращаясь к опыту с двумя маятниками, отметим, что вынужденные колебания второго маятника достигают наибольшей амплитуды при равенстве периодов собственных колебаний маятников. Поэтому следует ожидать, что частота собственных колебаний дыхательного «маятника» должна быть близка к частоте бега. Так оно и оказалось. Опыты, проведенные на собаках, показали, что частота собственных колебаний дыхательного «маятника» составляет около 4 Гц, в то время как частота прыжков при беге галопом около 3,2 Гц.

Так как частота собственных колебаний дыхательного «маятника» есть величина постоянная для данного животного, то при изменении скорости бега частоту прыжков также следует сохранять неизменной. Этого требует минимизация энергетических затрат. И действительно, как у четвероногих бегунов, так и у двуногих (кенгуру) частота бега галопом остается постоянной, хотя длина прыжков может изменяться в несколько раз.

Как живые организмы используют принцип Бернулли.

В соответствии с принципом Бернулли $\rho v^2/2 + p = \text{const}$, где ρ — плотность жидкости или газа, v — линейная скорость их движения и p — давление, изменение скорости потока приводит к изменению давления в нем. Нетрудно сообразить, что этот принцип прямо следует из закона сохранения механической энергии.

Согласно принципу Бернулли, если какое-либо тело движется (или жидкость обтекает неподвижное тело), то давление жидкости, соприкасающейся с этим телом, будет неодинаково в различных точках потока. На рисунке 2 показано, как изменяется давление в потоке жидкости при обтекании им тела каплеобразной формы. В тех местах, где жидкость наталкивается на тело (точка *A* на рисунке 2), ее скорость уменьшается, и давление жидкости возрастает. Обтекая тело, жидкость ускоряется, и в некоторых областях, близлежащих к телу (точка *B*), она движется со скоростью большей, чем в остальных точках потока, поэтому в точке *B* давление жидкости падает. Таким образом, высокое давление, действующее на часть тела, обращенную к потоку, будет стремиться сжать тело, а низкое давление вблизи боковых поверхностей – расплющить его.

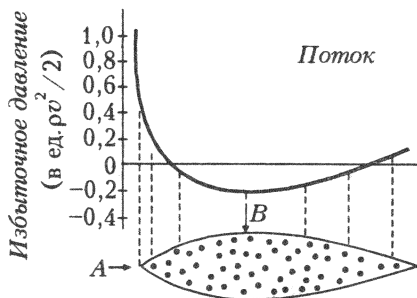


Рис. 2. Распределение давления жидкости, обтекающей тело вращения каплевидной формы

Человек научился довольно эффективно использовать принцип Бернулли. На рисунке 3 изображено поперечное сечение крыла самолета. Рассмотрим движение двух частичек воздуха, которые до столкновения с крылом были рядом друг с другом. После того как они с разных сторон обойдут крыло, они опять окажутся вместе. Но частица *A* за этот интервал времени проделает путь больший, чем частица *B*; значит, при обходе средняя скорость частицы *A* больше. Поэтому из принципа Бернулли следует, что среднее давление над крылом должно быть меньше, чем под его плоскостью. Эта разница давлений и приводит к возникновению подъемной силы, зависящей от площади крыла и его профиля.



Рис. 3. Обтекание воздухом крыла самолета

Как используют принцип Бернулли живые организмы? Конечно, самый наглядный пример – это парящий полет птиц. Аэродинамика этого полета, хотя она до сих пор еще не до

конца изучена, мало чем отличается от полета их стальных собратьев. Однако, пожалуй, никто так эффективно не использует принцип Бернулли, как рыбы. Долгий ход эволюции так оптимизировал форму их тела, что величина падения давления вблизи центральной части плывущей рыбы стала почти такой же, как и его прирост перед ней (см. рис.2). Ученые считают, что значительное падение давления, наблюдаемое вблизи того места, где у рыбы расположено сердце, может способствовать более эффективной работе последнего – меньшее давление в полостях сердца должно увеличивать приток крови к нему. Кроме того, форма тела у рыбы такова, что есть место, где давление окружающей воды не зависит от скорости движения и всегда равно гидростатическому, и это место совпадает с положением глаз рыбы. Таким образом, глаза рыбы – наименее защищенные от деформации органы – никогда не испытывают на себе роста давления жидкости при увеличении скорости плавания.

Многим, наверное, известно, что некоторые жучки большую часть своей жизни проводят под водой. При этом они дышат воздухом, пузырек с которым таскают все время с собой. К таким «подводникам» относят, например, жучка *Potamodytes tuberosus*, обитающего в реках на западе Африки. Обычно этот жучок вместе с пузырьком воздуха прикрепляется к поверхности камня, находящегося в струе воды. Как только жучок с пузырьком воздуха оказывается в спокойной (стоячей) воде, пузырек начинает медленно рассасываться и через пару часов исчезает, что заставляет жука искать новый.

Объяснить стабильность воздушного пузырька в потоке воды помогает опять-таки принцип Бернулли. Как следует из всего вышесказанного, давление воды, обтекающей продолговатый, вытянутый вдоль потока пузырек, должно быть меньше гидростатического почти вдоль всей его поверхности. Поэтому и давление воздуха в пузырьке оказывается меньшим, чем в том случае, когда вода вокруг неподвижна. Если глубина, на которой находится жучок, невелика, то движение воды может приводить к понижению давления воздуха в пузырьке ниже атмосферного. А это значит, что растворенный (при атмосферном давлении) в воде воздух будет входить в пузырек, где давление меньше. В результате пузырек будет расти. Даже когда жук в струе воды находится на глубине нескольких сантиметров, пузырек часто оказывается стабильным, несмотря на гидростатическое давление, которое препятствует этому.

ФАУНА И ФЛОРА

А.Б.Минеев

Воспользуемся современным жаргоном с целью выяснить, что «круче» на Земле – царство Фауны или царство Флоры, животный или растительный мир – по разным показателям. Для начала – по массе.

В нашем путешествии мы будем заглядывать в две довольно необычные книги. Одна из них – это недавно вышедший превосходный справочник типа «все обо всем» под бесхитростным названием «Новейший справочник необходимых знаний, от альфы до омеги» (М.: РИПОЛ КЛАС-СИК, 2000). Другая, не менее удивительная книга, – это своеобразная энциклопедия по физике и биологии биосферы, она написана В.Г.Горшковым и называется «Физические и биологические основы устойчивости жизни» (М.: ВИНИТИ, 1995).

Масса животных и растений. Если говорить о первенстве в общем зачете – в суммарной массе всех животных и растений на Земле, то тут пальма первенства принадлежит растениям. Так, масса всех растений составляет около 2400 млрд тонн, а масса животных и микроорганизмов – около 20 млрд тонн. Отметим, что масса всех людей на этом фоне вообще «не смотрится» – всего порядка 400 млн тонн.

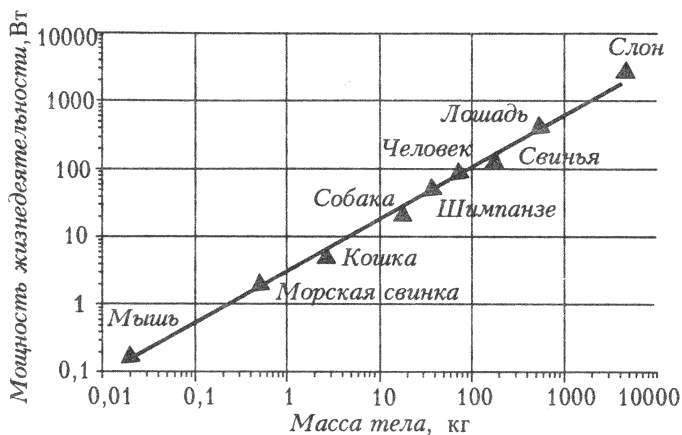
Если перейти к индивидуальному зачету – к сопоставлению масс больших деревьев и больших животных, то тут, казалось бы, также впереди царство Флоры. При оценке максимальной массы деревьев воспользуемся данными статьи «О высоких деревьях», а именно: максимальная высота деревьев не превышает 150 м, при этом отношение высоты к диаметру дерева $h/d \sim 50$. Считая, что дерево имеет форму конуса и его плотность $\rho \approx 500 \text{ кг/м}^3$, получим $M_{\max} \sim \rho \pi d^2 h / 12 \sim 200 \text{ т}$. К подобной или даже большей оценке приводят данные для самого большого из известных деревьев – мамонтового дерева в Калифорнии, имеющего

высоту 83 м и окружность 24 м (т.е. диаметр около 7,6 м): масса такого дерева оказывается более 500 т.

Сопоставим полученную величину с максимальной массой живущих или живших когда-то на Земле животных. Здесь лидируют киты: голубой кит – длина до 33 м, масса до 190 т и кашалот – длина 20 м, масса 50 т. Достаточно велики индийский слон – высота 3,5 м, масса 6 т, бегемот – длина 4 м, высота 2,5 м, масса 3 т и акулы – китовая длиной 20 м и массой 14 т и гигантская длиной 15 м и массой 9 т. Про крупнейших из ископаемых животных – динозавров – по понятным причинам имеются только данные об их длине и высоте. Так, крупнейшие травоядные – бронтозавры – имели длину 22 м и высоту 5 м, крупнейшие плотоядные наземные животные – тираннозавры – были длиной до 14 м, а крупнейшие плававшие динозавры – плезиозавры – до 16 м (правда, с учетом их огромной шеи). С известной долей условности при оценке указанные данные по динозаврам приводят к массе этих животных до 50 – 70 т.

Таким образом, казалось бы, масса большого животного уступает массе гигантского дерева. Но картина существенно изменится, если мы сравним массы «живого» вещества представителей царств Флоры и Фауны. Дело в том, что у крупных деревьев большую часть ствола занимает древесина, клетки которой уже потеряли способность участвовать в обмене веществ. Собственно живой частью дерева является тонкий слой вблизи коры дерева, по которому по дереву разносятся вода и минеральные соли (от корней) и продукты фотосинтеза (от листьев). Этот слой имеет толщину порядка десятка годовых колец – не более нескольких сантиметров. В результате живая масса дерева может достигать «всего» нескольких тонн (до 10 т). Так что по живой массе представители царства Фауны несколько покрупче, чем представители царства Флоры.

Почему растения неподвижны, а животные обязаны передвигаться (или Законы Горшкова). Процесс увеличения массы растений связан с образованием органических веществ в результате фотосинтеза. Солнечный свет является основной движущей силой их роста. От того, передвигались бы растения по поверхности Земли или нет, фактически усваиваемая ими мощность солнечного излучения не зависит и составляет около 1 Вт/м^2 . Поэтому «стратегия» растений заключается не в передвижении, а в покрытии как можно большей поверхности. Это приводит к предпочтительности привязки расте-



Кривая «От мыши до слона»

ний к определенному участку поверхности Земли и выражается в законе неподвижности растений.

Для жизнедеятельности животных требуется гораздо большая мощность потребления энергии. Для оценки ее воспользуемся так называемой кривой «От мыши до слона» из книги К.Шмидта-Ниельсена «Размеры животных: почему они так важны?» (М.: Мир, 1987). Из нее видно, например, что для человека массой $m = 80$ кг величина мощности жизнедеятельности составляет около 80 Вт (это мощность, которую человек затрачивает в состоянии, близком к покою, а при предельных нагрузках затрачиваемая мощность существенно больше – до 10 кВт, например, при спринтерском беге).

Как можно «использовать» величину мощности жизнедеятельности (или, иначе, мощности метаболизма) человека 80 Вт? Если умножить ее на продолжительность суток (86400 с), то можно получить минимальное потребляемое человеком суточное количество энергии – около 7 МДж, или 1800 ккал. Как вы помните, близкую к этому значению энергию человек должен ежедневно получать с пищей. Далее, если поделить 80 Вт на эффективную площадь, занимаемую человеком, $S \approx L^2$ (где $L \approx (m/\rho)^{1/3}$ – характерный размер, $\rho \approx 1000$ кг/м³ – плотность человека), то можно получить удельную мощность, потребляемую человеком: около 500 Вт/м². Более точные оценки приводят к величине 1000 Вт/м² или даже несколько большей.

Сравнение мощностей, развиваемых растениями (1 Вт/м^2) и животными (1000 Вт/м^2), позволяет сделать вывод, что питание животных за счет продуктов жизнедеятельности растений делает необходимым их передвижение в поисках пищи (площадь, которую животное должно обойти в течение дня, на несколько порядков превышает эффективную площадь, занимаемую им самим). Этот вывод называется *законом необходимости передвижения животных*. Следует отметить, что растительноядные животные по численности преобладают. Очевидно, что плотоядные животные, питающиеся другими животными, должны двигаться еще быстрее, чем растительноядные, по крайней мере в моменты охоты.

Ограничения на размеры и массу животных. При увеличении размеров животного – для простоты представим его в виде шара радиусом R , стоящего на ногах длиной R и радиусом каждой ноги r , – его масса растет пропорционально R^3 , а площадь ног – пропорционально r^2 . Казалось бы, с ростом R давление на ноги $p \sim R^3/r^2$ может превысить допустимое, и придется ноги утолщать. А когда толщина станет сравнимой с размером животного ($r \sim R$), размеры живых существ достигнут предела. Однако измеренное допустимое давление в опорных частях животных довольно велико, так что если бы предел на максимальные размеры животных определялся прочностью, масса животного могла бы быть более тысячи тонн.

В поисках других ограничений снова обратимся к тому, что живые существа в процессе жизнедеятельности обязаны вырабатывать определенное количество энергии. Приведем выражение для упомянутой выше кривой «От мыши до слона» – зависимости мощности жизнедеятельности P (Вт) от массы животного m (кг):

$$P \approx 3m^{0,75}.$$

Такую тепловую мощность нужно отводить через поверхность тела площадью S . Поскольку S пропорциональна квадрату линейных размеров, т.е. $m^{2/3}$, может оказаться, что при большой массе тела отвести тепло будет затруднительно. Проведем соответствующие оценки. Животное массой $100\text{--}200 \text{ т}$ имеет объем $100\text{--}200 \text{ м}^3$ и поверхность тела $100\text{--}160 \text{ м}^2$. Примем, согласно Горшкову, что максимально возможная удельная мощность отвода тепла при испарении с

поверхности составляет около 200 Вт/м^2 . Тогда через указанную поверхность тела можно отвести $20\text{--}30 \text{ кВт}$ тепла. Скорость же производства тепла P составляет $17\text{--}28 \text{ кВт}$. Видно, что животные с большой массой по возможности отвода тепла находятся уже вблизи предела. Тем более что при быстром передвижении они затрачивают еще большую мощность.

Отметим, что как современные, так и, скорее всего, доисторические гиганты животного мира — теплокровные животные. Это означает, что температура их тела выше температуры окружающей среды, и они могут сохранять примерно постоянную температуру в течение длительного времени.

Некоторым аргументом в пользу этого может служить оценка характерного времени τ остывания тела животного. Считая, как и раньше, что оно представляет собой шар радиусом R , получим

$$\tau \sim \frac{CR^2}{\chi},$$

где $C = \pi^{-2} \approx 0,1$ — коэффициент, связанный со сферической геометрией задачи, $\chi \approx 1,4 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$ — температуропроводность воды (напомним, что тела животных из воды в основном и состоят). Отсюда следует, что, например, для человека массой $m = 80 \text{ кг}$ и эффективным радиусом $R_{\text{эф}} = (3m/(4\pi\rho))^{1/3} \approx 0,27 \text{ м}$ характерное время остывания $\tau \sim 5 \cdot 10^4 \text{ с}$ (около 0,6 суток). При радиусе $R_{\text{эф}} \sim 0,5 \text{ м}$ и, соответственно, массе около 1 т (морж, бизон, носорог) $\tau \sim 1,8 \cdot 10^5 \text{ с}$ (около 2 суток). Наконец, для крупнейшего из животных массой 200 т (такого, как голубой кит) и $R_{\text{эф}} \approx 3,6 \text{ м}$ характерное время $\tau \sim 10^7 \text{ с}$ — уже около трети года!

Большие животные медленно меняют температуру тела и должны быть теплокровными. Для упрощения процесса теплоотвода с поверхности такие животные имеют гладкую кожу. В то же время у самых маленьких теплокровных животных типа мыши массой $\sim 3 \text{ г}$ эффективный радиус $R_{\text{эф}} \sim 0,9 \text{ см}$ и характерное время охлаждения $\tau \sim 1 \text{ мин}$. В результате такие животные, имея достаточно большую температуру тела (у мыши она $\approx 38^\circ\text{C}$), вынуждены непрерывно искать пищу, съедая ее за день по порядку величины столько же, сколько весят сами. Кроме того, они обязаны иметь шерстяной покров, позволяющий снизить теплоотвод от поверхности тела (коэф-

фициент теплопроводности шерсти приближается к таковому для воздуха и примерно на порядок меньше теплопроводности воды).

Таким образом, у самых маленьких теплокровных животных задача — не замерзнуть, а у самых больших — не перегреться.

Размеры клеток и скорость роста растений и животных.

Размеры типичных клеток животных и растений примерно одинаковы, их характерный диаметр $d_{\text{кл}} \sim 10\text{--}20$ микрон. Однако сходство размеров типичных клеток не исключает наличия специальных клеток, имеющих существенно большую протяженность. Так, довольно велики нервные клетки у животных. А у некоторых растений, в частности у водоросли Нителлы, длина клеток достигает нескольких сантиметров, а диаметр порядка миллиметра. Следует отметить, что нервные клетки животных, через которые передаются определенные сигналы по их организму, имеют специфическое строение (на техническом языке их можно уподобить волноводной линии). Поэтому их лишь с некоторой натяжкой можно назвать клетками. Нечто подобное происходит и в случае больших клеток Нителлы. Поскольку «управлять» жизнью этих клеток с помощью одного ядра затруднительно, в них имеется множество ядер, каждое из которых обслуживает определенную область большой клетки, — фактически это как бы множество сросшихся клеток.

Рост и развитие растений и животных происходит за счет деления клеток. При этом наибольшая скорость роста, естественно, у молодых организмов. В упомянутом справочнике приводится совершенно поразительный факт: скорость роста бамбука доходит до 75 сантиметров в сутки, т.е. до 3 сантиметров в час! Могут ли животные составить конкуренцию растениям по скорости роста? Тут, по-видимому, следует дать отрицательный ответ. Дело в том, что растения могут расти некоторое время только в длину (можно назвать это одномерным ростом). У животных рост всегда двумерный (или трехмерный) — одновременно в длину и в ширину. Поэтому по скорости изменения линейных размеров растения вне конкуренции.

Однако и для растений, и для животных рост — это «просто» деление и дифференциация клеток. Можно ли найти физические причины, ограничивающие скорость роста клеток? Сделаем некоторые оценки. Клетки растений и животных состоят в основном из воды. Коэффициент диффу-

зии для молекул воды при нормальных условиях составляет $D \sim 10^{-9} \text{ м}^2/\text{с}$. При размере клеток $x \sim 10 - 20 \text{ мкм}$ характерная скорость диффузионного процесса составляет

$$v_D \sim \frac{D}{x} \sim (0,5 - 1) \cdot 10^{-4} \text{ м/с} = 50 - 100 \text{ мкм/с}.$$

Отметим, что для клеточных размеров скорости как направленного перемещения, так и случайного блуждания оказываются одного порядка.

Сравним указанную величину v_D с реальной скоростью перемещения веществ внутри клетки. Воспользуемся данными статьи А.В.Приезжева и Ю.М.Романовского «Физические основы подвижности клеток» из книги «Школьникам о современной физике» (М.: Просвещение, 1990):

скорость движения ядер и митохондрий в клетке — 50 мкм/с;

скорость движения веществ по системе прокачки клетки — 150 мкм/с.

Очевидно, что скорость образования и роста новых клеток должна быть существенно меньше. Если принять «запас» равным 10, то для скорости роста клеток получаем такую оценку:

$$v_{\text{кл}} \sim (0,5 - 1) \cdot 10^{-5} \text{ м/с} = 5 - 10 \text{ мкм/с}.$$

Это составляет 2–4 сантиметра в час или 50–100 сантиметров в сутки. Видно, что наша оценка хорошо совпала с максимальной скоростью роста у растений (75 сантиметров в сутки).

Несколько другие соображения, основанные на скорости производства вещества зеленым растением под действием Солнца (см. статью А.А.Веденова и О.П.Иванова «С какой скоростью растет зеленый лист?»), также дают оценку, близкую к указанной выше величине скорости роста. Так, при оптимальных условиях (хорошие освещение и питание корней) молодое растение может увеличивать свой рост за день примерно на треть. Это означает, что ежедневная скорость прироста у бамбука может составить 30 см при росте 1 м, 60 см при росте 2 м и 90 см для трехметрового растения. Видно, что это примерно тот же диапазон скорости роста, что и приведенный ранее экспериментальный факт (75 сантиметров за сутки). Нужно отметить, что уже начиная с 2–3 метрового размера ствола бамбука недостаток освещенности и питания корней (в основном из-за конкуренции с окружающими растениями) приводит к замедлению скорости роста. При этом близкое к экспоненциальному увеличе-

ние массы у молодого побега постепенно заменяется на примерно постоянный прирост массы, характерный для взрослого растения.

На этом прервем краткую экскурсию по миру Фауны и Флоры (по их наиболее «эффектным» представителям), затеянную с целью приоткрыть тайну их «крутизны». Прекрасно, что они есть, царство Фауны и царство Флоры, – это основа и нашей с вами жизни. К тому же, это пища, в том числе... и для ума.

ОТ МЫШИ ДО СЛОНА

А.Б.Минеев

Земная фауна чрезвычайно разнообразна. Оказывается, однако, что среди параметров, характеризующих живые существа, есть такие, которые очень слабо меняются в широком диапазоне изменения масс животных. Назовем подобные параметры зоологическими постоянными. Их краткий список для млекопитающих «от мыши до слона» приведен в таблице 1.

Таблица 1

Диаметр клетки	$d_{кл} \sim 10 - 20 \text{ мкм}$
Отношение продолжительности жизни и сердечного цикла	$t_{ж}/t_c \sim 10^9$
Отношение продолжительности дыхательного и сердечного циклов	$t_d/t_c \approx 4$
Температура тела	$T_T \approx 37 - 38 \text{ }^\circ\text{C}$
Масса органа (по отношению к массе тела m_T):	
сердца	$m_c/m_T \approx 0,6\%$
легких	$m_{л}/m_T \approx 1\%$
крови	$m_k/m_T \approx 5\%$
скелета	$m_{ск}/m_T \approx 6\%$
мышц	$m_m/m_T \approx 40\%$

Уточним сначала, что мы имеем в виду под словом «постоянные» применительно к животному миру. Конечно, в теле животных имеются и существенно более протяженные клетки, например нервные волокна. Однако число их среди остальных клеток пренебрежимо мало. Точно так же температура тела больных животных может подсакивать, а относительные массы мышц для представителей одного вида, но с различной физической активностью, различаются. В этом смысле указанные в таблице величины относятся к средним, наиболее многочисленным, представителям каждого вида животных. Другими словами, распределение вероятности

появления определенного значения зоологического параметра, как правило, имеет вид кривой с отчетливым максимумом – это и есть характерное значение зоологической постоянной. Таким образом, смысл используемых нами зоологических постоянных несколько иной, чем, скажем, физических постоянных (типа скорости света или массы электрона, т.е. вполне точных величин).

Основное внимание в этой статье будет уделено природе указанного размера клеток животных. Остальных параметров мы только коснемся, в их числе одна из наиболее загадочных постоянных – ресурс сердца (миллиард ударов за жизнь для млекопитающих).

«О карманных деньгах не надо думать, – сказал Остап, – они валяются на дороге, и мы их будем подбирать по мере надобности». Мы воспользуемся этим советом героя известного романа и тоже постараемся «подбирать» недостающие данные о клетке по мере их надобности, постепенно приближаясь к цели.

Итак, мы ищем ответ на два простых на вид вопроса:

– почему средний диаметр клеток млекопитающихся $d_{\text{кл}}$ составляет 10–20 микрон, а не, скажем, 1 или 100 микрон;

– почему $d_{\text{кл}}$ примерно одинаков для всех млекопитающих при огромном различии их масс (к примеру, масса землеройки 3 грамма, а слона 3 тонны, т.е. разброс достигает миллиона)?

При оценке характерного диаметра клеток испробуем несколько подходов. Начнем с оценки, вообще не использующей информацию о структуре и функциях клетки.

«Пальцем в небо». Клетка должна быть много больше размера атома ($\sim 10^{-10}$ м) и много меньше «человеческого» размера (~ 1 м). Первое позволяет пренебречь квантовыми эффектами, второе – построить из клеток, как из кирпичей, сложное сооружение живого организма с разнообразными функциями.

Среднее геометрическое между «атомным» и «человеческим» масштабами удовлетворяет указанным требованиям и дает правильный порядок величины:

$$\sqrt{10^{-10} \text{ м} \cdot 1 \text{ м}} = 10^{-5} \text{ м},$$

но мало что проясняет. К тому же, если подставить в это соотношение характерные размеры землеройки и слона, то получим 2 и 20 микрон соответственно, т.е. существенное различие размеров.

Итак, без знания строения клетки, хотя бы примитивного, не обойтись.

«Кулинарный» подход. Зайдем с другого конца: сконструируем клетку млекопитающего из простейших составных частей (как в кулинарии: на одну порцию нужно взять одно яйцо, ложку сахара, стакан молока...) и прикинем ее размер.

Напомним кратко, с каким объектом мы имеем дело. Клетка – это элементарная единица живого. Основная информация как о самой клетке, так и об организме в целом хранится в ядре и записана на спирали ДНК. С помощью РНК происходит обработка этой информации, синтез белков и других необходимых клетке веществ. Необходимая энергия для синтеза накапливается в митохондриях. Среда, в которой протекают клеточные процессы, – вода. А мембраны как отделяют одни клетки от других, так и разделяют внутренние части клетки.

«Плясать» начнем от ДНК. Некоторые ее параметры приведены в таблице 2.

Таблица 2

Диаметр двойной спирали	$2 \cdot 10^{-9}$ м
Расстояние вдоль спирали между соседними парами оснований	$3,4 \cdot 10^{-10}$ м
Количество пар нуклеотидов в клетке млекопитающих	$(1 - 5) \cdot 10^9$
Массы пары нуклеотидов в атомных единицах массы	~ 500

Согласно этим данным, длина ДНК для разных млекопитающих находится в диапазоне

$$(1 - 5) \cdot 10^9 \times 3,4 \cdot 10^{-10} \text{ м} \sim 0,3 - 2 \text{ м},$$

а масса – в диапазоне

$$1,67 \cdot 10^{-27} \times 500 \times (1 - 5) \cdot 10^9 \text{ кг} \sim (0,8 - 4) \cdot 10^{-15} \text{ кг}.$$

Какой объем может занимать такая ДНК? Очень плотная намотка ДНК в клубок с зазором между отдельными слоями порядка расстояния между основаниями (т.е. $4 \cdot 10^{-10}$ м) приводит к объему клубка

$$V \sim 2 \cdot 10^{-9} \times 4 \cdot 10^{-10} \times (1 - 5) \cdot 10^9 \times 3,4 \cdot 10^{-10} \text{ м}^3 \sim (0,3 - 1,4) \cdot 10^{-18} \text{ м}^3$$

и характерному линейному размеру

$$d \sim V^{1/3} \sim 0,7 - 1,1 \text{ мкм.}$$

Плотность такого образования оказывается $\sim 3 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$.

Полученные цифры при некотором размышлении вызывают сомнения:

– поскольку плотность получившегося ядра существенно превосходит плотность воды, то ядро может «погрузиться на дно» клетки, если его специально не удерживать вблизи ее центра;

– ДНК – не плоская структура, а спираль, и ее так плотно не намотать;

– размотать быстро такой длинный клубок невозможно.

Эти соображения наводят на мысль о том, что намотка ДНК должна быть более рыхлой. Разумно предположить, что средняя плотность клубка ДНК в объеме, ограниченном мембраной, должна быть близка к плотности воды, при этом ядро более свободно «плавает» в клетке. В таком случае объем ядра клеток млекопитающих $\sim (0,8 - 4) \cdot 10^{-18} \text{ м}^3$ и диаметр соответствующего шара $\sim 1,2 - 2 \text{ мкм}$. Мембрана, ограничивающая ядро, довольно тонкая ($\sim 10^{-8} \text{ м}$) и практически толщину не увеличивает.

Теперь «накрутим» остальное. Масса РНК, своеобразной «прислуги», должна, как это принято в приличных домах, в несколько раз превосходить массу «хозяйки» – ДНК. А масса «обстановки» (синтезированный с помощью ДНК и РНК белок и другие составляющие клетки) должна быть существенно больше массы РНК. Примем для оценки, что соотношение масс белка и ДНК масштаба 10:1. Все это содержимое, ограниченные мембранами, должно плавать в воде. Положим, что воды по объему вчетверо больше, чем остального содержимого клетки.

В итоге минимальный объем клеток млекопитающих должен быть

$$V_{\text{кл min}} \sim (0,3 - 1,6) \cdot 10^{-16} \text{ м}^3,$$

а соответствующий диаметр сферы –

$$d_{\text{кл min}} \sim \left(\frac{6V_{\text{кл}}}{\pi} \right)^{1/3} \sim 4 - 7 \text{ мкм.}$$

Таким образом, млекопитающих с диаметром меньше четырех микрон быть не может. Это уточняет нашу первую, «пальцевую», оценку.

Кроме того, «кулинарный» подход дает частичный ответ на оба главных вопроса, поставленных в самом начале:

- разброс минимальных диаметров клеток невелик: около 2 для всех млекопитающих (в то время как длины ДНК отличаются в 5 раз);

- диаметр клетки млекопитающего не 1 микрон, а гораздо больше.

В заключение этого подхода приведем «кулинарный» рецепт одной из реальных клеток животных. На 100 частей живой клетки надо взять (по массе):

воды – 84 части,

белков – 7 частей,

углеводов и липидов – по 4 части,

РНК и ДНК – «на кончике ножа», т.е. 0,7 и 0,3 части соответственно.

Объем такой клетки порядка $4 \cdot 10^{-15} \text{ м}^3$, диаметр 20 мкм и масса $3,5 \cdot 10^{-12} \text{ кг}$.

А теперь коснемся одной из важнейших функций клетки – обмена с внешней средой. Для обеспечения жизнедеятельности клетки нужно подводить к ней кислород, «топливо», отводить углекислый газ, продукты синтеза и шлаки.

Отметим, что не только характерный размер клеток животных, но и диаметры эритроцитов и капиллярных сосудов примерно одинаковы. Так, размер эритроцитов, участвующих в газообмене с клетками, меняется для млекопитающих в диапазоне 5–10 микрон. Диаметр капилляров составляет 3–30 микрон. Близость этих величин имеет глубокую природу. А именно: на расстояниях порядка 10 микрон происходит изменение характера движения вещества в организме.

Рассмотрим этот последний подход к оценке характерного размера клеток, эритроцитов и капилляров несколько подробнее.

Конвекция и диффузия. Поясним смысл этих понятий. Как обеспечить быструю доставку веществ к множеству клеток? Один из путей – организация направленного движения вещества потоком крови, т.е. конвекции. В теле животных так переносится кровь по сосудам. Конвекция весьма эффективна при движении по крупным сосудам. По мере удаления от сердца и приближения к «потребителям» (клеткам) сеть сосудов становится все разветвленнее, а их диаметр уменьшается. При этом должна снижаться скорость перемещения крови по сосудам. Причина в том, что при движении вязкой жидкости по сосуду ее давление падает, причем потери

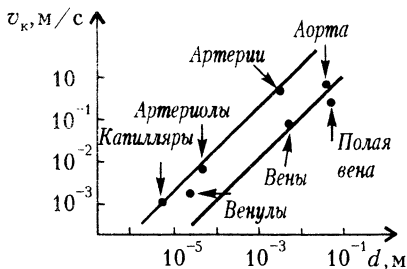


Рис. 1. Зависимость скорости движения крови по кровеносным сосудам человека от их диаметра

суда. То же касается и длины каналов. Эти тенденции действительно реализуются в кровеносной системе животных. В качестве примера на рисунке 1 приведена зависимость средней скорости крови от диаметра кровеносных сосудов у человека. Эта зависимость имеет примерно линейный характер:

$$v_k \sim (20 - 100)d.$$

Таким образом, по мере уменьшения диаметра кровеносных сосудов течение все более замедляется. В некотором смысле эффективность конвекции при небольших значениях диаметра канала падает.

Теперь обратимся к диффузии.

Диффузия – это перемещение вещества за счет случайного блуждания его молекул. Двигаясь хаотично, молекула то удаляется от начальной точки, то приближается к ней. При этом оказывается, что среднее расстояние до начальной точки пропорционально не времени t (как при равномерном движении по прямой), а \sqrt{t} :

$$d = \sqrt{2Dt},$$

где введенный таким образом коэффициент D называют коэффициентом диффузии. Выразив время t , найдем среднюю скорость распространения диффузионного процесса на расстояние d :

$$v_d \sim \frac{d}{t} \sim \frac{D}{d}.$$

Таким образом, на больших расстояниях процесс диффузии

давления пропорциональны скорости жидкости и длине сосуда и обратно пропорциональны площади его сечения.

Для того чтобы потери давления не были слишком велики (в противном случае жидкость сквозь такой канал просто не потекла бы), скорость потока должна убывать по мере уменьшения диаметра со-

замедляется, на малых же он очень эффективен.

Сопоставление формул для скорости конвективного v_k и диффузионного v_d процессов дает нам некоторый характерный размер d_0 (рис.2):

$$d_0 \sim \sqrt{\frac{D}{20 - 100}},$$

при котором скорости обоих процессов сравниваются.

Коэффициент диффузии веществ в воде имеет порядок $D \sim 10^{-9} \text{ м}^2/\text{с}$, поэтому характерный размер $d_0 \sim 3 - 7 \text{ мкм}$. Это и есть масштаб размеров капилляров, клеток и эритроцитов. Иначе говоря, до величины d_0 происходит конвективное движение вещества, после — диффузионное всасывание.

Наша новая оценка практически совпала с «кулинарной». Это косвенно свидетельствует о том, что клетке с ее размерами «деваться», в общем, некуда. Отличие 3 — 7 микрон (оценка) от 10 — 20 микрон (реальный размер клеток) может быть объяснено упрощенным характером подхода. А это, в свою очередь, — попыткой удержаться на сравнительно простом уровне изложения.

В заключение — несколько кратких пояснений к другим строчкам таблицы 1. Природа части из них в настоящее время еще не вполне ясна.

1. Ресурс сердца масштаба миллиарда ударов за время жизни. Эта цифра хорошо соответствует данным для млекопитающих. Для человека она, казалось бы, дает заниженную оценку — при периоде пульсаций сердца человека, равном примерно секунде, миллиарду соответствует 30 лет. Реальная продолжительность жизни людей в настоящее время в 2 — 3 раза больше. На рубеже веков она была близка к «табличной» (т.е. 30 лет) — в основном из-за эпидемий, высокой детской смертности и худших условий жизни и труда. Сейчас среди млекопитающих только человеку удалось подняться немного над статистикой.

Частота пульсаций сердца уменьшается с ростом массы тела. Так, сердце 30-граммовой мыши совершает 600 ударов в минуту, и продолжительность ее жизни примерно

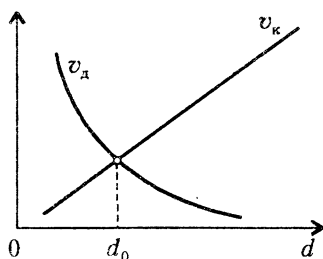


Рис.2. Вид зависимости скоростей v_k и v_d от характерного размера d

3 года. Для слона это 30 ударов в минуту и 60 лет соответственно.

2. Сам ресурс сердца необычайно велик. Среди движущихся механизмов в неживой природе соперничать с ним смогут, пожалуй, только часы, да и те, в отличие от сердца, нуждаются в периодической чистке и починке.

3. Три последние позиции таблицы 1 отражают некоторые оптимальные соотношения, отработанные в ходе длительной эволюции.

Так, в случае с температурой ее повышению соответствует быстрый рост активности ферментов – катализаторов обменных реакций. Но при температуре 40 – 45 °C начинается денатурация белков. Поэтому 37 – 38 °C – наилучшая температура для работы ферментов у наземных млекопитающих.

Отношение длительности дыхательного и сердечного циклов ($t_d/t_c \approx 4$ для всех млекопитающих) должно следовать из того очевидного факта, что эритроциты крови разносят от органов дыхания кислород и возвращают обратно углекислый газ. Поэтому сердечный и дыхательный циклы должны быть жестко связаны. Однако эта связь не прямая.

Причина постоянства относительной массы сердца, легких, мышц и некоторых других органов еще менее ясна. Часть из них (это относится к мышцам и костям скелета) может быть в принципе объяснена тем, что животные должны передвигаться в поисках пищи. В то же время относительная масса других важных органов: почек, печени и в особенности мозга растет по мере уменьшения размеров тела.

КАК МЫ ДЫШИМ?

К.Ю.Богданов

О чем рассказывает электрокардиограмма? Как летучие мыши в полной темноте ловят мошкарку? Как почтовые голуби находят дорогу домой? Ответы на эти и многие другие вопросы дает биофизика – наука, изучающая физические явления в живых организмах, лежащая на стыке физики и биологии, использующая новейшие достижения физики в биологических исследованиях. Попробуем и мы, вооружившись школьными знаниями физики, ответить на, казалось бы, простой вопрос: как мы дышим?

Наша дыхательная система. При нормальном дыхании наш организм потребляет в день около 0,5 кг кислорода и выделяет почти такое же количество углекислого газа. И поступление кислорода, и выход углекислого газа осуществляются через легкие.

Внутреннее пространство легких сообщается с атмосферой посредством воздухоносных путей. Воздухоносные пути состоят из носовой полости, где вдыхаемый воздух подогревается и увлажняется, глотки, гортани, трахеи и двух главных бронхов, подводящих воздух к правому и левому легкому. Каждый бронх дробится на более мелкие бронхи (бронхиолы) и заканчивается микроскопическими легочными пузырьками – альвеолами, окруженными со всех сторон густой сетью кровеносных сосудов. Альвеолы, которых у взрослого человека насчитывается около 700 миллионов, представляет собой соединенные друг с другом пузырьки, наполненные воздухом. Диаметр альвеол составляет в среднем 0,1 мм, толщина их стенок 0,4 мкм. Общая поверхность альвеол у взрослого человека около 100 м^2 . В каждый момент времени в кровеносных сосудах, оплетающих альвеолы, находится приблизительно 70 мл крови, из которой в альвеолы диффундирует углекислый газ, а в обратном направлении – кислород. Огромная поверхность альвеол позволяет менее чем за одну

секунду насытить эту кровь кислородом и освободить ее от избытка углекислого газа.

Дыхание и мыльные пузыри. Легко ли нам сделать вдох? На сколько давление воздуха внутри легких (внутри альвеол) при вдохе превышает давление снаружи (в плевральной полости)?

Если считать, что каждая альвеола – это полый шарик из эластичной мембраны, то давление, необходимое для поддержания такого шарика в раздутом состоянии, при заданном внешнем давлении должно полностью определяться диаметром шарика и упругими свойствами мембраны. Так ли это?

В 1929 году швейцарский ученый Карл фон Нииргард обнаружил, что давление, необходимое для раздувания легких, можно значительно уменьшить, если заполнить легкие физиологическим раствором. Это никак не вязалось с представлением об альвеолах как о полых эластичных шариках: если бы при вдохе нам надо было преодолевать только силы упругости, то наши усилия не зависели бы от того, заполнено легкое раствором или нет – ведь силы упругости от этого не зависят. Данные, полученные Нииргардом, стали объяснимы, когда выяснилось, что каждая альвеола изнутри покрыта тонким слоем жидкости. Это обстоятельство существенно влияет на механические свойства альвеолы. В частности, давление, необходимое для раздувания альвеолы, оказывается больше, чем в случае полого шарика из легочной ткани. И вот почему.

Известно, что поверхность жидкости ведет себя подобно растянутой пленке – обладает поверхностным натяжением. Чтобы оценить роль сил поверхностного натяжения в механике альвеолы, рассмотрим пленку жидкости, имеющую форму сферы. Простейший пример такой пленки – мыльный пузырь. Давление воздуха внутри пузыря из-за поверхностного натяжения жидкости всегда оказывается больше внешнего давления. Величина избыточного давления внутри сферы радиусом R определяется соотношением Лапласа $\Delta p = 2\sigma/R$, где σ – коэффициент поверхностного натяжения пленки. Это избыточное давление тем больше, чем меньше радиус сферы. В пленке мыльного пузыря и внутренняя, и внешняя поверхности соприкасаются с воздухом, и σ пленки равно удвоенному значению коэффициента поверхностного натяжения жидкости. В альвеолах контакт воздух – жидкость осуществляется лишь с одной стороны, изнутри.

Давайте оценим величину Δp . Для межклеточной жидкости $\sigma = 5 \cdot 10^{-2}$ Н/м; примем это значение и для жидкости, выстилающей внутреннюю поверхность альвеолы. Полагая $R = 50$ мкм $= 5 \cdot 10^{-5}$ м, получаем $\Delta p = 2 \cdot 10^3$ Н/м².

На рисунке 1 приведена зависимость объема легких от давления внутри них (точнее, от того, на сколько это давление превышает внешнее). Из графиков видно, что если не все, то по крайней мере значительная часть давления, растягивающего легкие при вдохе, идет на преодоление сил поверхностного натяжения. Когда же легкие заполнены физиологическим раствором, дополнительное давление необходимо лишь для преодоления упругих свойств легочных тканей. Очевидно, что разница между двумя кривыми на рисунке 1 и представляет

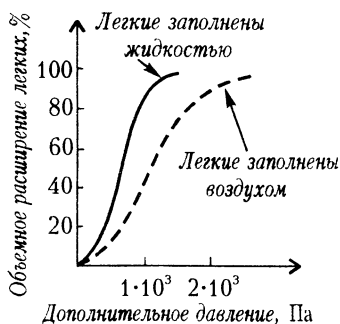


Рис. 1

вклад сил поверхностного натяжения в эластичность легкого. При обычном вдохе объем легких человека составляет около 50% их максимального объема. Как следует из рисунка 1, в этом диапазоне вклад сил поверхностного натяжения составляет более 30%.

Не все так просто. Привлечение сил поверхностного натяжения для объяснения механических свойств легкого приводит к следующему «парадоксу» при объяснении взаимодействия между соседними альвеолами. На рисунке 2 схематически показаны две соседние альвеолы, имеющие разные

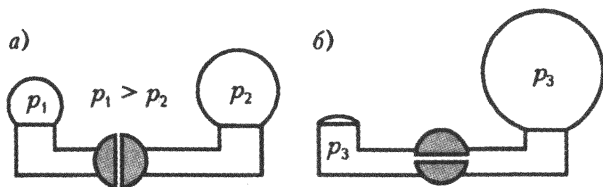


Рис. 2

размеры. Предположим сначала, что воздушные полости альвеол не сообщаются друг с другом (рис.2,а). Давление воздуха p_1 в левой альвеоле больше, чем давление p_2 в правой

(поскольку $R_1 < R_2$). Поэтому, как только мы откроем «кран», соединяющий воздушные полости альвеол, воздух из левой альвеолы начнет перетекать в правую, пока давления в обеих альвеолах не станут одинаковыми (рис.2,б). Таким образом, при соединении воздушных полостей двух неодинаковых альвеол большая всегда будет раздуваться, а меньшая – спадать. Очевидно, что такое взаимодействие между соседними альвеолами привело бы к спадению всех мелких альвеол легкого и к разрыву крупных; в результате легкое уже не могло бы выполнять своей функции. Как же мы все-таки дышим?

Рассматривая взаимодействие между соседними альвеолами, мы заранее считали, что поверхностное натяжение одинаково у различных альвеол и не зависит от того, в каком состоянии – раздутом или спавшемся – они находятся. У чистых жидкостей поверхностное натяжение действительно не зависит от размеров поверхности. Но у жидкостей, содержащих различные примеси, σ зависит от величины поверхности, по которой они граничат с газом.

Опять Природа все предусмотрела. Вещество, содержащееся в виде примеси в жидкости, смачивающей изнутри поверхность альвеол, так регулирует величину поверхностного натяжения, что σ минимально в начале вдоха (минимальная поверхность) и максимально в его конце (максимальная поверхность). Поэтому, несмотря на то, что радиус альвеол в начале вдоха очень мал, вклад сил поверхностного натяжения невелик. Это позволяет раздуть спавшиеся альвеолы относительно малым давлением. В то же время увеличение σ с увеличением радиуса альвеолы препятствует ее чрезмерному раздуванию в конце вдоха. Кроме того, такая зависимость σ от размера альвеолы регулирует взаимоотношения между соседними альвеолами, не давая проявляться механизму, проиллюстрированному рисунком 2.

Почему примеси делают поверхностное натяжение зависимым от площади поверхности? Как правило, примеси, понижающие σ , по своей химической структуре очень близки к обычному мылу и при растворении образуют тонкую пленку на поверхности воды. Если концентрация примеси высока, так что пленка может покрыть непрерывным слоем всю поверхность воды, то σ такой жидкости равняется определенному для данной примеси значению. Когда же концентрация примеси недостаточна, чтобы покрыть пленкой всю поверхность, поверхностное натяжение жидкости будет находиться

между соответствующими значениями σ для воды и примеси. В этих случаях увеличение поверхности жидкости ведет к уменьшению поверхностной концентрации примеси и вызывает увеличение σ , приближая его значение к σ для воды. При уменьшении поверхности жидкости σ будет уменьшаться.

Теперь посмотрите на рисунок 3. На нем приведены зависимости поверхностного натяжения от площади поверх-

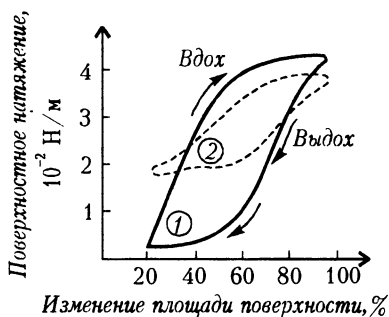


Рис. 3

ности контакта жидкости с воздухом. Обратите внимание: при одной и той же площади поверхности контакта величина σ на «вдохе» всегда больше, чем на «выдохе». Связано это вот с чем. Примесь, понижающая поверхностное натяжение, находится не только на поверхности жидкости, но и в ее объеме. При увеличении площади поверхности, т.е. при уменьшении концентрации примеси на поверхности, часть молекул примеси из глубины жидкости устремляется к поверхности. Однако равновесие устанавливается не мгновенно. Поэтому, например, в начале «вдоха» быстрое увеличение поверхности жидкости сопровождается резким ростом σ , так как растворенные в объеме примеси не успевают выйти на поверхность; равновесие между примесными молекулами наступает лишь в конце «вдоха». Точно так же в конце «выдоха» σ соответствует равновесному состоянию. Этим и объясняется зависимость σ от площади поверхности, показанная на рисунке 3.

Откуда берутся в легких вещества, понижающие поверхностное натяжение и этим облегчающие наше дыхание? Оказалось, что их синтезируют специальные клетки, находящиеся в стенках альвеол. Синтез этих веществ, называемых поверхностно-активными веществами (ПАВ), идет в течение всей жизни человека — от его рождения до смерти. Кривая 1 на рисунке 3 соответствует легочной жидкости, выделенной из альвеол здорового взрослого человека, а кривая 2 — жидкости с пониженным содержанием ПАВ, полученной из альвеол новорожденных, не способных к самостоятельному дыханию. Видно, что минимальное значение σ сильно увеличено по сравнению с нормой. В тех редких случаях, когда у новорож-

денного отсутствуют в легких клетки, производящие ПАВ, ребенок не может самостоятельно сделать первый вдох. К сожалению, до сих пор много новорожденных во всем мире умирает, так и не сделав своего первого вдоха, из-за недостатка или отсутствия в их альвеолах ПАВ.

Исключение из правил. Однако многие животные, дышащие легкими, совсем не страдают от того, что в их альвеолах нет ПАВ. В первую очередь это относится к холоднокровным — лягушкам, ящерицам, змеям, крокодилам и т.д. Так как этим животным не надо тратить энергию на обогрев собственного организма, их потребности в кислороде в среднем в десять раз меньше, чем у теплокровных. Поэтому и поверхность легких, через которую происходит газообмен между кровью и воздухом, у холоднокровных меньше, чем у теплокровных. Относительное уменьшение площади поверхности легкого, приходящейся на единицу его объема, у холоднокровных связано с увеличением приблизительно в десять раз диаметра их альвеол по сравнению с альвеолами теплокровных. Относительно большой радиус альвеол позволяет легко раздувать их даже в отсутствие на их внутренней поверхности ПАВ (ведь $\Delta p \sim 1/R$).

Второй группой животных, в легких которых отсутствуют ПАВ, являются птицы. Птицы — теплокровные и ведут довольно бойкий образ жизни. Энергетические затраты птиц и млекопитающих одинакового веса близки между собой. Высоки и потребности птиц в кислороде. Причем легкие птиц обладают уникальной способностью насыщать кровь кислородом при полете на большой высоте (около 6000 м), где его концентрация в воздухе падает в два раза по сравнению с концентрацией на уровне моря. Любое млекопитающее (в том числе и человек) на такой высоте начинает испытывать недостаток кислорода, резко ограничивает свою двигательную активность, а иногда даже впадает в полуобморочное состояние. Как же удастся легким птиц, не имеющим ПАВ, дышать и насыщать кровь кислородом? Почему это не получается у млекопитающих?

Займемся самокритикой. Чем плохи наши легкие? Во-первых, не весь вдыхаемый воздух участвует в газообмене с кровью: воздух, оказавшийся в конце вдоха в трахее и бронхах, не сможет отдать кислород в кровь и взять оттуда углекислый газ, так как в этих местах легкого практически отсутствуют кровеносные сосуды. Поэтому часть объема легких, занимаемую трахеей и бронхами, принято называть

«мертвым пространством». Обычно «мертвое пространство» легких человека имеет объем около 150 см^3 . Можно искусственно увеличить объем «мертвого пространства», если заставить себя дышать через длинную трубку. Каждый, кто пытался так делать, наверное, заметил, что при этом необходимо увеличивать глубину дыхания (объем вдыхаемого воздуха). Очевидно, что если объем «мертвого пространства» сделать равным максимально возможному вдоху (около $4,5 \text{ дм}^3$), то человек начнет задыхаться, так как свежий воздух вообще перестанет поступать в альвеолы. Таким образом, существование «мертвого пространства» в дыхательной системе млекопитающих является «ошибкой» Природы.

Создавая легкие млекопитающих, Природа, по нашему мнению, сделала и вторую «ошибку». Она связана с тем, что движение воздуха в легких меняет свое направление при переходе от вдоха к выдоху. Поэтому почти половину времени легкие практически бездействуют – во время выдоха свежий воздух в альвеолы не поступает.

А вот у птиц Природа вновь достигла совершенства. Помимо обычных легких, у птиц есть дополнительная система, состоящая из пяти и более пар воздушных мешков, связанных с легкими. Полости этих мешков широко разветвляются в теле и заходят в некоторые кости, иногда даже в мелкие кости фаланг пальцев. В результате дыхательная система утки, например, занимает около 20% объема тела (2% – легкие и 18% – воздушные мешки), в то время как у человека – лишь 5%. Легкое птицы, в отличие от легкого млекопитающего, представляет собой совокупность параллельно соединенных открытых с двух сторон тоненьких трубочек, окруженных кровеносными сосудами. Соединение мешков с легкими таково, что во время вдоха воздух через легкое птицы течет в том же направлении, что и при выдохе. Поэтому во время дыхания у птиц изменяются только объемы воздушных мешков, а объем легкого остается практически постоянным. А раз нет необходимости раздувать легкое, то не нужны и поверхностно-активные вещества в птичьих легких.

Вот как много интересного можно рассказать в ответ на, казалось бы, простой вопрос – как мы дышим.

ВОЛНЫ В СЕРДЦЕ

А.С.Михайлов

Раз в секунду по сердцу пробегает автоволна — волна временного уменьшения разности потенциалов между наружной и внутренней сторонами мембраны сердечных клеток. Эта волна возбуждается периодически действующим источником, расположенным в сердечной мышце, — синусовым узлом, который представляет собой группу клеток, работающих в автоколебательном режиме. Распространяясь по сердцу, волна возбуждения вызывает сокращение сердечной мышцы — биологического насоса, перекачивающего кровь по сосудам. Прохождение по сердцу такой волны изменяет электрический потенциал различных участков тела. Регистрируя эти небольшие изменения на электрокардиограмме, можно судить о правильности сокращений сердечной мышцы.



Рис.1. Распространение волны электрического возбуждения по правому предсердию. Показаны последовательные положения фронта волны; цифрами указано время в миллисекундах

На рисунке 1 показано, как распространяется волна электрического возбуждения по правому предсердию. Так выглядит нормальный режим работы сердца. Картина распространения волн в больном сердце может резко меняться. На смену редким волнам, регулярно отходящим от области синусового узла, приходят волны, быстро вращающиеся вокруг определенных центров. В таком состоянии, которое медики называют приступом пароксизмальной та-

хикардии, нормальные сокращения сердца нарушаются – оно бьется очень часто и «неправильно». Сокращения сердца как целого могут вообще прекратиться, так что будет происходить лишь хаотическое подергивание его отдельных участков – фибрилляция. Возникновение фибрилляции означает остановку работы сердца. Пароксизмальная тахикардия и фибрилляция являются основными причинами смертельных исходов при инфаркте миокарда.

Почему возникают тахикардия и фибрилляция? Каков механизм нарушения регулярной волновой картины в сердце? На эти вопросы дает ответ математическая теория волн в возбудимых средах. Мы же попытаемся качественно объяснить механизм возникновения опасных сердечных аритмий.

Волны возбуждения. Вы видели, как горит бикфордов шнур? Волна горения бежит вдоль шнура, не затухая. «Форму» такой волны можно представить в виде зависимости температуры от времени в различных точках вдоль пути распространения. При прохождении фронта горения происходит резкое, ступенчатое повышение температуры, а после израсходования запаса горючего в данном месте температура возвращается к начальному значению. Понятно, что при встрече две волны горения гасят друг друга.

Волны в живых организмах напоминают волну горения. Хорошим примером такой биологической волны служит импульс возбуждения, распространяющийся по нервному волокну. Этот электрический импульс бежит без затухания и искажений по нервному волокну диаметром менее 0,025 мм и длиной до 1,5 м с постоянной скоростью, составляющей обычно десятки метров в секунду. Нервное волокно – проводник, но очень плохой. Электрическое сопротивление на единицу его длины составляет примерно $10^9 - 10^{10}$ Ом/м, что в сто миллионов раз больше сопротивления медного провода того же диаметра. Если бы по мере движения нервного импульса к нему не подводилась непрерывно энергия, он бы затух очень быстро. Электрохимические механизмы, обеспечивающие подвод энергии и устойчивое распространение импульса, довольно сложны, и мы не будем их касаться.

Волны, распространяющиеся без затухания и сохраняющие свои характеристики постоянными за счет непрерывного подвода энергии извне, называют автоволнами. Наглядным аналогом автоволнового процесса служит распространение волны горения в среде, которая способна к последующему

восстановлению своих свойств. Простейший пример подобного явления – это горение степи. При каждом прохождении волны пламени вся трава сгорает, но затем она медленно отрастает вновь, так что степь можно поджечь еще раз. Степь как «возбудимая среда» обладает свойством восстановления.

Отдельные мышечные волокна сердца по своим электрическим характеристикам аналогичны нервному волокну. Мышечная ткань сердца состоит из плотно переплетенных волокон, электрически связанных друг с другом в участках контакта. Импульс возбуждения может переходить с одного волокна на другое, так что волны возбуждения способны распространяться по сердечной ткани в любом направлении. В этом смысле сердечная ткань является возбудимой средой.

Аксиоматическая модель возбудимой среды. Летом 1945 года американский ученый Норберт Винер (тот самый Винер, который сформулировал основные положения кибернетики) гостил на даче у своего друга Артура Розенблюта, директора Мексиканского института кардиологии. К тому времени было уже хорошо известно, что по сердцу распространяются волны электрического возбуждения (они были открыты еще в начале нашего столетия) и что некоторые сердечные аритмии связаны с циркуляцией волн возбуждения вокруг анатомических препятствий. Заинтересовавшись этим вопросом, Винер совместно с Розенблютом построил математическую модель, позволившую им в упрощенном виде объяснить основные особенности процессов в возбудимых средах.

В модели Винера и Розенблюта постулируется, что возбудимая среда образована сетью из элементов, каждый из которых способен пребывать в трех состояниях – покоя, возбуждения и рефрактерности; переходы между состояниями осуществляются скачком, подчиняясь определенным правилам.

Как реализуются эти состояния? В отсутствие внешних воздействий элемент неограниченно долго сохраняет состояние покоя. Внешним воздействием его можно перевести из этого состояния в состояние возбуждения. Пробыв определенное время $\tau_{\text{возб}}$ в таком состоянии, элемент переходит к состоянию рефрактерности, в котором он является невозбудимым. Состояние рефрактерности длится время $\tau_{\text{реф}}$; по прошествии этого времени способность к возбуждению восстанавливается – элемент переходит в состояние покоя. Все эти переходы схематически изображены на рисунке 2.

Дополнительное предположение модели состоит в том, что возбуждение может передаваться от возбуждаемых элементов к соседним, находящимся в состоянии покоя. В результате по среде распространяются волны возбуждения (рис. 3). Скорость c распространения этих волн постоянна.

Модель Винера – Розенблюта задает определенное поведение волн возбуждения в среде:

1. Существует минимальный временной интервал следования волн возбуждения. Этот период T_{\min} равен сумме длительностей состояний возбуждения и рефрактерности: $T_{\min} = \tau_{\text{возб}} + \tau_{\text{реф}}$. Если волны следуют с минимальным перио-

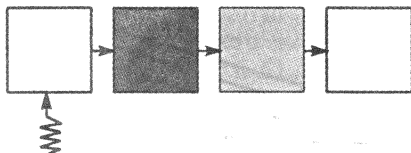


Рис.2. Последовательность смены состояний элемента возбудимой среды: покой, возбуждение, рефрактерность, покой

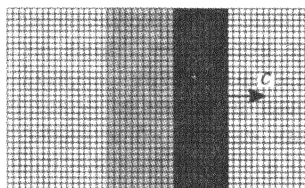


Рис.3. Волна возбуждения в аксиоматической модели возбудимой среды

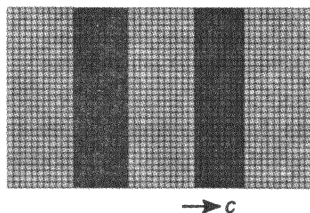


Рис.4. Максимально частая последовательность волн возбуждения

дом, т.е. с максимально возможной частотой, то все элементы среды находятся в двух состояниях: одни – в возбужденном состоянии, другие – в состоянии рефрактерности (рис.4). Минимальный пространственный интервал следования волн

$$L_{\min} = cT_{\min} = c(\tau_{\text{возб}} + \tau_{\text{реф}}).$$

2. При столкновении волны гасят друг друга. Это легко понять – ведь при столкновении возбужденные элементы оказываются «зажатыми» между двумя надвигающимися областями рефрактерности.

3. Волны возбуждения не отражаются от границ. Это утверждение доказывается аналогично предыдущему.

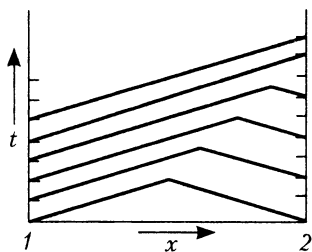


Рис. 5. Эффект подавления «медленных» источников. Показана временная развертка картины фронтов волн, испускаемых двумя источниками, которые имеют различные периоды. Левый высокочастотный подавляет правый низкочастотный источник. Вверх отложено время t , по горизонтали – координата x вдоль прямой, соединяющей центры двух источников

4. «Быстрые» источники волн подавляют деятельность всех более «медленных» источников. («Быстрые» – это источники, испускающие волны часто, через малые промежутки времени.) Убедимся в этом.

Пусть в среде имеются два периодически действующих источника, которые испускают волны через интервалы времени T_1 и T_2 . На рисунке 5 изображена временная развертка картины волн от этих двух точечных источников. Левый источник испускает волны возбуждения чаще, чем правый (т.е. $T_1 < T_2$). С течением времени точка встречи и гашения двух фронтов смещается в направлении к низкочастотному правому источнику, пока он не окажется полностью подавленным.

Таким образом, по прошествии достаточно большого времени в среде «выживает» лишь самый «быстрый» из источников.

5. Волна возбуждения может неограниченно долго циркулировать по кольцу или вокруг отверстия в возбудимой среде.

Возьмем узкую полоску возбудимой среды и свернем ее в кольцо. Если длина полоски $l > L_{\min}$, то по кольцу неограниченно долго может циркулировать волна возбуждения (рис. 6, а). Период ее циркуляции $T = l/c$.

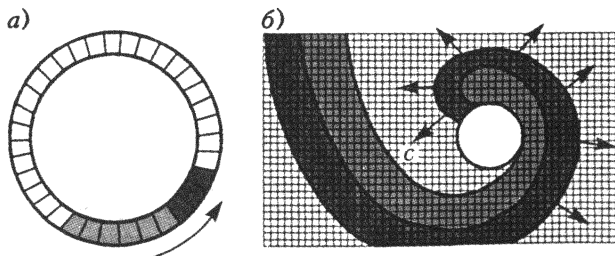


Рис. 6. Циркуляция волны возбуждения: а) одиночная волна, вращающаяся в кольце; б) спиральная волна, вращающаяся вокруг отверстия в возбудимой среде

Станем теперь увеличивать внешний радиус кольца и устремим его к бесконечности. Тогда вместо кольца мы получим отверстие в возбудимой среде (рис.6,б). Что произойдет с волной возбуждения в кольце, когда мы будем растягивать его таким образом? Она будет продолжать вращение, но ее фронт изогнется.

Действительно, фронт волны возбуждения не может представлять собой прямую радиальную линию, вращающуюся вокруг отверстия с какой-то угловой скоростью ω . Ведь в таком случае на расстоянии r от центра отверстия скорость фронта равнялась бы $c = \omega r$ и неограниченно возрастала с увеличением r . Однако скорость распространения волн c постоянна. Это означает, что удаленные участки фронта станут отставать, и он примет со временем форму спирали.

Таким образом, вокруг отверстия в возбудимой среде может сколь угодно долго вращаться без затухания спиральная волна. Период ее вращения – это время, затрачиваемое на прохождение импульса возбуждения по всему периметру l отверстия, т.е. $T = l/c$. Если отверстие круглое и радиус его R , то период вращения $T = 2\pi R/c$, а частота вращения $\omega = 2\pi/T = c/R$.

Итак, мы познакомились с моделью Винера – Розенблюта. Как же объяснить с ее помощью возникновение сердечных аритмий?

Спиральные волны и сердечные аритмии. Стенки предсердия достаточно тонкие, поэтому ткань сердца здесь можно считать двумерной возбудимой средой. В результате нарушения кровоснабжения после инфаркта миокарда небольшие области сердечной ткани могут отмирать, теряя способность к проведению волн возбуждения. Эти области играют роль отверстий в возбудимой среде сердечной ткани.

К чему приведет циркуляция волны возбуждения вокруг одного из этих отверстий? Ответ зависит от того, как соотносятся период циркуляции с частотой волн, испускаемых синусовым узлом. Если частота вращения спиральной волны выше, чем частота генерации волн синусовым узлом, то спиральная волна является более быстрым источником и подавляет деятельность синусового узла. Поскольку радиусы отверстий – пораженных участков сердца – достаточно малы, а частота циркуляции волны обратно пропорциональна радиусу отверстия, так обычно и происходит. Волна, вращающаяся вокруг отверстия, захватывает все предсердие. Нормальный режим работы сердца нарушается. На смену ему устанавли-

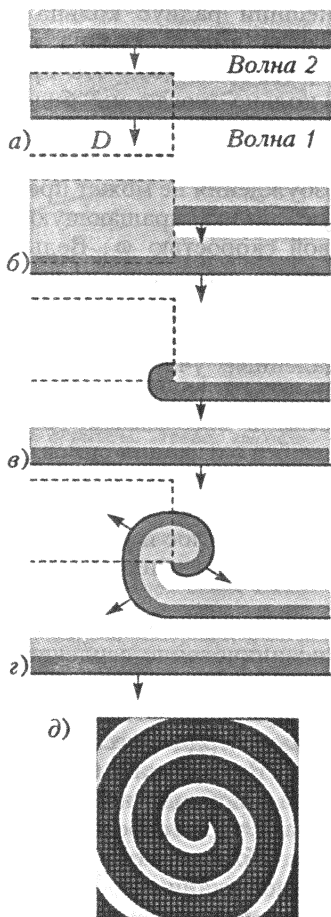


Рис.7. Рождение спиральной волны (D – область с повышенной рефрактерностью): а) исходное положение двух волн; б) вторая волна не входит в область D , возник разрыв фронта; в) возбуждение начинает распространяться внутрь области D ; г) возникла спиральная волна; д) спиральная волна через достаточно большой промежуток времени

ливается «трепетание» предсердия, т.е. развивается сердечная аритмия.

Спиральные волны могут рождаться из разрывов фронта волн возбуждения. Предположим, что в среде имеется область D , элементы которой обладают повышенной длительностью рефрактерного состояния. Пусть по среде движутся подряд друг за другом две волны возбуждения, отделенные небольшим временным интервалом (рис.7,а). После прохождения первой волны через область D находящиеся в ней элементы надолго остаются в состоянии рефрактерности. Возбуждение от второй волны не может проникнуть в эту область – фронт волны рвется (рис.7,б). Через какое-то время состояние рефрактерности в области D закончится, и элементы, находящиеся в этой области, вновь приобретут способность к возбуждению. Если к этому времени вторая волна еще не миновала область D , то возбуждение от фронта этой волны начнет распространяться внутрь области D (рис.7,в). Затем волна будет закручиваться вокруг области разрыва (рис.7,г), и с течением времени сформируется спиральная волна, показанная на рисунке 7,д.

Сердечная ткань неоднородна по своим свойствам, в том числе и по длительности рефрактерного состояния. Неоднородность еще более возрастает в

результате нарушения нормального питания клеток после инфаркта. При обычном режиме работы сердца интервал между очередными волнами возбуждения составляет 1 секунду, а длительность рефрактерного состояния около 0,1 секунды. Поэтому разброс в значениях рефрактерности, свойственный живой ткани, не приводит в обычных условиях к разрыву фронта волн возбуждения. При некоторых поражениях сердечной ткани, однако, в ней генерируется синусовым узлом дополнительная волна, отделенная от предыдущей очень малым временным интервалом. Если этот временной интервал достаточно короток (меньше суммы максимальной продолжительности рефрактерного состояния и длительности состояния возбуждения), фронт такой волны разорвется на границе области с повышенной рефрактерностью, и родится спиральная волна.

Время жизни спиральной волны в неоднородной среде конечно. Из-за неоднородности среды центр волны со временем смещается, блуждает по среде. Рано или поздно волна выходит на границу среды и исчезает. С исчезновением спиральной волны приступ учащенного сердцебиения заканчивается. Возможен, однако, и другой исход. На фронте волны возбуждения – на рукаве спиральной волны – могут образовываться вторичные разрывы при прохождении областей с повышенной рефрактерностью. В результате будет происходить размножение спиральных волн. Если скорость размножения волн превышает скорость их исчезновения на границах, число спиральных волн будет возрастать со временем, пока вся среда не будет заполнена короткими «обрывками» спиральных волн. Этот хаотический волновой режим наблюдается при фибрилляции – сокращения сердца как целого прекращаются, и происходит лишь хаотическое подергивание отдельных его участков.

Экспериментально было установлено, что для возникновения фибрилляции необходимо превышение «критической массы» сердечной ткани: вплоть до некоторого размера полоски такой ткани создать в ней самоподдерживающуюся фибрилляцию невозможно. Этот эффект нетрудно объяснить. Если принять, что распределение рефрактерности по среде случайно, то вероятность рождения новой спиральной волны из разрыва фронта одной из уже существующих волн примерно одна и та же для любой точки среды. Полное число новых спиральных волн, рождающихся в среде за единицу времени, пропорционально площади, занимаемой средой, и числу уже

имеющихся спиральных волн: $n_+ = \alpha L^2 N$, где L – линейный размер среды (мы считаем ее двумерной), N – число уже существующих волн, α – некоторый постоянный коэффициент. Число спиральных волн, которые за единицу времени исчезают на границах среды, равно $n_- = \beta NL$ (оно пропорционально длине границы), где β – постоянный коэффициент. Хаотический режим, наблюдающийся при фибрилляции, соответствует ситуации, когда скорость размножения спиральных волн превышает скорость их исчезновения, т.е. когда $n_+ > n_-$. Как видно из приведенных выше рассуждений, это возможно в том случае, когда линейный размер среды L выше критического значения $L_{кр} = \beta/\alpha$. В средах меньшего размера размножение спиральных волн подавлено процессом их ухода на границы.

Зная механизмы возникновения опасных сердечных аритмий, можно гораздо успешнее искать способы борьбы с ними или пути их предотвращения.

* * *

В этой короткой статье нам пришлось ограничиться только самыми простыми и наглядными объяснениями. Аксиоматическая модель Винера – Розенблюта сыграла свою роль в создании теории автоволновых явлений. Большой вклад в развитие этой теории внесли советские ученые – физики, биологи, математики, медики. Модель Винера – Розенблюта была подробно исследована и развита в работах участников семинара, организованного в 60-х годах советским математиком И.М.Гельфандом. В настоящее время для описания волн в возбудимых средах, в том числе – в ткани сердца, используют более детальные модели, формулируемые на языке дифференциальных уравнений в частных производных. Однако модель Винера – Розенблюта продолжает оставаться полезной во всех случаях, когда необходимо быстро получить качественную картину интересующего нас эффекта.

УЛЬТРАЗВУК В МЕДИЦИНЕ

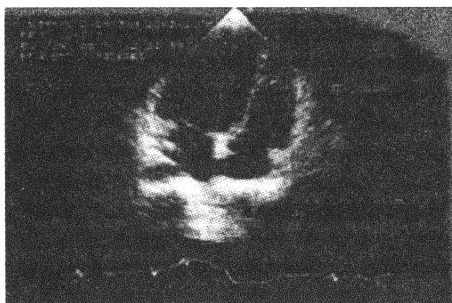
Р.Морин, Р.Хобби

Ультразвуковая диагностика – сравнительно недорогой метод исследования структуры и работы органов.

Как и слышимый звук, ультразвук представляет собой волны, распространяющиеся в среде. В медицине используются ультразвуковые волны с частотами от 1 до 10 МГц (для сравнения: слышимый звук имеет частоты от 30 Гц до 20 кГц). Скорость распространения звуковых волн в материале зависит от модуля объемной упругости E и от плотности материала ρ , а именно: $v = \sqrt{E/\rho}$. Для мягких тканей ее значение варьируется от 1400 до 1600 м/с. Соответствующие длины волн лежат в интервале 0,14–1,6 мм. (В таких твердых материалах, как кости, скорость звука достигает 4000 м/с.) При переходе волны из одной среды в другую происходит ее частичное отражение от границы, причем отношение амплитуд прошедшей и отраженной волн определяется отношением так называемых акустических импедансов этих сред (это чем-то напоминает частичное отражение света на границе двух сред с различными показателями преломления). Акустический импеданс среды с модулем объемной упругости E и плотностью ρ равен $Z = \rho v = \sqrt{E\rho}$. Чем сильнее отличаются импедансы двух сред, тем больше энергии отражается обратно на их границе раздела. Анализ отраженных от границ органов ультразвуковых сигналов позволяет строить достаточно четкие изображения.

Ультразвуковой сигнал получают с помощью прибора, преобразующего колебания электрического напряжения в механические колебания. Тот же самый прибор в некоторых электронных схемах, работающих в импульсном режиме, может использоваться и для обратного преобразования ультразвуковых колебаний в слабый электрический сигнал. В установках, действующих в непрерывном режиме, для излу-

Перевод с английского И.Мартина.



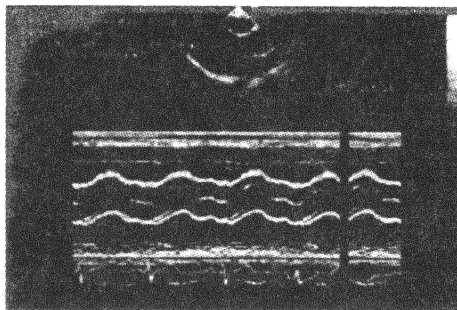
Ультразвуковая эхограмма, полученная методом B-scan. Это как бы мгновенный снимок продольного сечения сердца. Серия таких снимков позволяет судить о состоянии сердца. Датчик был установлен ниже сердца, и поэтому изображение сердца перевернутое

чения и детектирования волн используются различные приборы.

Измерения довольно сложны, так как волна при распространении в тканях теряет много энергии. Например, для волн с частотой 1 МГц ослабление составляет примерно 100 дБ/м. А это значит, что эхо (отраженный сигнал), приходящее от отдаленной поверхности, очень слабое. Разницу между сильными и слабыми сигналами удастся несколько сгладить использованием усилителей. В импульсных устройствах усилитель настраивают так, чтобы сигналы с большим запаздыванием и, соответственно, с большим ослаблением и усиливались больше.

Наиболее распространенным методом построения изображений является метод B-scan. Для излучения и для приема отраженных волн используется один прибор, который можно перемещать над телом пациента. Во избежание больших потерь энергии на границе тело – воздух, между прибором и кожей наносится гель. Прибор излучает короткие ультразвуковые импульсы. Измеряются время запаздывания и амплитуда отраженной волны. По времени запаздывания определяется расстояние до отражающей границы и потери энергии волны в среде. В результате на дисплее высвечивается точка, яркость которой пропорциональна амплитуде отраженной волны (с учетом поправки на затухание), которая, в свою очередь, зависит от отношения импедансов на отражающей поверхности. (Метод построения эхограммы отражен в названии: B-scan – от английских слов Brightness – яркость и scan – поле зрения.) Для получения полного изображения органа необходимо провести серию измерений в нескольких местах и в разных направлениях. В общей сложности это занимает несколько минут.

Эхограмма, полученная методом М-scan. Две яркие волнистые линии – это «график» изменения поперечного сечения аорты (верхняя кривая – движение передней стенки аорты, нижняя – задней). В верхней части снимка – изображение поперечного сечения сердца



Для исследования тех органов, которые не остаются неподвижными, используется метод М-scan (М – от английского Moving – движущийся). Этим методом исследуют, например, движения клапанов сердца. Через небольшие промежутки времени испускаются короткие импульсы ультразвука. Положение клапана со временем меняется, меняется и время запаздывания. Для построения эхограммы обычно используют самописец, который вырисовывает как бы график зависимости запаздывания эха во времени. Точнее, получается множество графиков, каждый из которых соответствует колебаниям небольшого участка клапана, стенки сердца или еще чего-нибудь, находящегося за сердцем и перед ним.

С помощью ультразвука можно измерять скорость течения крови в сосудах. Метод измерения основан на эффекте Доплера – зависимости частоты отраженного сигнала от скорости движения отражателя. Если отражающие частицы (например, красные кровяные тельца) движутся со скоростью u под углом θ к направлению распространения волны, то частота отраженной в обратном направлении волны будет

На этой эхограмме изображен спектр потока крови в устье легочной артерии – изменение скорости тока крови во времени (в зависимости от фазы сердечного цикла). По спектру можно определить максимальную, среднюю, интегральную скорости потока



сдвинута относительно исходной частоты ν на величину $\Delta\nu = 2\nu(u \cos \theta)/v$. Для $u = 0,1$ м/с и $\nu = 2$ МГц при $\theta = 0$ этот сдвиг равен 260 Гц. Если составить биения из отраженной и исходной волн, то частота биений будет лежать в слышимом диапазоне (130 Гц). По сдвигу частоты можно судить о состоянии кровеносных сосудов (так, при сужении сосудов скорость кровотока уменьшается). При измерении скорости излучатель настраивают так, чтобы биения были громкими и частыми. Сигнал при этом звучит как серия «паф-паф» в такт с ударами сердца. Затем аппарат определяет значение $\Delta\nu$.

Интенсивность ультразвука, используемого для диагностики, обычно не превышает 10^3 Вт/м². Насколько известно, при таких интенсивностях вредные побочные эффекты отсутствуют. При более высоких интенсивностях ткани довольно сильно нагреваются. Иногда это используют для снятия острых болевых ощущений в спине, в плечевом поясе, а также при повреждениях мышц. При интенсивностях свыше $7 \cdot 10^6$ Вт/м² повышение температуры может вызвать повреждение тканей, а при 10^7 Вт/м² и более перепады давления в ультразвуковой волне могут приводить к образованию и схлопыванию микрополостей. Эти эффекты используются в хирургии.

ОБ ИНТЕРФЕРЕНЦИИ, ДЕЛЬФИНАХ И ЛЕТУЧИХ МЫШАХ

А.Н.Духовнер, А.Л.Решетов, Л.А.Решетов

Вы, наверное, слышали о том, что дельфины и киты «переговариваются» с помощью звуковых сигналов. Не новость для вас и тот факт, что летучая мышь «видит» с помощью ультразвукового локатора. Мы хотим познакомить вас с тем, какую роль в их акустическом мире играет интерференция. Само собой, речь пойдет об интерференции акустических сигналов, или, как говорят, об акустической интерференции. Но сначала вспомним некоторые общие факты.

Наложение волн одинаковых периодов (интерференция), при котором происходит перераспределение энергии в пространстве, является одним из важнейших проявлений всех волновых процессов. Устойчивая во времени интерференция имеет место только для когерентных волн, источники которых колеблются с одинаковой частотой и сохраняют постоянную разность фаз в продолжение всего времени наблюдения. При этом происходит увеличение амплитуды колебаний в одних точках пространства и уменьшение в других – в зависимости от соотношения между фазами этих волн. Если колебания источников волн происходят по гармоническому (синусоидальному) закону, то амплитуда результирующей волны в какой-либо точке пространства определяется формулой

$$A = \sqrt{A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2 \cos \varphi}, \quad (1)$$

где A_1, A_2 – амплитуды складывающихся волн, а $\varphi = |\varphi_2 - \varphi_1|$ – разность их фаз в рассматриваемой точке.

Практическое значение имеет наложение волн от одного источника колебаний, пришедших в место приема различными путями. В этом случае величина φ зависит от разности расстояний, проходимых волнами от источника до точки

интерференции, т.е. от разности хода Δr :

$$\varphi = k|r_2 - r_1| = k\Delta r, \quad (2)$$

где $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ — волновое число, λ — длина волны в данной среде.

Полезно вспомнить, почему невозможно получить интерференционную картинку от двух разных источников света. Дело в том, что световая волна состоит из огромного числа коротких световых импульсов, излученных отдельными атомами. Длительность импульсов $10^{-8} - 10^{-9}$ с гораздо больше периода колебаний видимого света, равного по порядку величины 10^{-15} с; это значит, что каждый импульс представляет собой как бы кусочек волны, содержащий большое число отдельных колебаний. В нелазерных источниках испускание таких импульсов разными атомами происходит совершенно хаотически, вразнобой. Поэтому при встрече двух импульсов разность фаз φ может быть совершенно произвольной, и интерференцию наблюдать невозможно. Выход известен: свет проходит от источника к точке наблюдения разными путями, и происходит интерференция между двумя импульсами-близнецами, испущенными одним и тем же атомом. В этом случае φ зависит только от разности хода Δr и длины волны света λ . Четкая картинка получается лишь при небольших Δr . Именно сильная зависимость φ от Δr и λ позволяет использовать явление оптической интерференции в большом количестве прецизионных (сверхточных) приборов.

Теперь перейдем к описанию акустической сигнализации и эхолокации. В обоих случаях сигнал имеет импульсную структуру. Источник посылает один за другим короткие импульсы; прием этих импульсов позволяет наблюдателю получить заложенную в сигнале информацию или просто определить местонахождение источника. Передача информации в виде последовательности импульсов широко используется как в радиотехнике, так и в акустических приборах; ниже мы подробнее опишем, как ей пользуются киты и дельфины. В случае эхолокации (которую используют дельфины и летучие мыши) информацию несет сигнал, пришедший назад после отражения от исследуемого объекта.

Чтобы обеспечить четкий прием сигнала на фоне помех, выгодно использовать импульсы, содержащие волны постоянной частоты. Но здесь же кроется и опасность: если импульс пришел в точку наблюдения двумя или несколькими путями, то возможно полное или частичное ослабление этого импульса

за счет интерференции (если разность фаз равна π , 3π и т.д.). Потеря даже нескольких импульсов может привести к существенному искажению информации, к потере объекта поиска и т.д.

В случае технического применения необходимая надежность приема сигналов достигается значительным увеличением мощности излучения и использованием автоматической регулировки усиления. Наш же рассказ о том, каким остроумным способом летучие мыши и дельфины устраняют влияние случайных изменений суммарной амплитуды при интерференции волн и даже находят этому явлению полезное применение. Оказывается, для этого им достаточно определенным образом менять частоту сигнала в пределах каждого импульса.

Для описания конкретных примеров акустической локации (для летучих мышей и дельфинов) и сигнализации (для дельфинов и китов) важна не только информация о длительности сигналов и их частотной структуре, но и вид так называемой диаграммы направленности излучения и приема (во многих случаях эти диаграммы можно считать одинаковыми).

Диаграмма направленности излучения и приема (рис.1) является результатом наложения волн от каждого элементарного участка поверхности антенны, которые, согласно принципу Гюйгенса, являются источниками сферических волн. В направлении перпендикуляра к поверхности антенны волны от каждого элементарного участка суммируются всегда в фазе, и сигнал получается максимальным. В других направлениях колебания от различных участков суммируются с некоторой разностью фаз ϕ , и, согласно формуле (1), суммарная амплитуда оказывается меньше максимальной. Во многих направлениях колебания различных участков суммируются в противофазе, и интенсивность вообще равна нулю. Ширина угла γ главного лепестка обратно пропорциональна частоте колебаний и линейному размеру излучающей поверхности.

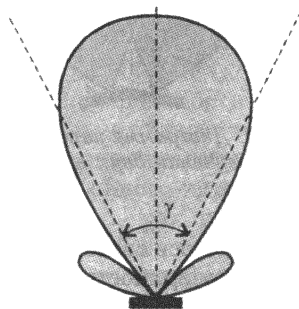


Рис.1. Диаграмма направленности излучения

Летучие мыши охотятся в темное время суток, а днем спят.

Поиск и преследование насекомых и бабочек на фоне скал, деревьев, листьев и других хорошо отражающих акустические волны поверхностей они осуществляют при помощи своих звуковых локаторов. Импульсы, излучаемые летучими мышами, отличаются большим разнообразием. Некоторые виды летучих мышей излучают импульсы длительностью от 0,2 до 5 мс, другие – импульсы длительностью до 100 мс. В пределах одного импульса частота излучаемых колебаний может меняться на октаву (в два раза), например от 100 до 50 кГц. В длинных сигналах некоторые семейства мышей меняют частоту только в начале или в конце каждого импульса.

Для акустической антенны летучих мышей величина угла γ основного лепестка диаграммы направленности равна примерно 60° . Широкий угол главного лепестка диаграммы ускоряет поиски насекомых и бабочек, но уменьшает точность определения направления, так как изменения интенсивности сигнала около оси лепестка незначительны. Увеличить точ-

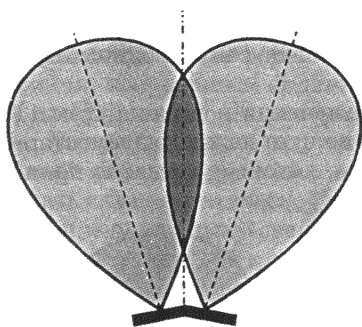


Рис. 2. Диаграмма направленности излучения двух идентичных антенн

ность определения направления можно при использовании диаграммы из двух лепестков, имеющих узкую область пересечения (темный участок на рисунке 2). Эту область называют равносигнальной, так как только в этом направлении сигналы двух лепестков имеют сравнимые интенсивности. Такую диаграмму можно получить с помощью двух идентичных излучающих поверхностей, расположенных под некоторым углом с разных сторон от центральной оси системы, или поочередным перемещением одной такой поверхности в два разных положения.

Орган слуха дельфинов реагирует на широкий спектр частот – от 1 до 200 кГц. Гидролокацию они осуществляют на высоких частотах. Вследствие дифракции волны хорошо отражаются только от объектов, линейные размеры которых больше длины волны λ . Так как $\lambda = v/f$, где v – скорость распространения акустической волны, а f – ее частота, для обнаружения относительно мелкой рыбы дельфины должны излучать более высокие частоты. Высокие частоты и относи-

тельно большие размеры излучателя уменьшают ширину диаграммы направленности излучения, и она составляет $10 - 15^\circ$. При гидролокации дельфины излучают короткие импульсы («щелчки») длительностью от 0,01 до 0,1 мс. Вероятность наложения волн при узком угле основного лепестка диаграммы направленности и коротких импульсах незначительна. Частоту колебаний в импульсах гидролокации они не меняют.

Совершенно другая ситуация имеет место при акустической сигнализации. Дельфины и другие китообразные ведут стадный образ жизни. Поэтому им необходимы сигналы связи и оповещения ненаправленного излучения большой дальности приема. Достигли они этого применением наиболее низких частот. При частотах колебаний $8 - 10$ кГц происходит практически ненаправленное излучение (диаграмма направленности имеет вид круга). Дальность приема акустических сигналов у китообразных примерно в 100 раз больше предела зрительной видимости. Согласно наблюдениям, кашалоты слышат друг друга на расстояниях до трех миль (одна морская миля равна 1852,3 м). Их детеныш может отплывать довольно далеко от родителей, и они все время знают, где он находится (прием звука имеет направленный характер). Детеныш также знает, где находятся его родители. Отметим, что роль зрения при контактах очень невелика. Киты, конечно, видят, но на малых расстояниях. Луч лазера проникает в толщу океана на глубину до 100 м, а дальность зрительной видимости даже в прозрачной воде не превышает $30 - 60$ м. Акустическую связь дельфины осуществляют сигналами относительно большой длительности — от 5 до 1000 мс (коммуникационные сигналы-«свисты»). Большие дальности распространения акустических волн относительно низких частот, а также большие длительности импульсов и ненаправленное излучение приводят к тому, что волны от одного источника таких колебаний приходят к месту приема, как правило, двумя или несколькими путями. Характерной особенностью акустического канала связи в морях и океанах является «многолучевость», и при неизменной частоте сигнала часто происходило случайное его ослабление из-за интерференции.

Вместо простых сигналов постоянной частоты животные излучают сложные. Они плавно изменяют период (частоту) колебаний, заполняющих каждый импульс. Наложение таких акустических волн приводит к тому, что в месте приема они суммируются с разными частотами. К чему же приводит сложение таких волн? Выясним это на простейшем примере

сложения двух колебаний, имеющих одну и ту же амплитуду A . Согласно тригонометрической формуле

$$A \sin \alpha + A \sin \beta = 2A \cos \frac{\alpha - \beta}{2} \sin \frac{\alpha + \beta}{2},$$

при суммировании колебаний двух разных круговых частот ω_1 и ω_2 результирующая амплитуда меняется по закону

$$2A \left| \cos \frac{(\omega_1 - \omega_2)t}{2} \right|, \text{ а частота заполнения равна } \frac{\omega_1 + \omega_2}{2}.$$

Когда ω_1 и ω_2 отличаются незначительно, суммарное колебание называют биением; частота изменения амплитуды равна раз-

ности частот: $f_6 = 1/T_6 = |f_1 - f_2|$

(рис.3). Период биений, возникающих при сложении волн, пришедших в место приема различными путями от источника переменной частоты, зависит от разности хода волн Δr , так как от Δr зависит сдвиг фаз складывающихся колебаний.

При излучении колебаний частоту можно менять таким образом, что при приеме волн, пришедших двумя или несколькими путями, период биений будет не больше длительности импульса. Тогда при приеме

таких сигналов за время длительности импульса будет не менее одного максимума ($A_1 + A_2$) и одного минимума ($A_1 - A_2$) амплитуды. Средняя мощность каждого такого импульса связи и оповещения дельфина при распространении волн двумя или несколькими путями остается неизменной. Это же относится и к каждому импульсу летучей мыши при отражении волн от двух рядом расположенных объектов. Частота биений $f_6 = |f_2(t) - f_1(t)|$ характеризует запаздывание второй волны относительно первой, пришедшей более коротким путем. По частоте биений летучая мышь может определить удаление жертвы охоты от хорошо отражающего фона (скалы, ствола дерева, листьев).

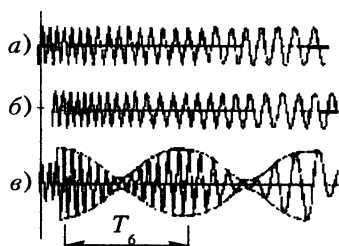


Рис.3. Суммирование колебаний плавно изменяющихся частот: а) первый импульс; б) второй импульс; в) результат сложения

С КАКОЙ СКОРОСТЬЮ РАСТЕТ ЗЕЛЕНЬ ЛИСТ?

А.А.Веденов, О.П.Иванов

Вы, наверное, обращали внимание, как быстро весной покрывается новой зеленью вспаханное и засеянное поле. Некоторое время оно стоит черное или коричневое, но вот появились маленькие зеленые искры ростков, и прямо на глазах за одну-две недели поле покрывается почти сплошным зеленым ковром (все это происходит, конечно, при условии, что все посеянные семена взошли, земля достаточно влажная и хорошо удобренная и дни стоят солнечные). Интересно, что при таком быстром росте растений в течение довольно больших интервалов времени можно замечать изменение в количестве зелени на поле практически каждый день. Не странно ли это? Ведь, казалось бы, делать это должно становиться все труднее – чем больше зелени в поле, тем сложнее заметить изменения в ее количестве.

Попробуем разобраться, при каком законе роста растений возможны такие наблюдения. Определим количество зелени в поле как суммарную площадь листьев растений (мы рассматриваем начало роста, когда листья почти не перекрываются). Будем считать, что эта величина пропорциональна средней текущей площади листьев одного растения (мы предполагаем, что все растения взошли одновременно и находятся в абсолютно одинаковых условиях).

Воспользуемся известным физиологическим законом Вебера – Фехнера¹. Этот закон говорит, что все органы чувств

¹ Закон назван именами немецких ученых девятнадцатого века физиолога и анатома Э.Вебера (1795–1878) и физика (а также психолога, философа и писателя-сатирика) Г.Фехнера (1801–1887). Вебер занимался экспериментальными исследованиями осязательных ощущений и глазомера, а Фехнер обобщил опытные факты, полученные Вебером и другими психологами и физиологами, в единой математической формулировке.

человека (слух, осязание, зрение) воспринимают изменение внешнего воздействия ΔB (силы звука, давления, яркости света) только тогда, когда относительное изменение $\Delta B/B$ больше определенного порогового значения:

$$\delta = \frac{\Delta B}{B} > \delta_{\Pi},$$

причем δ_{Π} не зависит от величины внешнего воздействия B . Если же $\Delta B/B < \delta_{\Pi}$, то изменения воздействия человек не воспринимает вообще. Приведем простой пример. Если положить на ладонь груз массой несколько граммов, а затем начать изменять массу груза, то уверенно сказать, что груз стал тяжелее или легче, можно только тогда, когда относительное изменение веса груза $|P - P_0|/P_0$ достигнет одной трети. В этом примере порог восприятия изменения силы $\delta_{\Pi}^P = 1/3$.

Для зрительного восприятия порог можно определить таким образом. Сделаем набор одинаковых геометрических фигур, например квадратов, разного размера и покажем один квадрат испытуемому. Потом будем показывать ему другие квадраты, немного отличающиеся от первого по размеру. Только тогда, когда относительное изменение длины стороны квадрата $|a - a_0|/a_0$ превысит пороговую величину δ_{Π}^a , испытуемый может ответить, больше или меньше исходного данный квадрат. Опыт показывает, что $\delta_{\Pi}^a \approx 1/10$.

В наших наблюдениях за количеством зелени в поле мы отмечали изменение в количестве зелени через равные промежутки времени (пусть для простоты это будут одни сутки). Отношение изменения количества зелени ΔK_t за этот промежуток времени (за любые сутки) к имеющемуся количеству зелени K_t в эти сутки будет постоянной величиной, равной порогу восприятия изменения количества зелени:

$$\frac{\Delta K_t}{K_t} = \delta_{\Pi}^K.$$

Из этого отношения мы можем получить уравнение для скорости изменения количества зелени:

$$v_t = \frac{\Delta K_t}{\Delta t} = \frac{\delta_{\Pi}^K K_t}{t_{\Pi}} = CK_t, \quad (1)$$

где $C = \delta_{\Pi}^K / t_{\Pi}$ — постоянная величина, равная отношению порога восприятия изменения количества зелени ко времени,

за которое изменение количества зелени на данном поле достигает порогового (у нас это одни сутки).

Полученное выражение показывает, что скорость роста количества зелени пропорциональна количеству уже имеющейся зелени. (Подобное выражение получается также при описании радиоактивного распада ядер. В этом случае скорость распада, т.е. число ядер, распадающихся в единицу времени, пропорциональна числу оставшихся ядер. Но, в отличие от роста растений, для распада ядер в правой части уравнения, аналогичного (1), стоит знак минус, так как количество первоначальных ядер уменьшается со временем.) Во всех случаях, когда скорость изменения какой-либо величины пропорциональна самой величине, зависимость рассматриваемой величины от времени имеет экспоненциальный характер. В нашем случае это означает, что к моменту времени t количество зелени может быть найдено по формуле

$$K_t = K_0 e^{Ct}, \quad (2)$$

где K_0 — начальная величина количества зелени при $t = 0$, а $e = 2,718$.

Чтобы показать, как из уравнения (1) получается экспоненциальная зависимость от времени (2), можно провести следующие нестрогие рассуждения. Пусть в начальный момент времени $t_0 = 0$ величина количества зелени равна K_0 и нас интересует значение K_t через время t . Разобьем временной интервал $0 - t$ на N равных промежутков времени длительностью τ ($\tau = t/N$) и будем фиксировать количество зелени в моменты времени $t_0 + \tau$, $t_0 + 2\tau$ и т.д. Через время τ после начального момента $t_0 = 0$ количество зелени будет равно

$$K_1 = K_0 + \Delta K_0 = K_0 + v_0 \tau = K_0 + K_0 C \tau = K_0 (1 + C \tau)$$

(на этом интервале времени мы приняли скорость роста постоянной и равной (см. (1)) $v_0 = CK_0$); аналогично, через время 2τ —

$$K_2 = K_1 + \Delta K_1 = K_1 + v_1 \tau =$$

$$= K_1 + K_1 C \tau = K_1 (1 + C \tau) = K_0 (1 + C \tau)^2$$

(скорость роста постоянна и равна $v_1 = CK_1$). Интересующее

нас значение K_t через время $t = N\tau$ будет

$$K_t = K_N = K_0(1 + C\tau)^N = K_0\left(1 + \frac{Ct}{N}\right)^N = \\ = K_0\left(1 + \frac{1}{M}\right)^{MCt} = K_0\left[\left(1 + \frac{1}{M}\right)^M\right]^{Ct},$$

где мы ввели обозначение $M = N/(Ct)$ (заметим, что M – безразмерная величина).

Понятно, что значение K_t будет тем точнее, чем чаще мы будем проводить промежуточные вычисления, т.е. чем больше будет N (ведь скорость роста непрерывно меняется во времени, и чем меньше τ , тем ближе подставляемые нами значения v_0, v_1, \dots к действительным значениям скорости). Если бесконечно увеличивать N (т.е. бесконечно уменьшать интервал времени τ), то и M будет стремиться к бесконечности, а величина $(1 + 1/M)^M$ при $M \rightarrow \infty$ стремится к постоянной, приблизительно равной 2,7182828 (например, $(1 + 0,01)^{100} = 2,7048$, $(1 + 0,001)^{1000} = 2,7169$). Число 2,7182828... в математике обозначают буквой e .

Таким образом, мы показали, что на начальной стадии рост растений в течение некоторого периода времени происходит по экспоненциальному закону. Экспериментальные исследования подтверждают, что при постоянных внешних условиях (постоянная освещенность, температура, влажность воздуха, регулярный полив, хорошо приготовленная почва) масса и размер всего растения и отдельных его частей на начальной

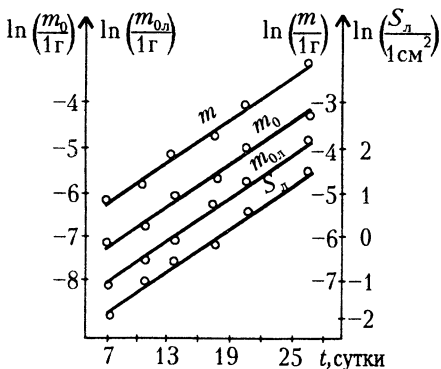


Рис. 1

стадии роста меняются экспоненциально во времени. На рисунке 1 приведены результаты опытов по выращиванию пшеницы в водном растворе питательных веществ. На этом графике масштаб по оси абсцисс линейный, а по оси ординат – логарифмический, т.е. на горизонтальной оси на равных расстояниях нанесены дни, прошедшие с начала

роста, а на вертикальной оси нанесены не значения измерявшихся величин, а логарифмы этих значений. Использование логарифмического масштаба в тех случаях, когда зависимость величин от аргумента близка к экспоненциальной $y = Ae^{Cx}$, приводит к тому, что график принимает вид прямой линии. Действительно, откладываемая на графике по оси ординат величина $\ln y$ является линейной функцией аргумента x :

$$\ln y = \ln A + Cx,$$

а график линейной функции – прямая линия. По этому графику легко определить константу C – она равна отношению приращения функции $\Delta(\ln y)$ к приращению аргумента Δx .

Итак, из рисунка 1 видно, что начиная с седьмого дня после появления всходов на протяжении трех недель общая масса растения m , сухая масса растения m_0 (т.е. масса органического вещества, остающегося после высушивания), сухая масса листьев $m_{0л}$, площадь листьев $S_л$ меняются экспоненциально со временем. В природе экспоненциальный рост является распространенным явлением. Примером может служить рост числа бактерий или одноклеточных организмов в сосуде при достаточном питании. В этом случае экспоненциальный рост имеет простое объяснение. Бактерия или отдельная клетка делятся на две через определенное время τ . Поэтому их число меняется со временем следующим образом:

$$n_\tau = n_0 \cdot 2^{t/\tau} = n_0 e^{Ct}, \text{ где } C = \frac{\ln 2}{\tau}.$$

Давайте найдем физическое объяснение экспоненциального роста растений и определим константу C скорости роста из законов сохранения вещества и энергии. Сначала надо построить модель растения, близкую к действительности и удобную для наших исследований. Задача выбора модели всегда возникает при физическом описании окружающих нас явлений. Модель должна выделять основные черты предмета или явления, которых достаточно для описания интересующих нас процессов. Возьмем такую модель растения. Будем считать, что оно состоит из одного листа (площадь которого равна площади всех его листьев), стебля и корня и что отношение полной массы к сухой массе как для всего растения, так и для отдельных его частей величина постоянная:

$$\frac{m}{m_0} = \frac{m_л}{m_{0л}} = \alpha$$

($m_{\text{л}}, m_{0\text{л}}$ – полная и сухая масса листа). Кроме того, будем считать постоянными величинами толщину листа d и отношение сухой массы листа к сухой массе всего растения:

$$\frac{m_{0\text{л}}}{m_0} = \varepsilon.$$

(Такие предположения можно сделать из количественных наблюдений на стадии экспоненциального роста травянистых растений. Конечно, такую модель нельзя использовать для описания роста других растений. Например, у деревьев отношение массы листьев к массе всего растения – величина переменная.)

Из курса биологии известно, что растение увеличивает свою массу благодаря процессу фотосинтеза – образованию органических веществ из углекислого газа, содержащегося в воздухе, и воды, содержащейся в растении, при поглощении листьями растения световой энергии. Количество образующегося сухого органического вещества Δm_0 пропорционально поглощенной световой энергии ΔE :

$$\Delta m_0 = \gamma \Delta E. \quad (3)$$

Если интенсивность светового потока I (световая энергия, падающая на единицу площади в единицу времени) постоянна, то

$$\Delta E = IS_{\text{л}} \Delta t. \quad (4)$$

Пользуясь нашей моделью растения, выразим площадь листа через сухую массу растения m_0 . Площадь листа равна объему листа, деленному на его толщину: $S_{\text{л}} = V_{\text{л}}/d$. Объем находим через сырую массу листа и его плотность: $V_{\text{л}} = m_{\text{л}}/\rho$ (где $\rho \approx 1 \text{ г/см}^3$), а сырую массу листа выражаем через m_0 с помощью формул для коэффициентов α и ε : $m_{\text{л}} = \alpha \varepsilon m_0$. В результате получаем

$$S_{\text{л}} = \frac{m_0 \varepsilon \alpha}{\rho d}. \quad (5)$$

Теперь, объединяя выражения (3)–(5), запишем уравнение для скорости изменения количества сухого органического вещества:

$$\frac{\Delta m_0}{\Delta t} = \frac{\gamma \varepsilon \alpha I}{\rho d} m_0.$$

Следовательно, масса сухого вещества меняется со временем

по закону

$$m_{0t} = m_0 e^{\gamma \epsilon \alpha I / (\rho d)},$$

и константа скорости роста равна

$$C = \frac{\gamma \epsilon \alpha I}{\rho d}. \quad (6)$$

Итак, константа скорости роста пропорциональна интенсивности падающего на растение света и зависит от параметров α , ϵ , d и γ . Для пшеницы α , ϵ и d можно определить с помощью графика на рисунке 1, взяв значения m , m_0 , $m_{0л}$ и $S_{л}$ для какого-то дня. Например, на 13-й день $m = 0,026$ г, $m_0 = 0,0043$ г, $m_{0л} = 0,0021$ г, $S_{л} = 1$ см² (эти значения мы вычислили с помощью калькулятора), и

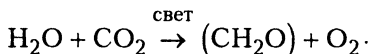
$$\alpha = \frac{m}{m_0} = 6, \quad \epsilon = \frac{m_{0л}}{m_0} = 0,48.$$

Толщину листа определим с помощью этих же величин из отношения объема листа $V_{л} = m_{0л} \alpha / \rho$ к его площади:

$$d = \frac{m_{0л} \alpha}{\rho S_{л}} = 0,012 \text{ см}.$$

Величина так называемого фотосинтетического эквивалента света γ определяет, на сколько увеличивается сухая масса растения при поглощении определенного количества световой энергии. Чтобы лучше понять смысл этой величины, выведем ее, рассматривая энергетику процессов, происходящих в растительной клетке.

Суммарно процесс фотосинтеза может быть представлен в виде уравнения



В левой части уравнения – знакомые вам молекулы воды и углекислого газа, а в правой – молекула кислорода и минимальная структурная группа углеводов CH_2O , которая получается при «усвоении» одной молекулы углекислого газа. Молекула фруктового сахара – фруктоза $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$ – состоит из 6 таких групп ($\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 = 6(\text{CH}_2\text{O})$), а молекула обычного сахара – сахароза $\text{C}_{12}\text{H}_{24}\text{O}_{12}$ – из 12. Слово «свет» над стрелкой означает, что для того чтобы такое превращение веществ могло произойти, необходимо поглощение световой энергии.

В написанном уравнении представлены только начальные и конечные продукты. А весь процесс фотосинтеза включает в себя много промежуточных веществ и реакций. В растительной клетке, точнее в расположенных внутри нее хлоропластах, работают настоящие молекулярные заводы, станки которых – белковые молекулы (ферменты) – могут, используя энергию света, вырабатывать электроэнергию, осуществлять электролиз, перераспределять атомы и группы атомов в молекулах.

Свет в хлоропластах поглощают молекулы хлорофилла. При поглощении молекулой одного фотона один из электронов молекулы переходит на более высокий энергетический уровень. В конечном итоге энергия этих возбужденных электронов превращается в работу по переносу заряда по электрической цепи, составленной в основном из белковых молекул. (Молекулы хлорофилла и связанные с ними белки играют роль фотоэлементов клетки.) Текущий по цепи ток осуществляет электролиз ионов, образующихся при диссоциации молекул воды (OH^- и H^+), и ионов вещества, которое является переносчиком атомов водорода от молекул воды к молекуле углекислого газа. Молекулу этого вещества-переносчика и ее ион будем обозначать A и A^+ соответственно.

Этот электролиз можно сравнить с электролизом чистой воды, в котором на катоде образуется водород, а на аноде – кислород. Правда, в случае электролиза чистой воды и в обычном электролизе других электролитов источник ЭДС и подводящие провода цепи находятся снаружи, вне электролита, а в электролит погружены только электроды (рис.2). В клетке же вся цепь электролиза погружена в электролит –

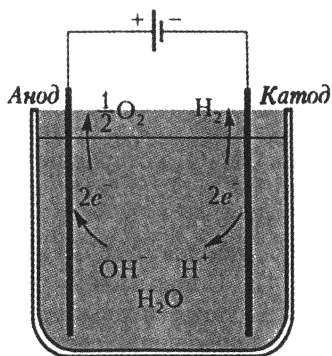


Рис. 2

заполняющий клетку раствор ионов (рис.3). Ее можно представить себе как трубку, внутри которой находятся изолированные от электролита источники ЭДС – соединенные с белками молекулы хлорофилла (клеточные фотоэлементы) и подводящие провода – белки и другие органические молекулы. На краях трубки в контакте с электролитом находятся электроды – также органические молекулы. Для совершения работы по пе-

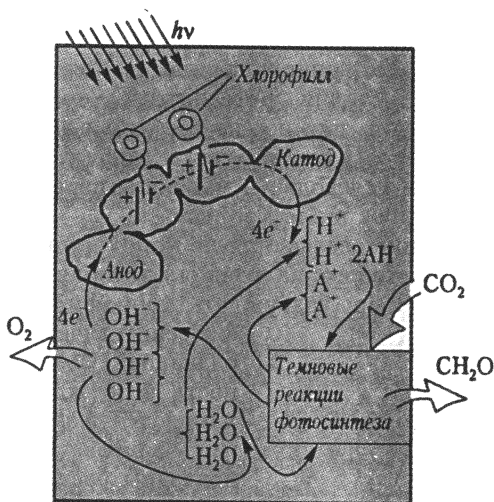
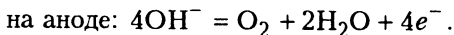
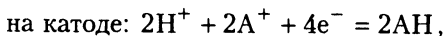


Рис. 3

реносу одного электрона по всей цепи электролиза требуется энергия двух возбужденных молекул хлорофилла, поэтому необходимое для электролиза напряжение на электродах создается двумя включенными последовательно клеточными фотоэлементами. На электродах происходят следующие процессы –



Теперь можно подсчитать, сколько квантов света требуется для получения одной углеводной группы. По уравнению фотосинтеза к молекуле углекислого газа нужно присоединить 2 атома водорода. Следовательно, для проведения превращения нужно подвергнуть электролизу 2 иона A^+ . Для этого надо перенести по цепи 4 электрона, для чего нужно 8 фотонов. (Напомним, что для переноса каждого электрона требуется возбуждение двух молекул хлорофилла.) Энергия каждого фотона должна быть больше 1,8 эВ – такова минимальная энергия, необходимая для возбуждения молекулы хлорофилла. Ток электролиза, происходящего под действием света в зеленых листьях, имеет значительную величину. При полной интенсивности солнечного света 400 Вт/см^2 суммарный ток электролиза во всех хлоропластах всех клеток одного квадратного сантиметра листа составляет примерно 0,005 А. Значит, в листочке площадью 30 см^2 течет ток 0,15 А, как в

лампочке для карманного фонаря. Правда, пока не изобретен способ для непосредственного использования этого тока.

На следующей стадии фотосинтеза — она называется темновой, потому что для нее не требуется энергия света — атомы водорода от АН переносятся к молекуле углекислого газа и образуются углеводы, а молекула-переносчик в виде иона A^+ опять готова к электролизу.

Обычно растение освещается не монохроматическим светом. Та часть светового излучения, которая представлена квантами, способными возбуждать хлорофилл, называется

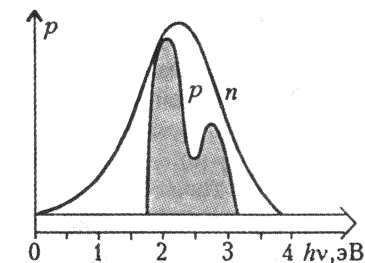


Рис. 4

фотосинтетической активной радиацией (ФАР). Эффективность возбуждения молекул хлорофилла зависит от энергии квантов. На рисунке 4 показаны распределение фотонов по энергиям в потоке солнечного излучения (кривая $n(h\nu)$) и кривая эффективности возбуждения молекул хлорофилла в зависимости

от энергии квантов (кривая $p(h\nu)$). С помощью этих кривых можно рассчитать среднюю энергию кванта ФАР в солнечном свете; она равна приблизительно 2,1 эВ. А полная энергия ФАР составляет примерно половину всей энергии падающего на Землю солнечного излучения. (Заметим, что у разных источников света доля ФАР в общей излучаемой энергии разная.)

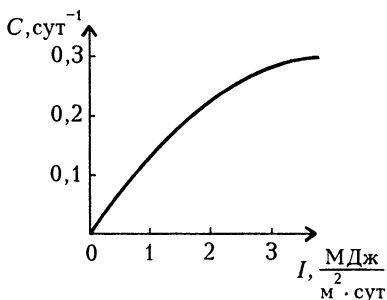
Теперь по уравнению (3) можно определить фотосинтетический эквивалент для ФАР. Для увеличения количества углеводов на один моль ($\Delta m_0 = M_{CH_2O} \times 1 \text{ моль}$) требуется $8N_A$ квантов излучения со средней энергией $h\nu_\Phi$, т.е. $\Delta E = 8h\nu_\Phi N_A$ (где N_A — постоянная Авогадро); поэтому

$$\gamma = \frac{M_{CH_2O} \cdot 1 \text{ моль}}{8h\nu_\Phi N_A} = 18 \text{ г/МДж.}$$

Рассчитанная величина γ может наблюдаться только при особых экспериментальных условиях, когда в атмосфере, окружающей растение, отсутствует кислород. В обычной атмосфере часть промежуточных продуктов в цепи реакций фотосинтеза окисляется кислородом воздуха, что уменьшает образование углеводов вдвое. Этот процесс называется

фотодыханием. Примерно 30% синтезированных углеводов в дальнейшем используется растением как источник энергии при синтезе необходимых для роста веществ и в других процессах. Из-за этого γ обычно меньше максимального значения по крайней мере в три раза. Мы будем считать, что $\gamma = 6 \text{ г/МДж}$.

Теперь мы знаем все необходимое, чтобы вычислить константу скорости роста C . В опытах, результаты которых приведены на рисунке 1, интенсивность ФАР, создаваемой при искусственном освещении, составляла 30 Вт/м^2 . Каждые сутки растения освещались в течение 16 часов, а затем 8 часов находились в темноте. При этом средняя суточная интенсивность была $\bar{I} = 1,7 \text{ МДж/(м}^2 \cdot \text{сут)}$. Подставляя численные значения всех величин в формулу (6), получаем $C = 0,121 \text{ сут}^{-1}$. На рисунке 5 приведена зависимость C от интенсивности ФАР, полученная экспериментальным путем. Как видим, вычисленное нами значение C хорошо совпадает с данными эксперимента.



В ясный весенний день интенсивность ФАР в полдень достигает 200 Вт/м^2 , *Рис. 5*

а средняя суточная интенсивность $\bar{I} \approx 3,5 \text{ МДж/(м}^2 \cdot \text{сут)}$. Согласно формуле (6) константа скорости роста при таких условиях должна быть в 2 раза больше. Но при более высоких интенсивностях света уменьшается ε , так как относительная масса корней возрастает — нужно обеспечивать возросшую потребность растений в минеральных солях; поэтому C увеличивается с ростом I не линейно, а медленнее, и при $I = 3,5 \text{ МДж/(м}^2 \cdot \text{сут)}$ составляет $0,3 \text{ сут}^{-1}$.

Из проведенных нами расчетов следует, что в идеальных условиях растение каждый день (каждые сутки) может увеличиваться в размерах в $e^{0,3} = 4/3$ раза, т.е. на $1/3$, а такое изменение легко заметить на глаз. Если растение растет в менее благоприятных условиях и, например, $C = 0,1 \text{ сут}^{-1}$, то заметное изменение будет происходить через

двое суток ($e^{0,1 \cdot 2} = 1,24$), т.е. действительно возможные скорости роста позволяют замечать изменение в размерах растения практически каждый день.

Мы рассматривали такой период роста растений, когда поступление веществ идет только за счет фотосинтеза. При прорастании, когда используется энергия, запасенная в семени, и при росте новых листьев, когда к растущему листу поступают продукты фотосинтеза от других листьев, скорость роста может быть больше, чем та, которая получается из наших расчетов.

Решенная нами задача о нахождении константы скорости роста растения – это простой пример задачи агрофизики. Агрофизика – довольно молодая наука, находящаяся на стыке физики атмосферы, физики почвы, биофизики, физиологии растений, прикладной математики. Она решает задачи по описанию роста и развития отдельных растений и целых посевов, о влиянии на них внешних физических условий – интенсивности света, температуры, влажности почвы и воздуха, скорости ветра.

Задачи эти сложные и содержат в себе несколько самостоятельных проблем. Одна из них – создание более точной модели растения, чем та, что мы рассмотрели. Модель должна описывать те характерные особенности взаимодействия растения с окружающей средой, которые требуется изучить. Например, если бы мы хотели узнать, как будет расти наше растение в посеве, когда на каждое растение приходится площадь S_0 , то нашу модель пришлось бы дополнить зависимостью эффективной площади поглощения света листьями $S_{\text{эф}}$ от стадии развития растения. Эффективная площадь должна входить вместо площади листьев в формулу (4), когда листья начнут перекрываться, т.е. когда площадь листьев будет сравнима с S_0 . Эту зависимость можно записать, например, в виде $S_{\text{эф}} = S_{\text{л}} / (1 + S_{\text{л}} / S_0)$. Такая формула хорошо описывает изменение эффективной поглощающей площади растения с увеличением площади листьев. Действительно, если $S_{\text{л}} \ll S_0$, то дробь в знаменателе формулы мала и $S_{\text{эф}} \approx S_{\text{л}}$, как и должно быть, когда листья не перекрываются. Когда $S_{\text{л}} \gg S_0$, в знаменателе можно пренебречь единицей и тогда $S_{\text{эф}} \approx S_0$. В более сложных моделях учитывают зависимость введенных нами параметров α , ε , d , γ от внешних условий, от стадии развития растения, от других параметров.

Другие задачи связаны с описанием процессов, влияющих на рост растений. Например, диффузии углекислого газа и водяного пара в приземном слое атмосферы и в пространстве между листьями, течения воды и растворов питательных веществ в пористой почве. Цель агрофизических исследований – научиться «исправлять» внешние физические параметры среды обитания растения так, чтобы растение всегда находилось в оптимальных для своего роста условиях. Сейчас уже существуют экспериментальные поля, на которых на основе моделей развития растения и его взаимодействия с окружающей средой производят полив и подкормку посевов по показаниям установленных в поле датчиков.

Зная об экспоненциальном росте растений, вы тоже можете решить одну агрофизическую задачу. Но сначала познакомимся с конвейерным методом выращивания растений.

На некоторых судах и полярных метеостанциях сейчас применяются установки конвейерного выращивания зелени для экипажей, которые имеют запоминающееся название «Самород – Арктика». Установки эти устроены просто. В ванне размером $0,5 \times 1,5$ м автоматически поддерживается постоянный уровень раствора необходимых для роста растений веществ. Над ванной под зеркальным отражателем расположена мощная электрическая лампа. Вдоль ванны в пластмассовых кассетах перемещаются выращиваемые растения, корни которых слегка касаются питательных веществ. Кассеты «заряжаются» семенами и устанавливаются на один край ванны. По мере развития растений их перемещают к другому краю ванны, постепенно раздвигая таким образом, чтобы листья растений все время образовывали сплошной зеленый покров, но сильно не перекрывались. Такой конвейер с раздвигаемыми кассетами обладает двумя достоинствами. Во-первых, свет не теряется напрасно, так как он падает только на листья растений. Во-вторых, осуществляется непрерывное производство зелени.

Имея модель, которая хорошо описывает рост растения в зависимости от внешних условий, можно получить закон перемещения кассеты вдоль конвейера $l = l(t)$, при котором между листьями не будет промежутков, и определить время между установкой кассет τ . Вот эту агрофизическую задачу мы и предлагаем вам решить самостоятельно.

О ВЫСОКИХ ДЕРЕВЬЯХ

А.Б.Минеев

Как мы знаем, деревьев высотой, например, в 1 км не существует. Трудно представить себе очень высокое и тонкое дерево или маленькое и очень толстое. От чего зависит высота дерева? Существуют ли какие-нибудь количественные закономерности, связывающие толщину и высоту дерева? И если существуют, можно ли их понять и объяснить с помощью простых физических оценок?

Обратимся к книгам, в которых можно найти сведения о высотах (h) и диаметрах у основания ствола (d) различных деревьев. Такая информация есть, например, в книгах Б.Д.Алексеева «Гиганты и карлики растительного мира» (М., 1987) и «Древесные растения главного ботанического сада АН СССР» (М., 1975). А теперь изобразим соответствующие данные на графике в координатах d^{-1} и h/d

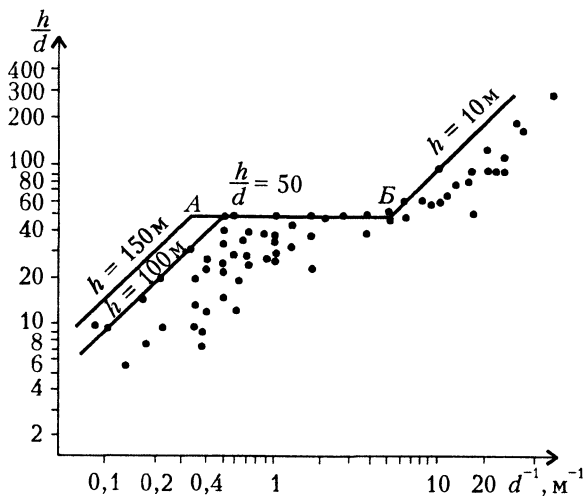


Рис.1

(рис.1). Проведем также несколько прямых, ограничивающих нашу статистику: горизонтальную $h/d = 50$ и наклонные вида $h/d \sim d^{-1}$, т.е. линии постоянной высоты.

Видно, что все многообразие земных древесных растений подчиняется некой закономерности. Чтобы разобраться в этом, сформулируем несколько очевидных вопросов. Итак, почему

- для достаточно толстых деревьев с диаметром у основания $d > 0,4 - 0,5$ м (слева от точки *Б*) отношение h/d ограничено $(h/d)_{\max} = 50$;

- для более тонких деревьев, $d < 0,2$ м, значение h/d может превышать 50, но только до определенной высоты дерева порядка 10 – 20 м;

- максимальная высота деревьев на Земле $h_{\max} < 100 - 150$ м?

Механика (прочность и упругость). Начнем с середины и займемся горизонтальной линией *АБ* на рисунке 1, для которой $(h/d)_{\max} = 50$. В чем причина этого ограничения? Естественно предположить, что слишком стройные деревья с большим значением отношения h/d не выдерживают нагрузок и ломаются. Действительно, одним из основных параметров, определяющим максимальное значение h/d , является прочность дерева. Рассмотрим ограничения, связанные с прочностью, в идеальном случае – вертикально стоящее дерево и в двух вариантах приближения к реальной картине – дерево, наклоненное под углом к вертикали, и дерево на ветру. Чтобы упростить оценки, примем, что дерево представляет собой сплошной цилиндр диаметром d и высотой h . Для плотности дерева и предельных допускаемых напряжений в нем возьмем справочные значения: $\rho \approx 500 \text{ кг/м}^3$ и $\sigma_{\text{доп}} \sim 10^7 \text{ Н/м}^2$.

Строго вертикальное дерево. Для вертикально стоящего дерева максимальные напряжения совпадают с давлением у его основания: $\sigma = \rho gh$, где $g = 10 \text{ м/с}^2$ – ускорение свободного падения. Подставляя указанные выше значения $\sigma_{\text{доп}}$ и ρ , получим оценку сверху для высоты строго вертикального дерева:

$$h_{\max} = 2 \text{ км.}$$

Многовато! По-видимому, случай высоких вертикальных деревьев не реализуется в природе.

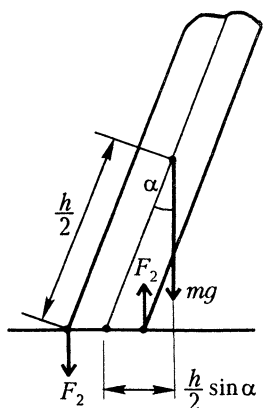


Рис. 2

Дерево, наклоненное к земле. Сделаем шаг к реальности — наклоним дерево. Это приведет к появлению момента силы тяжести, действующей на основание (рис.2):

$$M_1 = mg \frac{h}{2} \sin \alpha,$$

где $m = \rho h \pi d^2 / 4$ — масса ствола дерева, α — угол наклона дерева к вертикали. В равновесии M_1 компенсируется моментом сил упругости в дереве M_2 , который для оценки запишем в виде

$$M_2 = l_2 F_2,$$

где l_2 и F_2 — характерные плечо и сила. Как видно из рисунка 2, плечо l_2 порядка радиуса дерева у основания ($r = d/2$), а силу оценим в виде произведения среднего напряжения у основания дерева на площадь: $F_2 \sim \sigma r^2$, откуда $M_2 \sim \sigma r^3$. Точное выражение для момента M_2 близко к этой оценке и составляет

$$M_2 = \frac{\pi}{4} \sigma r^3 = \frac{\pi}{32} \sigma d^3.$$

Приравняв M_1 и M_2 , получим

$$\frac{h}{d} = \frac{\sigma}{4\rho g h \sin \alpha}.$$

Подставим значение плотности и предельно допускаемого напряжения, тогда

$$\left(\frac{h}{d} \right)_{\max} \approx \frac{500}{h \sin \alpha} \text{ или } \left(\frac{h}{d} \right)_{\max} \approx \frac{22}{\sqrt{d \sin \alpha}}.$$

Видно, что большие углы наклона допустимы только для невысоких деревьев. Так, при $h/d \sim 50$ и $h \sim 30$ м (среднее дерево) допустимое отклонение от вертикали порядка 20° ($\sin \alpha < 0,3$), а для самых больших деревьев высотой ~ 100 м — только 3° ($\sin \alpha < 0,1$). Поэтому дерево, выросшее высоким, обязано быть либо почти строго вертикальным, либо достаточно толстым. Если в силу каких-то причин отклонение приблизится к допустимому, дерево или сломается или будет «вынуждено» утолщать ствол, уменьшая тем самым отношение h/d .

Из полученного соотношения следует, что отклонение дерева от вертикали уже приводит к некоторым ограничениям величины h/d . Однако при малых отклонениях величина $(h/d)_{\max}$ может быть очень большой. При больших же значениях $\sin \alpha$ (кустарник или дерево с хорошо развитой кроной) ограничено не только отношение h/d , но и сама высота дерева h . Так, если положить $\sin \alpha \sim 0,3 - 0,5$, то получим

$$h_{\max} \approx (30 - 40)\sqrt{d}.$$

Эта зависимость изображена на рисунке 3. Видно, что даже для очень толстых деревьев (дуб, баобаб с толщиной у основания $d \sim 2 - 3$ м) высота дерева не должна превышать 40–50 м.

Дерево на ветру. Ветер также приводит к появлению опрокидывающего момента и напряжений в дереве. Примем для скорости сильного ветра значение $v \sim 30$ м/с (~ 100 км/ч). Для таких больших скоростей сила воздействия потока воздуха на ствол дерева может быть записана в виде произведения давления потока набегающего воздуха на характерную площадь:

$$F_v \sim p_v S_x.$$

Давление p_v может зависеть только от параметров воздушного потока: плотности ρ_v и скорости движения v . Из соображений размерности $p_v \approx \rho_v v^2$. Характерную площадь дерева S_x представим в виде $S_x = S k_\phi$, где $S = dh$ – площадь сечения, перпендикулярного потоку воздуха, k_ϕ – коэффициент формы, характеризующий отклонение S_x от S . Для деревьев с небольшой кроной $0,5 < k_\phi < 1$, при большой и густой кроне $k_\phi > 1$. Теперь для силы воздействия ветра можно записать

$$F_v \approx \rho_v v^2 d h k_\phi.$$

Возникающий опрокидывающий момент оценим как

$$M_v = F_v \frac{h}{2}.$$

Воспользовавшись связью между опрокидывающим моментом

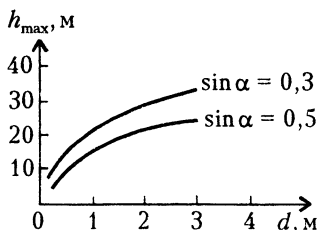


Рис. 3

и возникшими в дереве напряжениями, получим ограничение

$$\left(\frac{h}{d}\right)_{\max} \approx \sqrt{\frac{\pi}{16k_{\phi}}} \sqrt{\frac{\sigma_{\text{доп}}}{\rho_{\text{в}} v^2}}.$$

После подстановки значений параметров $\sigma_{\text{доп}} \sim 10^7 \text{ Н/м}^2$, $\rho_{\text{в}} \sim 1,3 \text{ кг/м}^3$, $v \sim 30 \text{ м/с}$ найдем

$$\left(\frac{h}{d}\right)_{\max} \sim \frac{40}{\sqrt{k_{\phi}}}.$$

Таким образом, сильный ветер может объяснить природу плато AB на рисунке 1. Отметим, что из параметров дерева в правую часть выражения для $(h/d)_{\max}$ входит только отношение $\sigma_{\text{доп}}/k_{\phi}$, да и то зависимость от него не сильная.

Посмотрим теперь на наиболее «стройную», правую часть рисунка 1, соответствующую молодым деревьям с небольшим диаметром основания. Почему для них возможно увеличение отношения h/d до 100, 200 и даже 300?

Приглядимся к формуле $(h/d)_{\max} \sim \sqrt{\sigma_{\text{доп}}/(k_{\phi} v^2)}$. Первое, что приходит на ум, — эти деревья частично защищены от сильного ветра более высокими деревьями, а $(h/d) \sim v^{-1}$. Кроме того, у молодых деревьев часто относительная площадь кроны небольшая, т.е. $k_{\phi} \sim 0,5 - 1$. Все вместе это может объяснить увеличение $(h/d)_{\max}$ при небольших значениях диаметра ствола.

Но почему излом графика (точка B на рисунке 1) происходит при высоте дерева $h \sim 10 - 20 \text{ м}$? По-видимому, это характерное значение высоты, при которой дерево еще может сильно изгибаться или отклоняться по вертикали. Действительно, допустим, что ветер наклонил дерево так, что $\sin \alpha \sim 0,3 - 0,5$. Тогда получим, что отношение h/d становится равным 50 как раз при высоте дерева $h \sim 10 - 20 \text{ м}$.

Устойчивость формы. Приведем несколько оценок по устойчивости формы ствола, основание которого закреплено в земле. Допустим, что под действием внешних сил ствол дерева слегка изогнулся. Это, во-первых, приведет к появлению энергии упругой деформации ствола $U_{\text{д}}$, а во-вторых — к уменьшению потенциальной энергии тяготения $\Delta U_{\text{п}}$ за счет понижения центра тяжести. Понятно, что должно выполняться условие

$$\Delta U_{\text{п}} \leq U_{\text{д}},$$

иначе изгиб будет нарастать, и ствол сломается. Сформулируем ограничение, следующее из этого условия. Для этого изогнем постоянный по сечению ствол дерева. Интуитивно кажется, что при малом изгибе он примет форму дуги окружности. Найдем изменение потенциальной энергии стержня: $\Delta U_{\text{п}} = mg(h - h_1)$. Здесь m – масса дерева, h – высота вертикального ствола, h_1 – изогнутого. Величины h и h_1 изображены на рисунке 4, из которого виден и способ их вычисления: $h = R\beta$, $h_1 = R \sin \beta$ (угол β измеряется в радианах). Таким образом,

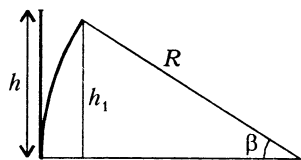


Рис. 4

$$\Delta U_{\text{п}} = mgR(\beta - \sin \beta).$$

В случае малых изгибов ($\beta \ll 1$) можно показать, что $\sin \beta \approx \beta - \beta^3/6$. Это дает

$$\Delta U_{\text{п}} \approx \frac{mgR\beta^3}{6} \approx \frac{mgh^3}{6R^2}.$$

Оценим теперь потенциальную энергию, запасаемую в стержне (стволе) при малом изгибе. Заметим, что изгиб тонкого стержня ($d \ll h$) сводится к простым деформациям поперечного сечения: сжатию и растяжению. Такие напряжения σ в поперечном сечении можно определить по формуле Гука $\sigma = \epsilon E$, где E – модуль упругости, ϵ – относительная деформация (удлинение или сжатие). В нашем случае $\epsilon = Z/R$, где Z – величина абсолютной деформации. Слои дерева, располагающиеся справа от точки O (рис.5), испытывают сжатие, слева – растяжение. Положение точки O («нейтральной») в тонких стержнях – посередине поперечного сечения. Энергия деформации в единице объема может быть оценена как произведение удельной силы на удельное перемещение:

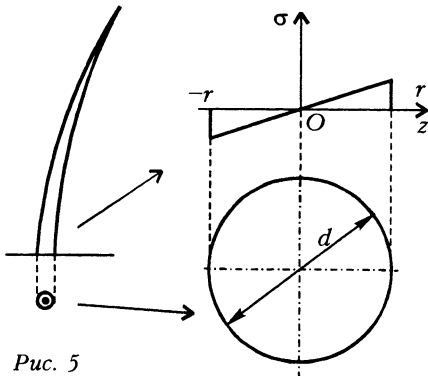


Рис. 5

$$F \frac{\Delta l}{V} = \frac{F}{S} \frac{\Delta l}{l} = \sigma \epsilon.$$

Во всем объеме ствола дерева V энергия упругой деформации $U_d \approx \sigma_m \varepsilon_m V$, где σ_m и ε_m – напряжение и относительная деформация на середине радиуса. Поскольку $\sigma_m = \varepsilon_m E$, $\varepsilon_m = r/(2R)$, $V = \pi r^2 h$, $r = d/2$, получим

$$U_d \approx \frac{d^2}{16R^2} EV = \frac{\pi}{64} \frac{d^4 h E}{R^2}.$$

Таким образом, приходим к следующему ограничению:

$$\frac{h}{d} \leq \left(\frac{3}{8} \frac{E}{\rho g h} \right)^{1/2} \quad \text{или} \quad \frac{h}{d} \leq \left(\frac{3}{8} \frac{E}{\rho g d} \right)^{1/3}.$$

При значении модуля упругости, характерном для деревьев, $E \approx 5 \cdot 10^9$ Па и при плотности $\rho \sim 500$ кг/м³ имеем

$$\frac{h}{d} \leq \frac{700}{\sqrt{h}} \quad \text{или} \quad \frac{h}{d} \leq \frac{60}{\sqrt[3]{d}}.$$

Предварительные итоги. Что же позволили понять «механические» параметры дерева: прочность и упругость? Не так мало: центральную и правую части рисунка 1.

На рисунке 6 на фоне исходной кривой штриховкой показаны ограничения, связанные с:

- прочностью вертикально стоящего дерева;
- сильным изгибом;
- действием сильного ветра;
- устойчивостью под действием собственного веса.

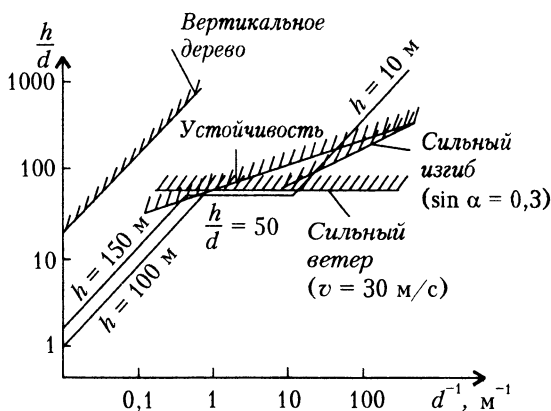


Рис. 6

Видно, что идеальный случай – вертикально стоящее дерево – фактически не реализуется. Сильный ветер объясняет плато $h/d \approx \text{const}$. Устойчивость формы ствола под действием собственного веса для очень толстых деревьев (d больше нескольких метров) приводит к более жесткому ограничению отношения h/d , чем сильный ветер.

Но природу максимальной высоты деревьев механика не прояснила...

Движение воды. Приглядимся к движению воды по дереву, которое связывает корни, ствол и листья воедино. Оценим характерные скорости движения воды в трех важнейших случаях (рис.7):

- при всасывании воды кончиками корней из почвы со скоростью v_n («н» – низ);

- при движении по стволу дерева со скоростью v_c («с» – ствол или середина);

- при испарении с поверхности листьев или кроны со скоростью v_v («в» – верх).

Пройдем эту цепочку в направлении от верхушки к корням дерева, от простых оценок к более сложным.

Испарение с поверхности листьев. Из-за нагрева Солнцем кроны дерева требуется ее постоянное охлаждение – иначе крона перегреется и не станет выполнять свои функции. При слабом ветре тепло может быть отведено в основном путем испарения воды с поверхности листьев или хвои. Это запускает «насос», выкачивающий воду из почвы.

Запишем уравнение баланса тепла для листа площадью S_l , поглощающего солнечное излучение:

$$\alpha q_c S_l = Q_{\text{исп}} \rho_{\text{ж}} v_v S_l.$$

Слева от знака равенства записан приход энергии от Солнца, справа – ее уход при испарении воды с листа. Здесь q_c – средний поток солнечного тепла на поверхности Земли ($q_c \sim 10^3 \text{ Вт/м}^2$), α – доля энергии, поглощенная листом (с учетом отражения от его поверхности, ориентации и экранировки кроной $\alpha \sim 0,2 - 0,3$), $Q_{\text{исп}}$ – удельная энергия испаре-

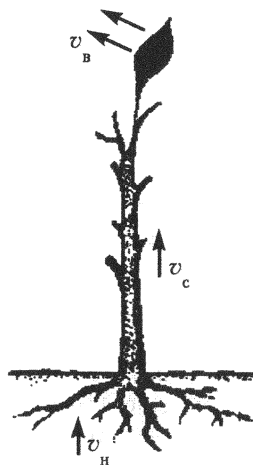


Рис. 7

ния воды ($Q_{\text{исп}} \sim 2 \cdot 10^6$ Дж/кг), $\rho_{\text{ж}}$ – плотность воды ($\rho_{\text{ж}} = 10^3$ кг/м³). Отсюда для скорости подвода воды к поверхности листа (или хвоинки) с последующим испарением найдем

$$v_{\text{в}} = \frac{\alpha q_{\text{с}}}{Q_{\text{исп}} \rho_{\text{ж}}}.$$

При указанных выше значениях параметров получим $v_{\text{в}} \sim 10^{-7}$ м/с $\sim 4 \cdot 10^{-4}$ м/ч. Как видно из формулы, $v_{\text{в}}$ зависит только от освещенности и пропорциональна ей. При ветре скорость теплоотвода больше, что увеличивает значение $v_{\text{в}}$. Таким образом, эта формула является ограничением на $v_{\text{в}}$ снизу.

Движение по стволу дерева. В стволе дерева вода течет по тонким каналам – «скелетам» когда-то живых клеток. Диаметр таких сосудов чрезвычайно мал: масштаба 10^{-5} м у хвойных деревьев и до $(1-2) \cdot 10^{-4}$ м у лиственных. При медленном течении воды по тонким каналам сила сопротивления $F_{\text{с}}$ определяется вязкостью воды. Если слои жидкости движутся с разными скоростями, то между ними возникает «трение» – сила вязкости. Для количественного описания вязкости жидкости можно рассмотреть простейший пример: жидкость между двумя параллельными близко расположенными пластинами. Если одна из пластин неподвижна, а другая движется со скоростью v , то возникающая между ними сила вязкости равна

$$F_{\text{в}} = \eta S \frac{v}{h},$$

где S – площадь каждой пластины, h – расстояние между ними, а коэффициент пропорциональности η , называемый коэффициентом вязкости, характеризует вязкие свойства жидкости (для воды $\eta \sim 10^{-3}$ кг/(м·с)). Величину v/h , которая показывает, как быстро меняется скорость при переходе от слоя к слою, называют градиентом скорости. При движении жидкости по трубе (каналу) градиент скорости от стенок к центру по порядку величины равен v/d (d – диаметр трубы), площадь стенки трубы $S \sim ld$ (l – длина трубы), т.е. $F_{\text{в}} \sim \eta v l$. В случае равномерного течения жидкости сила вязкости компенсируется перепадом давлений: $F_{\text{в}} = \Delta p \pi d^2 / 4$. Отсюда для перепада давлений на длине l получаем оценку:

$$\Delta p \sim \frac{\eta l v}{d^2}.$$

Точная формула (ее называют законом Пуазейля) дает

$$\Delta p = \frac{32\eta lv}{d^2}.$$

Для подъема воды в поле тяжести Земли на высоту h со скоростью v_c по сосуду диаметром d_c требуется перепад давлений

$$\Delta p_c = \rho_{\text{ж}}gh + \frac{32\eta hv_c}{d_c^2} = \rho_{\text{ж}}h \left(g + \frac{32\nu v_c}{d_c^2} \right),$$

где $\nu = \eta/\rho_{\text{ж}} \sim 10^{-6}$ м²/с – так называемая кинематическая вязкость воды. Изобразим графически зависимость Δp_c от скорости воды (рис.8). При малых v_c величина Δp_c не зависит от скорости, а при больших – пропорциональна ей. Характерное значение скорости, при которой происходит излом зависимости (и дереву становится все труднее поднимать воду наверх), равно

$$v_{\text{сх}} = \frac{gd_c^2}{32\nu} \sim 3 \cdot 10^{-7} d_c^2,$$

где d_c измерено в мкм, а $v_{\text{сх}}$ – в м/с.

Мы получили, что $v_{\text{сх}}$ квадратично зависит от диаметра сосудов (рис.9). Для хвойных деревьев диаметр сосудов $d_c \sim 10^{-5}$ м и характерная скорость $v_{\text{сх}} \sim 10$ см/ч, для лиственных $d_c \sim 10^{-4}$ м и $v_{\text{сх}} \sim 10$ м/ч. Интересно, что, несмотря на оценочный характер формулы для $v_{\text{сх}}$, измеренные значения скорости передвижения воды по сосудам реальных деревьев, приводимые в литературе, близки к нашим оценкам. Дерево как бы «чувствует» границу изменения зависимости Δp_c от скорости. При характерном значении скорости перепад давлений по стволу дерева со-

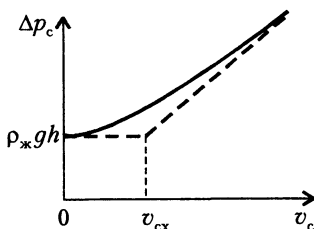


Рис. 8

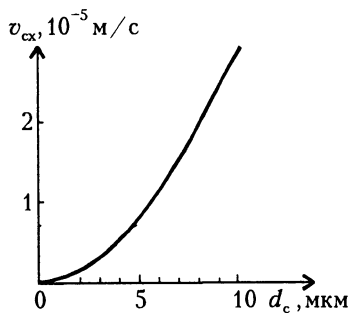


Рис. 9

ставляет $\Delta p_c \sim 2\rho_{\text{ж}}gh$ и для очень высоких деревьев ($h \sim 100 - 150$ м) величина Δp_c порядка 20–30 атм.

А может ли лиственное дерево при $v_c \sim 10$ м/ч иметь диаметр сосудов того же масштаба, что и хвойное дерево, т.е. 10^{-5} м? Посмотрим. В этом случае получаем Δp_c (атм) $\sim 10 \cdot h$ (м). Уже при высоте ~ 10 м перепад давлений составит ~ 100 атм – величину, близкую к максимально возможному давлению p_{max} , при котором рвутся силы сцепления молекул воды. Таким образом, сосуды ствола при увеличенной скорости прокачки воды «обязаны» утолщаться, чтобы вода не «порвалась». Именно так и «поступают» лиственные деревья, «увеличивая» d_c до величин $\sim 10^{-4}$ м.

Всасывание воды из почвы. Попадая в корни дерева, вода обязана пересечь оболочку корневого волоска. Это не так просто, поскольку нужно преодолеть барьер – клеточную мембрану, т.е. двухслойную непроницаемую перегородку толщиной $\sim 10^{-8}$ м. Диффузия воды через мембрану сильно замедляет скорость ее движения. Простые, но несколько громоздкие оценки приводят к величине

$$v_n \sim 10^{-8} \text{ м/с} \sim 4 \cdot 10^{-5} \text{ м/ч.}$$

Итак, все три характерные скорости передвижения воды определены. Их сопоставление довольно любопытно. Действительно, потоки массы воды через корни, ствол и крону должны быть одинаковы. Поэтому площади корневой системы (точнее, корневых волосков) S_n , водопроводящей системы ствола S_c и кроны S_b должны относиться обратно пропорционально соответствующим скоростям. Приняв S_c за единицу площади, получим для хвойных деревьев (при $v_c \sim 0,1$ м/ч) при хорошем освещении дерева и достаточно увлажненной почве

$$S_b : S_c : S_n = (200 - 300) : 1 : (2500 - 3000).$$

Отсюда следует, что площадь «корешков» больше площади «вершков» и каждая из них существенно превышает сечение водопроводящих каналов ствола. При переходе от ствола к кроне или корням дерево «обязано» сильно нарастить поверхность. Как это выполнить при минимальном расходе материала?

Сделаем одно замечание. Упомянутая выше величина максимального растягивающего давления воды в деревьях ($p_{\text{max}} \sim 100$ атм) требует некоторых пояснений. Для идеальной воды (без примесей и посторонних включений) ве-

величина p_{\max} существенно больше (рис.10, кривая *а*) – она порядка тысячи атмосфер и уменьшается с ростом температуры. Переход к технической воде (водопроводной и колодезной) кардинально меняет ситуацию. Для такой воды величина p_{\max} масштаба одной или нескольких атмосфер. Вода же в деревьях проходит через тонкое сито мембран корневых волосков, что в значительной степени очищает ее. Измерения p_{\max} для тщательно очищенной воды проводились неоднократно и дали величину $\sim 100 - 300$ атм. В качестве примера на рисунке 10 (кривая *б*) приведена зависимость $p_{\max}(T)$ в одной из самых аккуратных серий экспериментов. Уровень p_{\max} порядка 200–280 атм, с ростом температуры величина давления уменьшается. При значении разрывающего давления 100–300 атм, даже с учетом потерь на трение воды о стенки сосудов, величина предельной высоты дерева больше 500 метров! Это означает, что для реальных деревьев водные нити не рвутся.

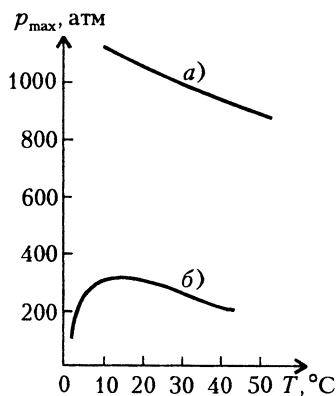


Рис. 10

На этом прервем рассказ о путешествии воды по дереву. Он позволил грубо оценить скорости передвижения воды, а также понять причину сильно разветвленной структуры веток и корней. Но «тумана» возле левого склона и он не рассеял...

Процесс роста дерева. А может быть, все дело не в строгих физических ограничениях высоты дерева, а в том, что дерево за разумное время просто не успевает стать слишком высоким?

Рассмотрим эволюцию во времени размеров отдельного дерева. При небольшой высоте отношение h/d может быть очень велико. Постепенно h/d выходит на примерно постоянное значение.

Изобразим своеобразный тоннель, а в нем – цепочку дальнейших рассуждений (рис.11). Справа – «свет», к которому мы идем. На пути – несколько остановок.

Приглядимся к структуре годичных колец дерева (их типичный вид приведен на рисунке 12). С возрастом, как правило, толщина годичного кольца уменьшается, так что его

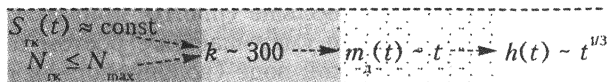


Рис. 11

площадь слабо зависит от времени. Примем для простоты $S_{\text{гк}}(t) \approx \text{const}$.

С течением времени клетки внутренних годовичных слоев постепенно засоряются и перестают выполнять водопроводящую функцию. Поэтому в подъеме воды на верх дерева участвует только небольшой слой древесины вблизи коры. Таким образом, количество годовичных слоев ствола $N_{\text{гк}}$, через которые питается крона, невелико. У хвойных деревьев оно не превышает нескольких десятков, у лиственных — меньше десяти. Положим $N_{\text{гк}} \leq N_{\text{max}}$.



Рис. 12

В результате можно принять постоянными

- полную площадь дерева, работающую на подъем воды,

$$S(t) \sim S_{\text{гк}}(t) N_{\text{гк}} \approx \text{const};$$

- массу воды, прокачанной через ствол дерева за год,

$$M_{\text{в}}(t) = \rho_{\text{ж}} v_{\text{с}} S(t) T_1$$

($v_{\text{с}}$ — скорость подъема воды по сосудам, T_1 — продолжительность работы нашего «насоса» за год).

Введем еще один важный коэффициент k — отношение массы воды, закачанной на верх дерева, к массе синтезированного в кроне органического вещества, именно последнее и дает прирост размеров и массы дерева. Величина k для разных растений меняется в не слишком широких пределах, так что в среднем $k \sim 300$.

При постоянных $M_{\text{в}}(t)$ и k получаем, что годовичный прирост массы древесины $\Delta m_{\text{д}}(t)$ слабо меняется со временем, грубо можно положить $\Delta m_{\text{д}}(t) \approx \text{const}$. И тогда масса взрослого дерева будет примерно линейно расти с возрастом дерева: $m_{\text{д}}(t) \sim t$.

И наконец, последнее звено в нашей цепочке. Масса дерева

пропорциональна d^2h . Таким образом, при постоянном значении $h/d \sim 50$ масса дерева пропорциональна кубу высоты. А поскольку $m_d(t) \sim t$, то $h(t) \sim t^{1/3}$.

Чем интересна такая зависимость? Видно, что рост дерева в высоту со временем сильно замедляется. Так, если дерево достигло высоты 50 метров к 50 годам, то 100-метровый рубеж оно преодолеет к 400 годам, а 200-метровый – только через 3200 лет.

Это уже похоже на свет в конце тоннеля... Хотя, конечно, следует отдавать себе отчет в многочисленности не очень строгих рассуждений и предположений, допущенных на нашем долгом пути.

Приведем еще несколько соображений эволюционного характера против чрезмерного гигантизма деревьев:

- Окружающая данное дерево растительность конкурирует с ним если не по высоте, то в почвенном питании. К изменениям питания более низкорослым растениям приспособиться легче, чем гиганту.

- За промежуток времени масштаба сотен и тысяч лет жучки и микроорганизмы чаще всего успевают сильно ослабить прочность дерева. Разрушение происходит с сердцевины, клетки которой практически прекратили жизнедеятельность.

- За время $\sim 10^4$ лет существенно меняется климат Земли. Так, последнее великое оледенение закончилось примерно 10 тысяч лет назад.

- У 100-метровых деревьев уже нет конкуренции за место под Солнцем. Поэтому отпадают эволюционные причины тянуться к 200 – 300-метровой высоте – трудности с доставкой воды растут, а преимуществ не видно.

- Дерево-кандидат на рекордную высоту «обязано» иметь хорошо выраженный вертикальный и зачастую очень толстый ствол и сравнительно небольшую крону. Можно сказать, что гиганты «работают» в основном на себя, а не на потомство. Такие деревья явно проигрывают по продуктивности (скорости размножения) более низкорослым, но раскидистым деревьям.

По-видимому, подобные причины и приводят к тому, что растительные мастодонты высотой более 150 метров на Земле не встречаются.

ФИЗИКА ХИМИЧЕСКОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ

О.Н.Карпухин

В химической реакции одни вещества могут превращаться в другие. Горение приводит к образованию воды и углекислого газа, при смешивании кислоты и щелочи образуется соль. Однако, изучая химию, мы как бы закрываем глаза на то время, когда молекулы взаимодействуют между собой, и раскрываем их вновь лишь тогда, когда продукты химической реакции уже образовались. Между тем, именно те процессы, которые происходят во время взаимодействия молекул между собой, и определяют состав продуктов химической реакции.

Химическая реакция состоит из двух основных стадий. Сначала реагирующие между собой частицы должны встретиться, а затем происходит собственно химическое превращение, при котором электронные оболочки молекул перестраиваются, и из исходных частиц образуются продукты реакции. В соответствии с этим химическая физика делится на два больших раздела: химическую кинетику и теорию элементарного акта.

Химическая кинетика изучает вопрос о том, каким образом реагирующие частицы могут встретиться между собой, какие внешние силы на них действуют, какими уравнениями можно описать изменение концентраций реагирующих частиц с течением времени, как зависит скорость химического процесса от концентрации реагентов (т.е. веществ, вступающих в реакцию), от температуры и других условий, в которых протекает химический процесс.

Теория элементарного акта химического превращения рассматривает процесс взаимодействия частиц, изменение конфигурации электронных оболочек и расстояний между атомами, входящими в молекулы.

В этой статье мы ограничимся лишь рассказом о кинетике химической реакции.

Основной вопрос химической кинетики — это вопрос о

частоте встреч реагирующих частиц. Частицы, вступающие в реакцию, — не обязательно молекулы. Это могут быть и нейтральные атомы, и ионы, и какие-либо другие частицы. Поэтому до тех пор, пока мы не говорим о каких-то конкретных веществах, участвующих в реакции, будем рассматривать просто взаимодействие между произвольными частицами.

Пусть в некотором объеме протекает реакция между частицами двух сортов A и B , практически равномерно распределенными по всему объему. Такая реакция называется бимолекулярной. Положим, что и те и другие частицы имеют форму шара радиусом r и что в каждом кубическом сантиметре находится a_0 частиц сорта A и b_0 частиц сорта B . Известно, что частицы в газе движутся хаотически, т.е. их скорости все время изменяются как по величине, так и по направлению. Однако средняя квадратичная скорость движения частиц $\langle v \rangle$ практически неизменна и определяется только температурой среды T и массой частицы m :

$$\langle v \rangle = \sqrt{\frac{3kT}{m}},$$

где $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж / К. Таким образом, каждая частица сорта A за время t пройдет путь, равный в среднем

$$s = \sqrt{\frac{3kT}{m}} t.$$

Будем считать, что частицы сорта B неподвижны, а скорость частиц сорта A не меняется после столкновений. Во время движения частица сорта A будет сталкиваться со всеми частицами сорта B , центры которых находятся на расстоянии меньше $2r$ от траектории движения ее центра, т.е. с теми частицами, которые как бы попадают в цилиндр, отмеченный пунктиром на рисунке 1. За время t одна частица сорта A столкнется со всеми частицами сорта B , находящимися в объеме

$$V = 4\pi r^2 s.$$

Частица сорта A может встретиться, конечно, не только с частицами сорта B , но и с другими частицами сорта A , а также со всеми иными частицами, находящимися в среде. Но эти встречи нас не

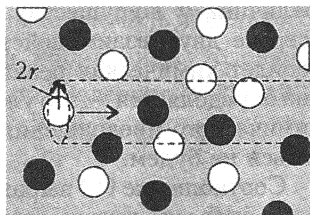


Рис. 1

интересуют, поскольку они не могут привести к химической реакции между веществами A и B .

Мы уже говорили, что в каждом кубическом сантиметре среды находится b_0 частиц сорта B , следовательно, каждая частица сорта A встретится с $b_0 V$ частицами сорта B . Всего же в 1 см^3 присутствует a_0 частиц сорта A . Таким образом, общее число n встреч частиц сорта A и частиц сорта B за время t будет

$$n = V a_0 b_0.$$

За единицу времени происходит $\frac{n}{t}$ таких встреч:

$$\frac{n}{t} = 4\pi r^2 \sqrt{\frac{3kT}{m}} a_0 b_0.$$

При расчете мы не учитывали, что движутся не только частицы сорта A , но и частицы сорта B , что скорость движения частиц изменяется после столкновения, что распределение частиц по объему можно только в среднем считать равномерным. Но более точный расчет с учетом всех этих факторов приводит к изменению найденного числа встреч не более чем на 10%.

Конечно, не при каждой встрече частиц A и B происходит химическое превращение, однако число химических превращений пропорционально числу встреч. Число химических превращений в единице объема за единицу времени обычно называют скоростью химической реакции. Скорость химической реакции между частицами A и B определяется соотношением

$$W = \alpha \cdot 4\pi r^2 \sqrt{\frac{3kT}{m}} a_0 b_0, \quad (1)$$

где α — безразмерный коэффициент пропорциональности между числом встреч и числом химических превращений. Величина α по существу означает вероятность того, что при встрече двух взаимодействующих частиц между ними произойдет химическая реакция. Какова эта вероятность и чем она определяется — это уже задача теории элементарного акта химического превращения, и на этом вопросе мы останавливаться не будем.

Соотношение (1) выражает известный закон действующих масс: скорость химической реакции в любой момент времени пропорциональна произведению концентраций реагирующих

веществ в этот момент времени. Коэффициент пропорциональности, стоящий перед произведением концентраций, называется константой скорости химической реакции при данной температуре; обозначим его буквой K . В реакции взаимодействия двух частиц с одинаковой массой

$$K = 4\alpha\pi r^2 \sqrt{\frac{3kT}{m}}.$$

Попробуем рассчитать величину скорости какой-нибудь простейшей химической реакции. Пусть в среде, представляющей собой идеальный газ при нормальных условиях (давление 760 мм. рт. ст, температура 0°C), протекает бимолекулярная реакция. Концентрации обоих веществ равны между собой, и никаких посторонних веществ в среде нет. Масса молекул A и B около 30 углеродных единиц (1 у.е. = $1,67 \cdot 10^{-24}$ г), радиус молекул $r = 2,5 \text{ \AA} = 2,5 \cdot 10^{-8}$ см. Найдём скорость реакции.

Выразим массу молекул в килограммах:

$$m = 30 \cdot 1,67 \cdot 10^{-24} \text{ г} \approx 0,5 \cdot 10^{-25} \text{ кг}.$$

Средняя квадратичная скорость движения молекул составляет

$$\begin{aligned} \langle v \rangle &= \sqrt{\frac{3kT}{m}} = \sqrt{\frac{3 \cdot 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К} \cdot 273 \text{ К}}{0,5 \cdot 10^{-25} \text{ кг}}} = \\ &= 480 \text{ м/с} = 4,8 \cdot 10^4 \text{ см/с}. \end{aligned}$$

Константа скорости реакции равна

$$\begin{aligned} K &= 4\alpha\pi r^2 \langle v \rangle = \\ &= 4\alpha\pi (2,5 \cdot 10^{-8} \text{ см})^2 \cdot 0,48 \cdot 10^5 \text{ см/с} \approx 3,8\alpha \cdot 10^{-10} \text{ см}^3/\text{с}. \end{aligned}$$

Отсюда видно, что константа скорости реакции выражается в единицах $\text{см}^3 \cdot \text{с}^{-1}$. По закону Авогадро один моль идеального газа ($6 \cdot 10^{23}$ частиц) занимает при нормальных условиях объём 22,4 л. Это означает, что в 1 см^3 содержится $2,7 \cdot 10^{19}$ частиц, т.е. по $1,3 \cdot 10^{19}$ молекул A и B ($a_0 = b_0 = 1,3 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$). Таким образом, скорость реакции равна

$$W = 3,8\alpha \cdot 10^{-10} \frac{\text{см}^3}{\text{с}} (1,3 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3})^2 \approx 6,5 \cdot 10^{28} \alpha \frac{\text{см}^{-3}}{\text{с}}.$$

Это означает, что в каждом кубическом сантиметре газа в секунду происходит $6,5 \cdot 10^{28}$ встреч молекул A и B .

Представим себе, что произошло бы, если бы каждая встреча приводила к химической реакции. Тогда все молекулы успели бы прореагировать за очень короткое время, равное

$$t' = \frac{a_0}{W} = \frac{1,3 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}}{6,5 \cdot 10^{28} \text{ с}^{-1} \cdot \text{см}^{-3}} = 2 \cdot 10^{-10} \text{ с}.$$

Реально ли это?

Массу около 30 у.е. имеют молекулы этана (30 у.е.) и кислорода (32 у.е.). Таким образом, реакцию, которую мы рассматриваем, можно считать моделью реакции горения газа в домашней газовой плите. А вы знаете, что газ не загорится, если к нему не поднести спичку. Значит, в реакции между молекулами этана и кислорода величина коэффициента α очень мала.

Если химический процесс происходит при постоянной температуре, то достаточно знать лишь величину константы скорости реакции K , чтобы определить, как изменяются концентрации веществ в течение всего процесса. Поэтому закон действующих масс может быть записан в таком виде:

$$W = K[A][B], \quad (2)$$

где символами $[A]$ и $[B]$ обозначены концентрации реагирующих веществ, изменяющиеся в ходе реакции.

Рассчитать теоретически величину константы скорости химической реакции довольно трудно, поэтому в большинстве случаев ее определяют, исходя из экспериментальных данных. В качестве примера определим константу скорости реакции между веществами R и S , если из эксперимента известно, что их начальные концентрации равны 1 моль/л и за одну секунду в акте химического превращения участвует 10% каждого из веществ.

За одну секунду в 1 л объема расходуется 0,1 моль вещества; значит, в каждом кубическом сантиметре происходит $6 \cdot 10^{19}$ актов химического превращения, т.е. скорость реакции равна

$$W = 6 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}.$$

Подставляя в уравнение (2) значения начальных концентраций и скорости реакции W , определяем величину константы

скорости реакции:

$$K = \frac{W}{[R]_0[S]_0} = 1,7 \cdot 10^{-20} \frac{\text{см}^3}{\text{с}}.$$

Мы рассчитали значение константы K при постоянных концентрациях $[R]_0$ и $[S]_0$. Если бы скорость процесса была неизменной, вещества R и S должны были бы израсходоваться полностью за 10 с, поскольку, как уже было сказано, за 1 с расходуется 10% всего количества исходных веществ. Однако в действительности это не так. Концентрации реагентов во время реакции с течением времени уменьшаются, соответственно уменьшается и скорость их расходования, т.е. скорость реакции. За один и тот же промежуток времени на разных этапах реакции расходуется различное количество веществ. Зная величину константы скорости реакции между веществами R и S , рассчитаем, как изменяются концентрации реагирующих веществ с течением времени.

Разделим время, за которое протекает реакция, на несколько равных промежутков τ и будем считать, что в течение этих промежутков времени скорость реакции постоянна. Возьмем промежутки τ в 6 с, 2 с и 1 с. На рисунке 2, а нижняя линия соответствует расчету концентраций при $\tau = 6$ с, следующая линия — при $\tau = 2$ с, следующая — при $\tau = 1$ с. На рисунке 2, б показано изменение скорости реакции при таких же приближениях.

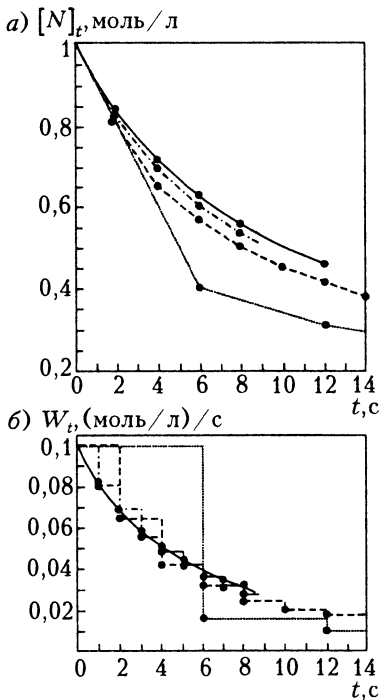


Рис. 2

Поскольку на самом деле концентрация реагентов изменяется непрерывно, наш расчет будет тем точнее, чем меньше промежуток τ . Чтобы получить точное значение концентрации реагентов в данный момент времени, нужно перейти к пределу при $\tau \rightarrow 0$, учитывая, что скорость процесса изменя-

ется непрерывно. Дифференциальное исчисление позволяет точно решить эту задачу. Концентрация реагентов $[N]_t$ в каждый данный момент времени определяется соотношением

$$[N]_t = \frac{[N]_0}{1 + K[N]_0 t}, \quad (3)$$

где $[N]_0$ начальная концентрация, t — время, прошедшее от начала реакции.¹ Подставляя в уравнение (3) найденные нами значения константы скорости и исходных концентрации, находим, как должны изменяться со временем концентрации реагентов и скорость процесса:

$$[R]_t = [S]_t = \frac{1}{1 + 0,1t} \frac{\text{моль}}{\text{л}} = \frac{6 \cdot 10^{20}}{1 + 0,2t} \text{ см}^{-3},$$

$$W_t = \frac{0,1}{(1 + 0,1t)^2} \frac{\text{моль}}{\text{л}} \cdot \text{с} = \frac{6 \cdot 10^{19}}{(1 + 0,1t)^2} \text{ см}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}.$$

Эти зависимости показаны сплошными плавными линиями на рисунке 2. Истинные кривые изменения скорости химического процесса и концентрации реагирующих веществ существенно отличаются от аналогичных кривых, полученных приближенным методом.

Уравнение (3) позволяет рассчитать концентрации реагентов и скорость процесса в любой момент времени и при любой начальной концентрации реагентов.

Однако не всегда химический процесс представляет собой одну элементарную реакцию взаимодействия исходных веществ между собой. Обычно процесс бывает более сложным, он состоит из нескольких элементарных реакций, протекающих одновременно. Например, продукты реакции могут взаимодействовать между собой или реагировать с исходными веществами. Очевидно, что в этом случае уравнение (3) уже не будет описывать кинетику процесса, и необходимо вывести другое, более сложное уравнение, в которое войдут константы скоростей всех элементарных реакций, происходящих во время процесса.

В связи с этим возникает необходимость не только определить константы скоростей элементарных реакций, но и убедиться в том, что процесс действительно представляет собой

¹ Тем, кто знаком с дифференциальным исчислением, ясно, что нужно решить дифференциальное уравнение $\frac{d[N]}{dt} = K[N]^2$.

совокупность данных реакций. Вот пример.

На рисунке 3,а точками показаны результаты измерения концентрации соляной кислоты в реакции хлорирования циклогексена в присутствии катализатора (рис.4,а), а на рисунке 3,б — результаты измерения концентрации формальдегида в реакции получения диметилдиоксана (рис. 4,б). Выясним, какую из этих реакций можно описать уравнением бимолекулярной реакции.

Если реакция бимолекулярная, изменение концентрации реагентов с течением времени должно удовлетворять уравнению (3). Перепишем его несколько иначе:

$$\frac{1}{[N]_t} = \frac{1}{[N]_0} + Kt.$$

Это уравнение представляет собой уравнение прямой линии в координатах обратная концентрация — время. Константа скорости бимолекулярной

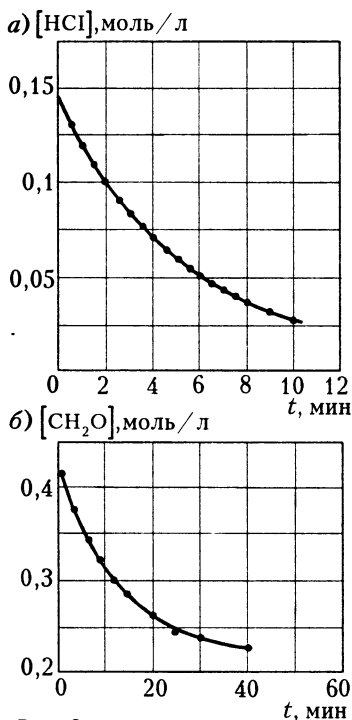


Рис. 3

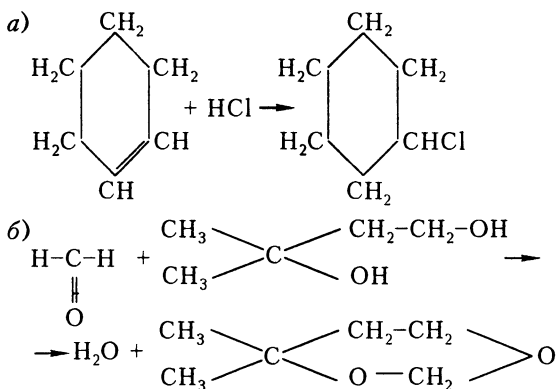


Рис. 4

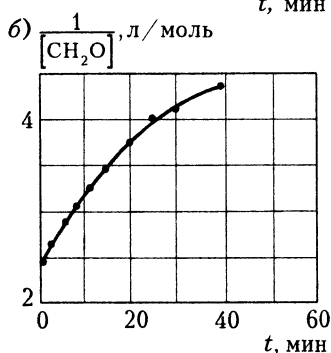
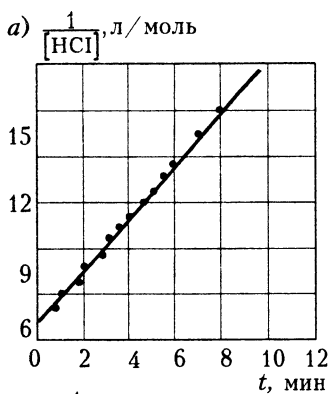


Рис. 5

реакции равна тангенсу угла наклона этой прямой к оси t .

Взяв значения концентраций по рисунку 3, построим кривые зависимости обратных концентраций исходных веществ от времени (рис.5). Видно, что в случае хлорирования циклогексена действительно получается прямая линия. Значит, это бимолекулярная реакция. Константа скорости этой реакции равна

$K = \text{tg } \varphi \approx 0,02 \text{ (л/моль)/с.}$

Для второй реакции получившаяся кривая существенно отличается от прямой. Значит, это более сложная реакция, и мы не сможем найти константу ее скорости. Дополнительные исследования позволили установить, что продукты реакции (диметилдиоксан и вода) взаимодействуют между собой, давая исходные вещества, т.е. в этом случае протекают одновременно две элементарные бимолекулярные реакции.

Итак, мы рассмотрели, как протекает простейшая химическая реакция взаимодействия двух веществ. Теперь нам известно, как изменяется со временем скорость реакции и концентрации веществ. Мы умеем рассчитать текущие концентрации, зная константу скорости реакции и начальные концентрации исходных веществ; можем отличить бимолекулярную реакцию от других процессов. На самом деле в большинстве реальных химических процессов протекает одновременно несколько элементарных реакций, которые влияют друг на друга. Рассмотрение совокупности этих реакций приводит к появлению более сложных математических уравнений, описывающих реальный процесс.

НЕЙТРОНЫ ИЩУТ УБИЙЦУ

А.С.Штейнберг

Название этой статьи подсказано детективным сюжетом, с которым терпеливый читатель познакомится в самом ее конце. А пока займемся вещами, весьма далекими от криминалистики, и поговорим о том, как можно определить химический состав вещества, т.е. узнать, какие элементы и в какой пропорции присутствуют в образце.

Из курса химии вы знаете, что это можно сделать с помощью характерных для веществ и элементов химических реакций, методами так называемой мокрой химии. Однако в некоторых случаях применение этих методов встречается с серьезными трудностями. Например, когда требуется произвести химический анализ очень мелкого по размерам образца или когда необходима исключительно высокая точность анализа многих элементов одновременно. Скажем, может потребоваться выявить один «инородный» атом среди миллиона или ста миллионов других и определить, какого он сорта.

И такие ситуации отнюдь не умозрительны. Они, в частности, возникают в современной технологии полупроводников. Все чаще и чаще говорят, что вслед за веком каменным, бронзовым и железным наступил век кремния. Кремний составляет основу миниатюрных интегральных схем, без которых невозможна сегодняшняя электроника. А их свойства резко зависят даже от невероятно малого содержания примесей. Без умения определять состав мелких образцов кремния с очень высокой точностью невозможен прогресс в разработке новых поколений компьютеров.

Уже более ста лет известно, что самыми эффективными методами химического анализа часто оказываются физические методы. И среди них настоящим рекордсменом по чувствительности является нейтронный активационный анализ (НАА). Чтобы объяснить его принцип, мы вначале напомним, как устроено атомное ядро.

Атомное ядро состоит из положительно заряженных протонов и электрически нейтральных нейтронов. Количество протонов определяет заряд ядра и служит его главной характеристикой. Одни элементы отличаются от других прежде всего количеством протонов в ядре. У первого элемента таблицы Менделеева – водорода (H) – в ядре один протон, у второго – гелия (He) – два и т.д. Ну, а сколько в ядре нейтронов? Оказывается, в ядрах одного и того же элемента может содержаться разное число нейтронов. Ядра с одним и тем же количеством протонов, но разными количествами нейтронов называются изотопами. Поясним сказанное примером. В ядре гелия всегда два протона. А нейтронов может быть 1, 2, 4 или 6, т.е. имеются четыре изотопа гелия – ^3He , ^4He , ^6He , ^8He (индекс указывает суммарное число протонов и нейтронов). Рекордное число изотопов – 10 – имеет олово, 9 изотопов – у ксенона, 8 – у кадмия и теллура и т.д. В природе разные изотопы распространены неравномерно. Как правило, львиную долю (90% и более) всех природных запасов элемента составляет один-единственный изотоп.

Химические свойства разных изотопов совпадают. А вот физические могут отличаться, и очень заметно. Например, за счет «лишних» нейтронов атомные массы разных изотопов элемента различны. Но главное для нас не это. Большая группа изотопов обладает удивительным свойством – радиоактивностью. Они являются источниками излучения, которое нельзя увидеть или почувствовать, но которое можно зарегистрировать с помощью специальных приборов – детекторов излучения. Самые простые из них – фотопластинка и счетчик Гейгера. Мы не будем углубляться в вопрос о природе излучения, он сложен и выходит за рамки этой статьи. Но для наглядности вы можете представить себе излучение как поток невидимых частиц.

Излучение каждого радиоактивного изотопа в высшей степени специфично. Это – его индивидуальный портрет, неповторимый, как отпечатки пальцев человека. Самыми характерными штрихами в этом портрете являются энергия излучения (для нас – энергия частиц) и период полураспада. Что такое период полураспада, объяснить сравнительно несложно. С помощью детектора можно не только зарегистрировать излучение, но и измерить его интенсивность, т.е. определить, сколько частиц падает на единицу площади в единицу времени. Чем больше интенсивность, тем выше окажется степень почернения фотопластинки, тем чаще будет

щелкать счетчик Гейгера и т.п. Периодом полураспада изотопа (обозначим его T) называется время, за которое интенсивность его излучения ослабевает вдвое. За это время половина первоначально радиоактивных ядер превращается в нерадиоактивные (как говорят, стабильные). Периоды полураспада у разных изотопов различные – от долей секунды до миллионов лет. Специальные детекторы не просто измеряют интенсивность излучения, но и строят его спектр – график зависимости интенсивности излучения от его энергии.

Пример такого спектра приведен на рисунке 1. Резкие всплески интенсивности – их называют линиями спектра – соответствуют излучениям разных изотопов. Каждую линию с помощью заранее составленных таблиц легко связать со своим изотопом (именно так и распознали изотопы, указанные на рисунке). Построение спектра излучения, таким образом, решает задачу качественно-

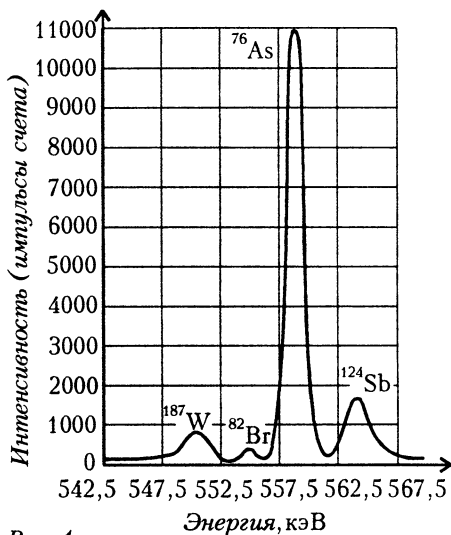


Рис. 1

го химического анализа образца, т.е. позволяет определить, из каких радиоактивных элементов он состоит.

То, что мы до сих пор рассказали, должно было убедить вас в одном: если бы образцы состояли из радиоактивных изотопов, то определить их качественный состав по спектрам было бы сравнительно несложно. Но вот беда – нормальные образцы состоят из природных нерадиоактивных изотопов. Поэтому для проведения анализа их надо активировать, т.е. сделать радиоактивными. Существуют разные способы активации. Проще всего «обстрелять» образец в реакторе нейтронами. Они электрически нейтральны, поэтому могут внедриться в положительно заряженное ядро, в результате чего нерадиоактивный (стабильный) изотоп может стать радиоактивным.

По спектрам излучения можно провести не только качественный анализ, но и количественный – узнать, сколько

атомов того или иного изотопа присутствуют в образце. Дело в том, что интенсивность излучения изотопа прямо пропорциональна количеству его ядер. Имея эталоны (т.е. образцы с заранее известным содержанием анализируемого элемента), можно, активировав их, построить график этой зависимости. А измеряя интенсивность излучения данного изотопа в исследуемом образце, который активировался вместе с эталоном, легко по графику определить содержание этого изотопа.

Описанный метод качественного и количественного анализа и называют нейтронным активационным анализом – НАА.

В таблице приведен список элементов, содержание которых в кремнии очень важно знать. Там указаны природные (стабильные) изотопы, детектируемые радиоактивные изотопы со своими периодами полураспада и чувствительность НАА для них (т.е. минимальная концентрация, при которой элемент может быть обнаружен). В 1 см^3 кремния содержится примерно 10^{23} атомов, так что вы сами можете убедиться в рекордных возможностях НАА.

Основной природный изотоп	Детектируемый изотоп	T	Чувствительность, атом/см ³
²³ Na	²⁴ Na	15 часов	$1 \cdot 10^{12}$
³⁹ K	⁴² K	12,4 часа	$1 \cdot 10^{13}$
⁵² Cr	⁵¹ Cr	27,7 суток	$5 \cdot 10^{12}$
⁵⁶ Fe	⁵⁹ Fe	44,6 суток	$1 \cdot 10^{14}$
⁵⁹ Co	⁶⁰ Co	5,27 года	$2 \cdot 10^{11}$
⁶³ Cu и ⁶⁵ Cu	⁶⁴ Cu	12,7 часа	$2 \cdot 10^{12}$
⁶⁴ Zn	⁶⁵ Zn	244 суток	$1 \cdot 10^{13}$
⁷⁵ As	⁷⁶ As	26,3 часа	$1 \cdot 10^{10}$
⁸⁰ Br	⁸² Br	35,3 часа	$5 \cdot 10^{10}$
⁹⁸ Mo	⁹⁹ Mo	66,2 часа	$1 \cdot 10^{11}$
¹⁰⁸ Ag	¹¹⁰ Ag	252 суток	$2 \cdot 10^{11}$
¹²² Sb	¹²⁴ Sb	60,4 суток	$5 \cdot 10^{10}$
¹⁸¹ Ta	¹⁸² Ta	115 суток	$1 \cdot 10^{10}$
¹⁸⁵ W	¹⁸⁷ W	23,9 часа	$2 \cdot 10^{11}$
¹⁹⁷ Au	¹⁹⁸ Au	2,7 суток	$2 \cdot 10^9$
²⁰² Hg	²⁰³ Hg	47 суток	$1 \cdot 10^{11}$

На рисунке 2 приведены данные по содержанию примесей в кремнии, полученные методом НАА в трех различных американских фирмах, поставляющих этот материал в электронную промышленность. Сравнительно высокие концентрации некоторых элементов, в частности железа и хрома, требуют проведения дополнительной очистки кремния перед приготовлением интегральных схем.

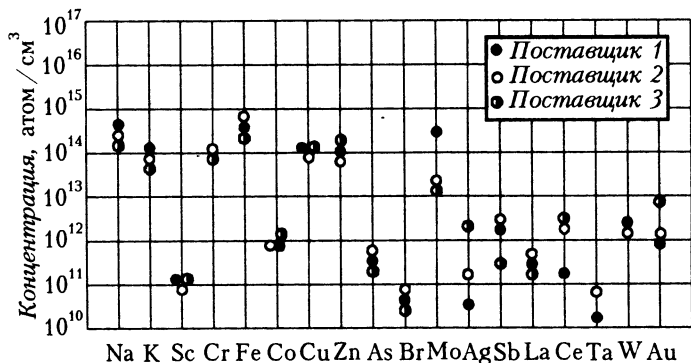


Рис. 2

И в заключение — обещанный детективный сюжет.

13 мая 1958 года в канадском городке Эдмундстоне был обнаружен труп 16-летней девушки Гаэтаны Бушар. Подозрения, на основании косвенных улик, пали на американца Джона Фоллмена, который часто приезжал по делам в Эдмундстон. Тот, однако, категорически отрицал свою причастность к преступлению. Следствие остро нуждалось в прямых доказательствах. Тщательный осмотр трупа Бушар установил, что в руке девушки остался зажатый единственный волосок. Он мог принадлежать либо ей, либо убийце. Можно ли по одному волоску точно идентифицировать личность его хозяина? Такой вопрос полицейские поставили перед специалистом по НАА Робертом Джерви. Для ответа тому пришлось выполнить специальное исследование. Основная идея состояла в том, что для волос каждого человека характерен свой неповторимый набор и концентрация микроэлементов. Ни одному методу, кроме НАА, задача идентификации человека по волосам была не под силу. В результате кропотливой работы удалось доказать, что найденный волосок действительно принадлежит Фоллмену, и это стало решающим доказательством его вины.

ФИЗИКА ПРОТИВ МОШЕННИКОВ

И.Э.Лалаянц, Л.С.Милованова

Знаменитая туринская плащаница оказалась подделкой! Плащаница — погребальный покров, в который, как утверждали, было завернуто тело Иисуса Христа, — более чем на тысячелетие «моложе» самого Христа!

Прежде всего напомним, в чем суть дела. Известно, что в Турине, на севере Италии, на протяжении вот уже многих веков хранится в особом серебряном ковчеге некая холстина длиной 4,3 метра и шириной 1,1 метра. На холстине имеется «отпечаток» тела бородатого человека, в котором видят изображение Христа. В свое время было осуществлено компьютерное моделирование, что позволило «выявить» трехмерные очертания лица и тела человека, лежащего с вытянутыми вдоль тела руками. Фотографии этого изображения в «негативе» обошли весь мир.

Надо сказать, что сам Ватикан начиная с XIV века подвергал сомнению подлинность плащаницы. Впервые она появилась около 1350 года в поместье некоего Жофрея де Шарни, французского рыцаря-крестоносца, графское поместье которого было недалеко от Парижа. Легенда гласит, что в 1203 году крестоносцы перед самым взятием Константинополя видели плащаницу в его окрестностях. Но граф унес с собой в могилу секрет обретения плащаницы.

В церковь поместья де Шарни, где хранилась холстина, хлынул поток верующих и паломников, желавших увидеть реликвию. Их не смущал вопрос, где же находилась святыня в течение чуть ли не полутора тысячелетий и почему она не истрепалась за столь долгое время.

Несколько позже — уже во времена Возрождения — многие (особенно художники) стали обращать внимание на то, что на плащанице Христос с бородой. Дело в том, что все древнеримские источники показывают нам его... безбородым! Таким он изображен на стенах катакомб Рима, на мозаике Равеннского собора конца V века, на картине распятия, вырезанной из

слоновой кости около 420 года. Но наиболее интересна римская мозаика, случайно открытая при раскопках в английском поместье Хинтон Сент-Мэри в 1963 году. Это поместье находится в графстве Дорсет, лежащем к западу от Лондона. Безбородый Христос изображен в центре напольной мозаики в окружении четырех евангелистов – Матфея, Луки, Марка и Иоанна. Чтобы Христа не спутали с кем-нибудь другим, над его головой художник выложил знаменитое греческое «Хи Ро» – начальные буквы слова «Христос».

В 1389 году епископ французского города Труа, что к востоку от Парижа, в верховьях Сены, писал папе Клименту IV, что плащаница является фальшивкой. Папа с ним полностью согласился. Тем не менее к 1578 году, благодаря стараниям герцога Савойского, плащаница оказывается в городе Турине (столице Савойи). Примерно в это время один итальянский художник написал картину, изображающую снятие Иисуса с креста, над которым ангел несет плащаницу с отпечатками его тела...

В настоящее время плащаница является собственностью Ватикана (с условием ее вечного хранения в Туринском соборе). С 1931 года, когда была сделана первая «негативная» фотография, началось научное исследование плащаницы. После второй мировой войны, в 1951 году, была даже организована специальная Гильдия святой плащаницы, по инициативе которой в 1978 году было проведено исследование холстины группой международных экспертов. Компьютер показал, что в нее был завернут мужчина ростом около 180 см, причем весьма худой. Американский судебный эксперт Р. Баклин определил, что масса человека около 77 кг. Спектроскописты исследовали краску, с помощью которой на холст были нанесены отпечатки. Но проверить аутентичность ткани всеми этими методами оказалось невозможно. Необходима была точная датировка холстины.

Почему же ее не провели тогда? Ведь в распоряжении ученых уже был метод радиоуглеродного анализа, созданный американским химиком У. Либби, за что он был удостоен Нобелевской премии по химии за 1960 год. Метод, как и все гениальное, прост по своей идее и исполнению. Но в те годы для проведения анализа по этому методу требовалось сжечь довольно большой кусок холста, на что Ватикан сказал категорическое «нет» (для одного опыта тогда нужен был лоскут не меньше носового платка). В чем же суть метода?

Всем хорошо известно, что наша атмосфера постоянно

бомбардируется частицами весьма высоких энергий. Попадая в ядра атомов, они выбивают из ядер нейтроны – частицы, не несущие заряда и по массе равные. Число протонов в атомном ядре равно порядковому номеру элемента в таблице Менделеева. Так, в ядре азота ${}^{14}_7\text{N}$, стоящего в таблице на 7-м месте, содержится 7 протонов и $14 - 7 = 7$ нейтронов (7 – порядковый номер, 14 – массовое число, т.е. общее число протонов и нейтронов). Как уже говорилось, космические лучи выбивают из ядер нейтроны, обладающие достаточно высокой энергией. Поскольку нейтрон не имеет заряда, он довольно легко проникает в ядро азота, выбивая из него протон. Так получается новое ядро, в котором оказывается 8 нейтронов и всего 6 протонов. Новое ядро имеет заряд 6 и массовое число 14, т.е. оно находится в клетке углерода. Из-за несбалансированного количества протонов и нейтронов ядро изотопа углерода ${}^{14}_6\text{C}$ оказывается нестабильным (радиоактивным), в результате β -распада (испускания электрона и антинейтрино) оно снова превращается в ${}^{14}_7\text{N}$.

Радиоактивный углерод распадается очень медленно: половина ядер распадается примерно за время $T_{1/2} = 5600$ лет (это время называют периодом полураспада). Можно было бы подумать, что за время $2T_{1/2} = 11200$ лет распадутся все радиоактивные ядра. Но это, конечно, не так. За последующие $T_{1/2} = 5600$ лет распадется половина оставшихся ядер (т.е. останется четверть начального их количества), за последующие – половина этой четверти, и т.д. В компактном виде можно записать закон убывания числа радиоактивных ядер (закон радиоактивного распада) так:

$$N(t) = N_0 \cdot 2^{-t/T_{1/2}}.$$

Радиоактивный углерод – как и обычный стабильный изотоп – окисляется кислородом воздуха до двуокиси CO_2 , которая поглощается растениями в процессе фотосинтеза. Количество потребляемого растениями радиоактивного углерода чрезвычайно мало – не больше одного атома ${}^{14}_6\text{C}$ на триллион (10^{12}) обычных атомов, поэтому не стоит бояться за наше здоровье. Усвоенный в ходе фотосинтеза углерод идет на строительство огромных биомолекул целлюлозы, или клетчатки, входящей в состав травы, древесины, льна, хлопка и т.д. Травой питаются жвачные животные, от которых получают рога и копыта, а также кожу – из нее в древности чего только не делали. А кости и бивни слонов издревле

ценились косторезами как прекрасный материал для поделок. И если вы определите количество оставшегося $^{14}_6\text{C}$, то тем самым вы — с определенной мерой погрешности — определите, когда был изготовлен тот или иной предмет.

Легко сказать «определите», когда мы не знаем, сколько $^{14}_6\text{C}$ было в древнем образце. Да, это в большинстве случаев ученым не известно, но есть некоторые «опорные» точки. Тот же Либби определил количество радиоактивного углерода в древнеегипетских предметах, время изготовления которых было точно известно по историческим документам и другим источникам (что позволило рассчитать первоначальное количество $^{14}_6\text{C}$). Кроме того, археологи и антропологи умеют примерно определять возраст по глубине залегания. Естественно, что чем древнее стоянка, тем глубже приходится копать. Так постепенно стало ясно, сколько примерно может содержаться радиоактивного углерода в образце того или иного времени. Недаром ученые говорят о дате с точностью $\pm(30 - 80)$ лет.

Одной из крупнейших побед нового метода физической датировки было разрешение загадки знаменитого «пилтдаунского человека». Он был назван по местечку Пилтдаун (к югу от Лондона), где в 1912 году археолог-любитель Ч. Доусон нашел череп человека, умершего — как потом выяснилось — в середине XV века во время эпидемии чумы. Хитроумный А. Кейт приделал к черепу нижнюю челюсть орангутанга с острова Борнео и объявил подделку «находкой века», «недостающим звеном» между человеком и обезьяной. Уже в 1913 году, сравнив на рентгене плотности костей черепа и челюсти, ученые подвергли сомнению справедливость этого заявления, но их никто не послушал (т.е. уже в самом начале с помощью физического метода можно было бы разоблачить подделку, а вместе с нею и главного поддельщика, который в 1939 году открыл «памятник» на месте находки). Когда в 1953 году Кейту сказали, что пилтдаунский человек подделка, он ответил, что знает. К сожалению, все подумали, что он имел в виду отчет о раскрытии подделки, опубликованный в лондонской газете «Таймс».

Очень часто изделия, открытые археологами, настолько ценны, что никто не осмеливается подвергать их радиоуглеродному анализу, а попросту говоря — сжигать. Но не менее часто на месте находок удается обнаружить угли костров, по которым и определяют возраст захоронения, очага жилищ и т.д.

Совсем недавно так было датировано первое групповое захоронение кроманьонцев в чешской области Моравии. Возраст находки оказался равным 28 тысячам лет. А неподалеку от Моравии – в австрийском Гальгенберге – ученые раскопали фигурку женщины, которую древний художник вырезал из стеатита, или мыльного камня. Возраст фигурки – 27 тысяч лет.

Сегодня разрешающая способность радиоуглеродного анализа резко возросла благодаря применению компьютеров и «кооперированию» его с другими, еще более тонкими и точными физическими методами. Речь идет о масс-спектрометрии, которая позволяет «напрямую» подсчитывать количество атомов $^{14}_6\text{C}$. Помимо повышения точности анализа, новый метод позволяет резко уменьшить объем и массу образца, по которому определяют возраст. Метод заключается в отделении атомов $^{14}_6\text{C}$ от остальной массы углерода в образце. Для этого все атомы углерода – как стабильного природного, так и радиоактивного – подвергаются ионизации, после чего они разгоняются в ускорителе до энергии примерно 10 МэВ. Далее все атомы «прогоняют» сквозь магнитное поле, в котором более легкие атомы $^{12}_6\text{C}$ и $^{13}_6\text{C}$ отклоняются в большей степени, нежели тяжелые $^{14}_6\text{C}$. Остается только подсчитать количество атомов $^{14}_6\text{C}$ на финише (на нем окажутся только эти атомы).

Метод масс-спектрометрии позволил не только в 1000 раз уменьшить необходимую для анализа массу образца, но и отодвинуть датировку в более далекое прошлое. Дело в том, что число радиоактивных распадов $^{14}_6\text{C}$ при старом методе определялось как число сцинтилляций, или вспышек молекул флюоресцирующего вещества, которые усиливались фотоумножителями и подсчитывались компьютером. При таком довольно грубом методе требовалось не меньше 10 тысяч атомов $^{14}_6\text{C}$, содержащихся в 1–5 г чистого углерода (соответственно, в 25–1000 г образца). Для масс-спектрометра же требуется всего 0,5–5 мг углерода!

Резко снизились требования и к радиоактивности углерода. В образцах старше 37–40 тысяч лет радиоактивность не отличалась от фоновой, которая существует благодаря космическому излучению и современному радиоактивному загрязнению. Сегодня, как уже говорилось, определяется не радиоактивность как таковая, а всего лишь число атомов $^{14}_6\text{C}$, что гораздо легче и точнее. Неудивительно поэтому, что когда в

Ватикане изложили все эти соображения, было получено разрешение на проведение анализа ткани плащаницы.

Анализ проводился в трех лабораториях: Цюриха, Оксфорда и Аризонского университета в Туксоне. Для контроля были взяты кусочки тканей, возраст которых известен. Это ткань священных одеяний, хранящихся ныне в часовне Жана Базилика во французском городке Вар, а также ткань, в которую обернуты мощи одного из исламских пророков. Результаты анализов, проведенных в этих трех лабораториях, определили время изготовления одеяний: начало XIII века и XI–XII века, что соответствует историческим данным. Затем ученые приступили к датировке ткани плащаницы и определили ее возраст: между 1262 и 1384 годами. Таким образом, плащаница оказалась более чем на тысячу лет «моложе», нежели предполагалось. М.Тайт, который со стороны Британского музея координировал усилия всех трех лабораторий, сказал, что «поражает удивительное совпадение результатов разных групп». Таким образом, король умер! Но у этой фразы есть и продолжение: да здравствует король! Средства массовой информации с удивлением отметили, что количество паломников после опубликования результатов ученых резко возросло. Нескончаемые очереди в кафедральный собор Джованни Баттиста – так итальянцы на свой лад называют Иоанна Крестителя, крестившего в святых водах Иордана самого Христа, – поражают воображение. Люди отстаивают долгие часы к ковчегу, чтобы лишний раз убедиться, что плащаница на месте и ей не нанесено никакого ущерба.

Ну а что же теперь ученые говорят об изображении некоего тела, подлинность которого на холстине никем не отрицается? В 1979 году У.Макрон из Чикагского университета провел анализ частицы краски, с помощью которой сделан этот «рисунок». Оказалось, что она ничем не отличается от самой обычной... ржавчины (которая химически представляет собой, как известно, окись железа), широко применявшуюся средневековыми художниками. Талантливость изображения, его стиль, а также прекрасное знание анатомии позволяют предположить, что автор его – сам великий Леонардо из города Винчи, умерший в 1519 году, т.е. в самом начале XVI века. Хочется надеяться, что будущие поколения ученых сумеют раскрыть окончательно тайну туринской плащаницы. Как – трудно пока сказать. Но так же трудно было всего несколько десятков лет тому назад предполагать, что сегодня мы будем знать точный ее возраст.

Подделкам в мире искусства нет числа. Некоторое время назад Британский музей провел очередную (!) выставку знаменитых подделок произведений искусства самых разных времен и цивилизаций. На ней была представлена вавилонская клинописная табличка II тысячелетия до н.э., сделанная под третье тысячелетие. Забавно, что на этой поддельной табличке имеется древнешумерская надпись, которая гласит: «Подделывателю сего документа Энки забьет все каналы слезью!». Если учесть, что Энки был великим божеством, то проклятье действительно было грозным.

Сегодня в распоряжении искусствоведов и музейных работников имеется множество физических методов для определения подделок, не соответствующих тому времени, на которое они «рассчитаны». При освещении, например, поверхности художественного изделия ультрафиолетовыми лучами она начинает флюоресцировать. Съемка такой светящейся поверхности, особенно с помощью микроскопа, позволяет выявить множество деталей, которые не видны невооруженным глазом. А инфракрасные лучи позволяют «видеть» и то, что скрыто под красочным слоем. То же можно сказать и о съемке в рентгеновских лучах, которые, например, позволили увидеть под «Юдифью» Тициана портрет испанского короля Карла V.

Есть в распоряжении ученых и так называемый активационный анализ. Он заключается в активации ядер атомов металла с помощью быстрых нейтронов. Отдавая затем полученную энергию, ядра формируют специфический спектр, по которому можно отличить, скажем, свинец от титана. Оказывается, в старину художники грунтовали холст свинцовыми белилами, сегодня же они для этого используют титан. Известно, что титановые белила стали выпускаться лишь в 20-х годах двадцатого столетия.

А вот знаменитая краска «берлинская лазурь» появилась в конце XVIII века. На упоминавшейся уже выставке в Британском музее висел один из «Боттичелли», созданный после первой мировой войны. Настоящий Сандро Боттичелли, живший в 1445–1510 годы, никак не мог рисовать с помощью берлинской лазури, обнаруженной при исследовании хламиды Богородицы на «его» картине.

Сейчас крупнейшие музеи мира, в том числе Британский, Лувр, нью-йоркский Метрополитен, а также музей Пибоди в Гарварде обзаводятся компактными ускорителями протонов и ионов. В подземелье Лувра установлен ускоритель, построен-

ный в США и обошедшийся министерству культуры Франции в 1,6 млн. долларов. Он используется для идентификации произведений искусства, а также в решении проблемы их сохранности. А в музее Пибоди выявили «современную» костяную пластинку, резьба на которой изображала мамонта. Эта пластинка появилась в музее в 1889 году и произвела в свое время самую настоящую сенсацию, поскольку «свидетельствовала» о том, что на территории нынешних США некогда водились эти мохнатые родственники слонов. Теперь все встало на свое место: мамонты в Новом Свете не водились, что давно утверждали зоологи и палеонтологи.

Не надо думать, что физические методы используются в искусствоведении только для разоблачения подделок. Нет, с их помощью осуществляются и «реабилитации». Речь, в частности, идет о новом методе ПИРЭ, или протон-индуцированной рентгеновской эмиссии. Суть этого метода в следующем. Если разогнанные в ускорителе протоны сфокусировать в тонкий пучок диаметром 0,5–1 мм (энергия пучка до 4,5 МэВ) и направить на поверхность, например, рукописи, то протоны начинают возбуждать атомы металлов, входящих в состав краски или чернил. (За сохранность древних документов можно не волноваться: энергия облучения не превышает энергию 100-ваттной лампочки, освещающей книгу с расстояния полуметра.) Возбужденные атомы испускают рентгеновские лучи, которые регистрируются чувствительными детекторами. Затем сигналы от детекторов подаются в компьютер для анализа.

С помощью метода ПИРЭ была не так давно «прочитана» 42-строчная Библия, отпечатанная в типографии Гутенберга и находящаяся в библиотеке Гарвардского университета. Выяснилось, что Гутенберг использовал для своей типографской краски большие количества свинца и меди. Помощники Гутенберга по типографии смешивали новые порции краски буквально каждый день. Библия состояла из нескольких тетрадей. Ежедневно печаталось до шести тетрадей одновременно. Поначалу Библию печатали в 40 строк, но затем перешли на 42 строки. Переносы не допускались – на весь текст было допущено всего два переноса слов. После того как первый лист отпечатывали с обеих сторон, начинали печатать 2-й и 120-й и т. д. Это и позволяло вести работу над шестью тетрадями одновременно, хотя и требовало очень точного соблюдения «технологии», раскрытой с помощью метода ПИРЭ. В лаборатории, где проводилась экспертиза Библии

Гутенберга, проходил практику и специалист из Лувра. Музей хочет исследовать 36-строчную Библию Гутенберга, которая отпечатана раньше 42-строчной и хранится в Национальной библиотеке Франции.

С помощью ПИРЭ удалось «реабилитировать» и известную «карту Винланда». Винландом – «Страной винограда» – норманны называли в своих сагах некую далекую землю, лежавшую за Гренландией, богатую диким виноградом. Ее будто бы открыл легендарный Эрик Рыжий, считающийся сегодня первооткрывателем Америки. Карта Винланда вошла в научный обиход в начале 60-х годов двадцатого столетия. Ученых поразило удивительно точное изображение Гренландии, мало чем отличающееся от современного. Считалось, что подобной точности картографии просто было невозможно добиться во времена отважных викингов. В 1974 году карта была объявлена подделкой на основании анализов, проведенных группой ученых Чикагского университета. Анализы показали высокое содержание окислов титана в чернилах, которые использовались для нанесения линий на карте. И вот ПИРЭ доказал, что по крайней мере треть линий, а то и больше, нанесена на карте чернилами, содержание титана в которых не превышает «норму», т.е. тот минимум, который можно считать естественной примесью. В других линиях титан и вовсе отсутствовал. Значит ли это, что была доказана подлинность карты? Да нет, просто было показано, что для чернил не использовали окислов титана, т.е. что чернила не современные.

Все, конечно, помнят великолепную книгу Марка Твена «Янки при дворе короля Артура» и рыцарей Круглого стола. Много лет в большом холле кафедрального собора в английском городе Винчестер на стене висит огромный – больше шести метров в диаметре – круглый стол, вернее его столешница. Туристы из разных стран восхищались ее разноцветными секторами и большим красно-желтым цветком в самом центре. К сожалению, сегодня почитателей старины и благородных рыцарей ждет разочарование: радиоуглеродный анализ показал, что дерево, из которого была сделана столешница, росло в Англии всего лишь на полтысячи лет позже того времени, когда жил и творил легендарный **король Артур**...

Так физика помогает нам сегодня разгадывать вечные загадки волнующего искусства. Жизнь коротка, а искусство вечно, как говорили древние.

Поговорим немного о погоде...

Б.М.Бубнов

В давние времена правила хорошего тона предписывали при первом знакомстве затевать разговор о погоде. Поговорим о ней и мы, а именно о той стороне вопроса, которая касается движения атмосферы как некоторого физического объекта — ведь, в конце концов, погода в любой точке нашей планеты определяется движением атмосферных масс. Однако такое движение является настолько сложным, что точное предсказание поведения атмосферы на длительный срок не представляется возможным. Для получения достаточно удовлетворительного прогноза погоды требуется кропотливая работа в двух направлениях. Первое направление — увеличение частоты измерений основных параметров атмосферы, т.е. температуры, давления, влажности, скорости ветра и т. д., и уменьшение расстояний между точками, где эту информацию получают. Второе направление, которое является предметом изучения физики атмосферы, — исследование основных физических закономерностей, определяющих атмосферные процессы.

Модель Хэдли. При рассмотрении очень сложных объектов (а атмосфера безусловно относится к таким объектам) физики стараются построить модель и в рамках этой модели рассматривать поведение объекта. Переход от объекта к модели является наиболее важным шагом любого исследования. С одной стороны, модель должна отражать те характеристики объекта, которые мы изучаем, т.е. удовлетворять экспериментальным и натурным данным, с другой — она должна быть достаточно простой для понимания и теоретического описания. Какая же самая простая модель соответствует этим требованиям при рассмотрении крупномасштабных движений атмосферы?

Прежде всего, модель должна учитывать основные факторы, определяющие эти движения. Первым фактором следует назвать силу гравитационного взаимодействия. Эта сила в

значительной степени регулирует газовый состав атмосферы и определяет способность планеты удерживать свою атмосферу. Чем больше масса планеты, тем проще ей удерживать легкие газы; при малой массе вращающееся тело может совсем лишиться атмосферы (возможно, именно поэтому нет атмосферы у Луны).

Вторым важным фактором является облучение планеты солнечной радиацией. Количество энергии, поступающей к планете от Солнца, зависит от времени суток, а также от наклона орбиты (зима — лето, экватор — полюс). В среднем на каждый квадратный метр земной поверхности от Солнца ежесекундно поступает 1372 Дж энергии. (Зная радиус Земли, легко вычислить суммарный поток энергии, поступающий от Солнца.) Падающие на Землю лучи частично отражаются; отношение отраженной радиации к падающей называется альбедо поверхности. Альбедо сильно меняется в зависимости от вида поверхности, принимая значение от 0,1—0,15 для океана до 0,6—0,8 для чистого снега; в среднем для Земли альбедо составляет примерно 0,3. Чем больше энергии приходит в данное место планеты, тем сильнее оно нагревается. Нагретый воздух стремится вверх, холодный — опускается, и в результате в атмосфере возникают вертикальные воздушные потоки. Если бы Земля вращалась вокруг своей оси очень медленно, то основные температурные контрасты, которые создают движение атмосферы, возникли бы между нагретым дневным и охлажденным ночным полушариями. Кроме различия между дневными и ночными температурами, существуют различия между температурами на полюсах и на экваторе.

Третий определяющий фактор — собственное вращение Земли — делает несущественным для глобальных атмосферных течений суточный нагрев, так как время их образования и движения значительно больше времени вращения, т.е. больше суток. Преобладающим становится поднятие воздуха на экваторе, движение его в верхних слоях к полюсу, опускание там и движение от полюса к экватору. Образуется так называемая меридиональная конвективная ячейка. (Напомним, что конвекцией называется перенос тепла посредством движения различных по плотности частей газа или жидкости. Теплопроводный механизм передачи тепла, обусловленный столкновением молекул, не играет существенной роли в процессе движения атмосферы.) В результате вращения Земли меридиональная ячейка принципиальным образом трансформируется. Рассмотрим массу воздуха M , перемещающую

ся от экватора к полюсу. Ее скорость v складывается из скорости движения воздуха относительно Земли и линейной скорости вращения Земли в данной точке. Что будет происходить по мере перемещения этой массы в более высокие широты? На этот вопрос дает ответ один из фундаментальных законов механики — закон сохранения момента импульса, важной механической характеристики вращающейся системы. Для материальной точки — это вектор, определяемый произведением ее радиуса-вектора и вектора импульса. Если сумма моментов сил, действующих на систему, равна нулю, то момент импульса остается неизменным. Что это означает для рассматриваемой нами массы воздуха? На экваторе ее момент импульса был равен $L_0 = R_z \cdot Mv_z$. При перемещении от экватора к полюсу уменьшается расстояние до оси вращения Земли. Чтобы момент L_0 сохранялся, должна увеличиваться скорость перемещения — масса воздуха при движении от экватора к полюсу отклоняется от направления «на полюс». В умеренных широтах северного полушария воздух, который движется с экватора, поворачивает на восток (западные ветры, из-за которых, например, полет из Москвы в Новосибирск занимает меньше времени, чем обратный перелет), а воздух, который движется к экватору, отклоняется на запад (нижнее пассатное течение).

Впервые такая упрощенная схема атмосферной циркуляции была предложена в 1735 году Дж. Хэдли и часто называется зональной циркуляцией Хэдли (рис. 1). Аналогичное объяснение, не зная о работе Хэдли, дали знаменитый философ И. Кант (1756 г.) и Д. Дальтон (1793 г.). Естественно, что за прошедшие 250 лет наши знания о земной атмосфере

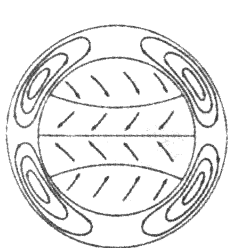


Рис. 1. Первая схема циркуляции атмосферы — по Дж. Хэдли (1735 г.)

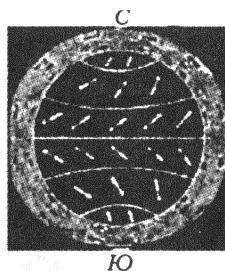


Рис. 2. Общая циркуляция атмосферы по У. Феррелу (1859 г.)

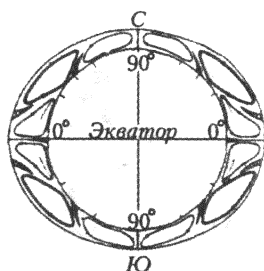


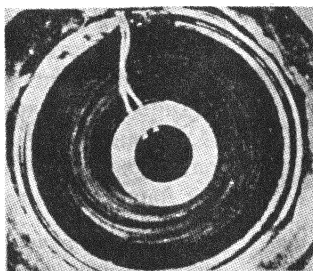
Рис. 3. Схематическое представление меридиональной циркуляции по Т. Бергерону (1928 г.)

сильно изменились, и в связи с этим неоднократно изменялась и дополнялась схема общей циркуляции (рис.2 и 3), однако и сейчас она еще далека от совершенства.

Циклоны и антициклоны. Всякий раз, слушая прогноз погоды, мы узнаем о передвижении или взаимодействии циклонов и антициклонов, т.е. вихревых образований, размеры которых достигают сотен километров. Как связать наличие этих образований с общей циркуляцией атмосферы? Оказывается, что в зависимости от основных определяющих параметров (скорости вращения Земли, перепада температур в направлении экватор — полюс и т.д.) конвективная ячейка может быть как устойчивой — и в этом случае развивается циркуляция Хэдли, так и неустойчивой, как это наблюдается на Земле, где образуется волновое движение, состоящее из различного числа вихрей. В атмосфере обычно наблюдаются пять-шесть крупных вихрей. Если же все вихревые движения усреднить за достаточно большой промежуток времени, то усредненное движение будет аналогично рассмотренной нами зональной циркуляции.

Проще всего образование крупномасштабных вихрей наблюдать в лабораторном эксперименте. Берутся два металлических цилиндра и устанавливаются соосно. Внутренний цилиндр соответствует полюсу — его охлаждают, внешний соответствует экватору — его нагревают. Между цилиндрами наливается жидкость. Если система вращается с постоянной угловой скоростью, то в ней могут наблюдаться различные режимы движения. При малой скорости вращения частицы двигаются от внешнего цилиндра к внутреннему по спирали, так что жидкость относительно неподвижного наблюдателя вращается быстрее, чем цилиндры (рис. 4, а). Если увеличить

а)



б)

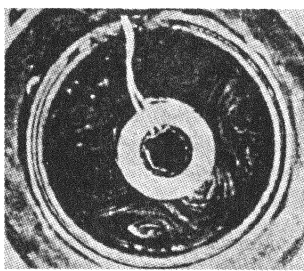


Рис.4. Образование крупномасштабных вихрей в лабораторных условиях

скорость вращения системы, то такое спиральное движение становится неустойчивым, и возникнет новый режим (рис. 4, 6). Этот режим характеризуется струйным течением, которое попеременно касается то внутреннего, то внешнего цилиндров. Кроме струйного течения возникают дополнительные к нему вихри (дополнительными они называются потому, что вихрь вращается так, чтобы в том месте, где он подходит к струе, их скорости имели одно направление). Количество вихрей в системе зависит от внешних параметров.

Аналогичная вихревая картина постоянно наблюдается на картах погоды, особенно в южном полушарии, в котором влияние материков не столь велико, как в северном. Одна из таких карт приведена на рисунке 5.

Если принципиальная схема образования циклонов и антициклонов достаточно проста,

то детальное описание их движений развито слабо, и прежде всего потому, что слишком много факторов определяют это движение. До сих пор мы рассматривали идеализированную атмосферу, а теперь обсудим возможное влияние материков на общую циркуляцию атмосферы. Материки выше океанов, и особенно сильно изменяют движение атмосферы высокие горные хребты. Кроме того, средние температуры материков и океанов значительно различаются, так как океаны более инертны — они медленнее нагреваются, но зато и медленнее охлаждаются. Различие температур материка и океана в зимнее время лишь немного меньше различия между температурами полярных и тропических областей. Такая тепловая неоднородность и влияние рельефа приводят к тому, что крупные вихри перестают передвигаться вместе с волной, и в течение нескольких недель вихрь может не менять своего положения. Это состояние атмосферы, получившее название блокирующей ситуации,

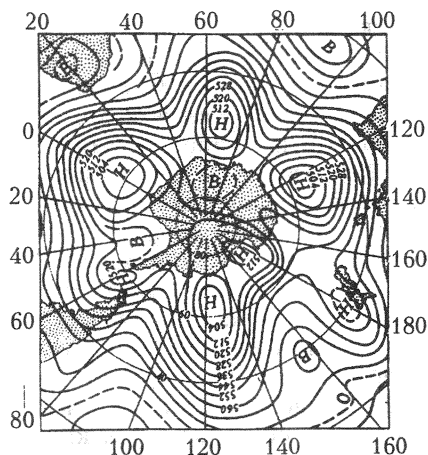


Рис. 5. Карта погоды южного полушария

приводит к многочисленным катастрофическим последствиям, в первую очередь — к засухам.

Парниковый эффект и ядерная зима. Внешние факторы, определяющие движение атмосферы, практически не меняются со временем, но изменения, происходящие в атмосфере, в первую очередь вызванные влиянием человека, могут принципиальным образом изменить суммарное действие этих факторов. Рассмотрим это на примере так называемых парникового эффекта и ядерной зимы.

Что такое парниковый эффект? Как известно, всякие нагретые тела излучают тепло, и длина волны этого теплового излучения тем меньше, чем выше температура тела. От Солнца к Земле приходит коротковолновое тепловое излучение, Земля же испускает длинноволновое. Если бы атмосфера одинаково пропускала эти виды излучения, то установилось бы определенное тепловое равновесие. Однако коротковолновое излучение слабо поглощается атмосферой, а длинноволновое сильно. В результате температура атмосферы выше, чем это можно было ожидать, не учитывая поглощения в толще атмосферы. Каким же образом действие человека может сказаться на изменении температуры атмосферы?

В основном тепловое излучение Земли поглощается водяным паром, облаками и углекислым газом. За последние 150 лет относительная концентрация CO_2 в атмосфере увеличилась на 25% и достигла 345 молекул на 1 миллион молекул воздуха. За счет этого в течение последних 100 лет средняя температура поднялась на 0,5 градуса. Аналогичными поглощающими свойствами обладают метан, фреоны и другие газы, концентрация которых за счет деятельности человека растет в последние десятилетия. В итоге к середине этого столетия можно ожидать существенное потепление климата планеты.

Ядерной зимой называют возможный вариант изменения климата в результате ядерной катастрофы. Рассмотрим, как будет реагировать атмосфера на большое количество ядерных взрывов. После взрывов, за счет пожаров и поднятия большого количества пыли и сажки в атмосферу, солнечные лучи не смогут достигать поверхности Земли, и она охладится на 10 — 15 градусов. За счет поглощения непрозрачными частицами солнечных лучей верхняя часть атмосферы нагреется на десятки градусов. В результате образуется большая разница температур между верхними и нижними слоями атмосферы. Это может принципиальным образом изменить атмосферную циркуляцию. Вместо циклонического движения, аналогично-

го изображенному на рисунке 4,б, может возникнуть зональная циркуляция — типа той, что изображена на рисунке 4,а. А время восстановления вихревой циркуляции может достигать нескольких месяцев. Отметим, что аналогичная ситуация наблюдается в атмосфере Марса, где в период сильных пыльных бурь образуется большая разница температур между верхними и нижними слоями атмосферы, в результате чего циклоны перестают существовать (а в обычной ситуации на Марсе наблюдается вихревая циркуляция с четырьмя крупными вихрями) и возникает однородное зональное вращение атмосферы. Все эти процессы достаточно легко моделируются как в лабораторных установках с вращающимися цилиндрами, так и в численных экспериментах.

Тайфуны, торнадо и другие «дьяволы». Кроме глобальных циклонических вихрей, охватывающих всю земную атмосферу, в ней существуют вихри самых разных масштабов и интенсивностей. Часто прохождение интенсивных вихрей бывает катастрофическим. К таким вихрям относятся тайфуны, смерчи, «пыльные дьяволы». Заметно различаясь по размерам — от сотен километров до десятка метров, — эти вихри имеют много общего.

Для образования интенсивного вихря требуется большой подвод энергии. Самые сильные и большие из них — тайфуны — образуются в экваториальной зоне в результате интенсивного поднятия теплого и влажного воздуха над нагретым океаном. Возможно образование вихрей и над землей; для этого нужна или сильно нагретая поверхность (пустыня), или встреча теплого и влажного воздуха с холодным и сухим, как это имеет место в случае торнадо (рис.6). Интенсивное струйное движение редко бывает устойчиво; аналогично тому как разбивается зональная циркуляция

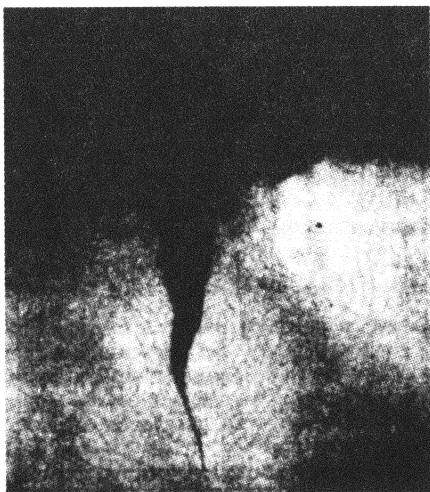


Рис.6. Торнадо, возникающее вдоль границ грозовых фронтов

на циклонические вихри, на границе различных фронтов при интенсивном поднятии образуются интенсивные вихри. (В частности, такое явление можно наблюдать на поверхности горячего чая, над которой непрерывно образуются и срываются маленькие вихорьки влажного воздуха.) Взаимодействия со струйными течениями, общая завихренность системы также влияют на образование вихрей. После образования вихря в действие вступают два противоположных механизма: механизм подпитки вихря, т.е. получение энергии от того района, над которым вихрь находится (чаще всего это приток тепла снизу), и механизм диссипации, или ослабления, вихря, обусловленный в первую очередь трением о воздух. Время существования вихря определяется тем, какой из механизмов преобладает. А траектории движения вихрей определяются закономерностями движения вихревых образований, которые в настоящее время интенсивно изучаются. В частности, понятно, что при рассмотрении движения тайфунов, траектория которых достигает тысячи километров, нельзя не учитывать вращения Земли, но можно им пренебречь при рассмотрении движения смерчей и «пыльных дьяволов» — вихрей с относительно коротким временем жизни.

БЕГ, ХОДЬБА И ФИЗИКА

И.А.Урусовский

Может ли человек, связанный по рукам и ногам, бегать быстрее «развязанного»? Может! Не верите? Давайте разберемся...

С точки зрения теории колебаний, бег человека в системе координат, связанной с бегуном, есть просто болтание ногами. Таким образом, ноги при беге и ходьбе выступают в роли маятников, соединенных шарнирно с корпусом и колеблющихся в поле тяжести около своего вертикального положения равновесия. Но нога – это не «груз на невесомой нити», не математический маятник, который изучают в школе: масса ноги не сосредоточена в одной точке, а распределена вдоль всей ноги. Нога – это физический маятник.

Важнейшая характеристика всякого маятника – частота его свободных колебаний. Для математического маятника, как известно, частота свободных колебаний равна $\nu_0 = \sqrt{g/l}/(2\pi)$ и зависит только от длины l маятника. У физического маятника, в отличие от математического, частота свободных колебаний зависит не только от его длины, но и от распределения массы вдоль маятника: чем ближе к оси колебаний сконцентрирована масса маятника, тем выше частота его свободных колебаний. Однако и для физического маятника частоту тоже можно записать как $\nu_0 = \sqrt{g/L}/(2\pi)$, где L – очень важная характеристика маятника, его приведенная длина. Это длина такого математического маятника, который имеет ту же частоту, что и данный физический.

Для пропорционально сложенных людей приведенная длина ноги-маятника пропорциональна росту. Поэтому частоты собственных колебаний ног людей разного роста относятся как корни квадратные из отношения (обратного) ростов. Это дает нам очень простой способ определения ν_0 для человека любого роста: достаточно измерить собственную частоту колебаний собственной ноги. А это несложно: стоя на одной ноге,

покачайте, расслабив мышцы, другой и сосчитайте среднее число колебаний ноги за одну секунду. Например, для человека, имеющего рост 175 см, частота оказывается равной 0,8 Гц. Так что для человека ростом h (см) частота равна

$$\nu_0 = 0,8\sqrt{175/h} \text{ (Гц)}.$$

Если ногу согнуть, как это бывает при беге, то приведенная длина ноги уменьшится и частота свободных колебаний возрастет примерно на одну четверть.

При ходьбе ноги совершают вынужденные колебания под действием мышц. Известно, что при вынужденных колебаниях их размах зависит не только от величины приложенной силы, но и от частоты ее действия. Частоту, при которой получается наибольший размах, называют резонансной частотой. Резонансная частота ν_p почти совпадает с частотой ν_0 свободных колебаний маятника:

$$\nu_p = \nu_0 \sqrt{1 - \alpha^2},$$

где $\alpha = \frac{1}{2\pi} \ln n \approx 0,37 \lg n$, а n — число, показывающее, во сколько раз уменьшается амплитуда свободных колебаний за один период. Амплитуда свободных колебаний ноги человека уменьшается за один период приблизительно в два раза, так что в интересующем нас случае $n \approx 2$, $\alpha \approx 0,11$ и резонансная частота отличается от собственной всего на 0,6%.

Ясно, что с точки зрения экономии сил выгоднее всего ходить, переставляя ноги с резонансной частотой. При таком темпе ходьбы запасаемая при подъеме ноги потенциальная энергия наиболее полным образом переходит в кинетическую в момент прохождения ноги положения равновесия, а через четверть периода (через полшага) кинетическая энергия колебательного движения наиболее полно переходит в потенциальную. Максимальные значения потенциальной и кинетической энергий в этом случае почти одинаковы, и дополнительная нагрузка на мышцы ног, связанная с необходимостью «болтать» ногами при ходьбе, минимальна.

Люди действительно ходят, переставляя ноги с резонансной частотой. Отклонения «рабочей» частоты от резонансной весьма невелики. И ясно почему: чем больше это отклонение, тем больше добавочная нагрузка на мышцы, связанная с преодолением инерции ног при слишком быстром темпе ходьбы или с преодолением действующей на ноги силы

тяжести при слишком медленном темпе. Ситуация совершенно аналогична знакомой всем практике раскачивания на качелях: сравнительно легко раскачать качели на их резонансной частоте, но если вы будете пытаться раскачать их с частотой, скажем, вдвое большей, то быстро устанете, а качели практически не сдвинутся с места.

Теперь понятно, почему человек, если требуется идти быстрее, прежде всего увеличивает ширину шага, а не темп ходьбы. Скорость движения при этом возрастает, а резонансная частота колебаний ноги изменяется очень мало: из физики известно, что частота почти не зависит от размаха колебаний. Кроме увеличения ширины шага, есть еще один резерв убыстрения хода: сгибание ноги в колене в то время, когда она оторвана от земли. На ширине шага это, конечно, не отражается, а резонансная частота при этом возрастает, и человек, «подстроив» таким образом резонансную частоту своих ног к более высокому темпу ходьбы, может идти быстрее.

Руки человека также приспособлены для ходьбы. Поскольку ноги движутся в двух разных параллельных плоскостях, находящихся на некотором расстоянии друг от друга, движение ног вызывает момент сил, стремящийся повернуть корпус человека вокруг вертикальной оси. Чтобы сохранить прямую походку, люди размахивают руками «навстречу» движению ног. При таком движении рук возникает момент сил, противоположный моменту, обусловленному движением ног, и компенсирующий его. Заодно уменьшаются смещения по вертикали центра тяжести тела и связанная с этим работа: ведь раздвигание ног при ходьбе смещает центр тяжести вниз, а раздвигание рук – вверх. Конечно, человек может сохранять прямую походку и не размахивая руками, но лишь ценой дополнительного напряжения мышц, а это невыгодно.

Размахивать руками при ходьбе легче всего, если резонансные частоты колебаний рук и ног одинаковы. Оказывается, эти частоты действительно совпадают. Более того, если человек «подстраивает» резонансную частоту колебаний ног под ускоренный темп движения, сгибая их, то при этом он соответственно сгибает и руки, поддерживая тем самым равенство резонансных частот колебаний рук и ног.

Чем больше скорость ходьбы, тем сильнее приходится сгибать ноги (и руки), чтобы «подстраивать» резонансную частоту под желаемый темп движения. При быстром беге ноги сгибаются под очень острым углом. Но как ни старайтесь, а

сложить ногу более чем вдвое и тем самым более чем вдвое уменьшить приведенную длину ноги вам не удастся (таково уж устройство ног). Значит, нельзя увеличить частоту резонансных колебаний ног более чем в $\sqrt{2}$ раз. (А если учесть, что во время отталкивания от земли нога должна быть прямой, то станет ясно, что «коэффициент увеличения» заведомо меньше $\sqrt{2}$.)

Итак, «подстройка» резонансной частоты под темп ходьбы или бега возможна лишь в довольно ограниченных пределах. И когда приходится бежать в быстром темпе, то запасаемой при каждом подъеме ноги потенциальной энергии не хватает для сообщения ноге во время отталкивания от земли нужной кинетической энергии колебательного движения. Восполнять ее недостачу приходится за счет работы мышц. А требуемая кинетическая энергия быстро растет с увеличением скорости: она пропорциональна квадрату скорости движения бегуна. Если же учесть, что при той же ширине шага скорость пропорциональна числу шагов в секунду, то выходит, что энергия, «попусту» затрачиваемая на «болтание» ногами при быстром темпе движения, пропорциональна третьей степени скорости. Это означает, что увеличение скорости бега всего на 10% требует увеличения затраты энергии на одну треть, а двукратное увеличение скорости потребовало бы восьмикратного увеличения затрачиваемой энергии. Что же касается требуемых сил, с которыми мышцы должны приводить в движение ноги при быстром беге, то они пропорциональны квадрату скорости.

Такая резкая нелинейная зависимость затрат энергии от скорости обуславливает сравнительно небольшой разрыв в скорости бега на короткие дистанции между рекордсменами и просто хорошими легкоатлетами. Вот почему так трудно «выжать» лишние доли секунды на стометровке. Кстати сказать, это также объясняет, почему при беге на длинные дистанции, когда особенно нужно беречь силы, люди предпочитают бежать, делая сравнительно большие прыжки, но переставляя ноги с частотой, близкой к резонансной. И это несмотря на то, что каждое подпрыгивание требует дополнительной затраты энергии.

Для нахождения количественной зависимости сил, которые должны развивать мышцы, от частоты перестановки ног нужно, кроме частоты свободных колебаний ноги, знать еще и степень затухания этих колебаний. У человека амплитуда

колебаний ноги уменьшается примерно в два раза за один период. Сила мышц, движущая ногу вперед и назад, действует периодически, притом можно приближенно считать, что она меняется по синусоидальному закону. Этих данных достаточно, чтобы, пользуясь известными формулами теории колебаний, рассчитать силу, необходимую для любого темпа ходьбы.

Результаты расчета приведены на рисунке 1. Видно, что требуемая сила имеет минимум при частоте перестановки ног, равной резонансной, и резко возрастает при отклонении от этого значения. График наглядно показывает, насколько выгоднее ходить, переставляя ноги именно с резонансной частотой, и как катастрофически возрастает требуемая сила с увеличением темпа ходьбы. Например, при увеличении частоты колебаний ног вдвое по сравнению с резонансной частотой, т.е. при двукратном увеличении числа шагов в секунду, силовая нагрузка на мышцы ног при той же ширине шага возрастает в 10 раз! Уже при отклонении темпа ходьбы всего на 10% от резонансной частоты требуемая сила заметно возрастает. Отсюда ясно, почему люди идут, старательно придерживаясь своей резонансной частоты: так легче ходить. (Качественно приведенная зависимость сохраняется и в случае бега. Нужно только учитывать, что резонансная частота при беге из-за сгибания ног в коленях несколько выше, чем при ходьбе.)

Чем меньше приведенная длина ног при той же их длине (практически — чем тоньше оказываются ноги книзу и чем резче происходит уменьшение их толщины сверху вниз), тем больше резонансная частота колебаний ног и тем большую скорость при тех же усилиях может развивать их обладатель. С другой стороны, чем легче ноги, тем меньше усилий

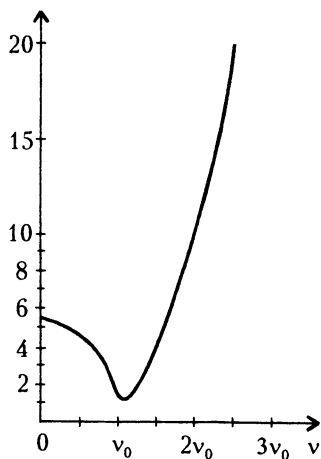


Рис. 1. График зависимости сил, приводящих в движение ноги, от темпа ходьбы. Здесь v — частота колебаний ног при ходьбе, т.е. число шагов одной ноги за секунду, v_0 — резонансная частота колебаний ноги. По вертикали отложена величина, показывающая, во сколько раз больше силы должны создавать мышцы по сравнению с ходьбой на резонансной частоте

требуется от мышц ног для движения с той же скоростью (поскольку сила пропорциональна массе ноги). Именно поэтому все быстроногие животные (антилопы, гепарды, скаковые лошади, борзые собаки) имеют сильно утончающиеся книзу и сравнительно легкие ноги. Правда, второе условие имеет меньшее значение по сравнению с первым, поскольку решающую роль в скорости бега играет резонансная частота колебаний ног. Например, слоны с их массивными, но сравнительно стройными ногами бегают довольно резво, а в Индии выражение «походка, как у слона» — высшая похвала.

Да что там слоны и антилопы! Попробуйте-ка догнать обыкновенного поросенка, который задался целью убежать от вас. Форма ноги поросенка (того, что в обиходе называют окороком) характеризуется очень резким уменьшением толщины ноги сверху вниз. Это нужно поросенку для того, чтобы резонансная частота ноги была побольше. Короткие ноги поросенка имеют настолько высокую резонансную частоту, что позволяют ему конкурировать в скорости бега с человеком, ноги которого гораздо длиннее.

Итак, решающую роль в скорости бега и ходьбы играет резонансная частота колебаний ног. Естественно, возникает вопрос: а нельзя ли ее увеличить? Сделать это было бы весьма заманчиво: увеличение резонансной частоты позволило бы людям ходить и бегать быстрее. В принципе возможны по крайней мере два способа решения проблемы. Первый способ — увеличить силу земного тяготения. Резонансная частота колебаний маятника пропорциональна корню квадратному из ускорения силы тяжести. Поэтому, например, удвоение силы земного тяготения повлекло бы за собой увеличение резонансной частоты колебаний ног в $\sqrt{2}$ раз. Правда, увеличить силу земного тяготения, мягко говоря, не так просто, а главное, пожалуй, и не стоит. Но для космонавтов, которые будут разгуливать по другим планетам, вопрос о зависимости резонансной частоты колебаний ног от ускорения силы тяжести носит далеко не академический характер: ведь на каждой планете свое ускорение силы тяжести.

Второй способ решения проблемы несравненно проще. Если запасаемой при каждом подъеме ноги потенциальной энергии не хватает для сообщения ноге требуемой скорости колебательного движения, то, связав ноги эластичным резиновым шнуром или присоединив к ногам каким-либо иным способом упругие элементы, стремящиеся возвратить в положение равновесия отклоненную от этого положения ногу, мы

тем самым увеличим потенциальную энергию, накапливаемую (за счет кинетической) при подъеме ноги. В результате уменьшится бесполезная добавочная нагрузка на мышцы, связанная с необходимостью преодолевать инерцию ног при ходьбе и беге. Прикрепленные к ногам упругие элементы будут играть роль резервуаров потенциальной энергии, пополняемых и опустошаемых дважды за каждый период колебаний, и, как во всех колебательных системах, они будут повышать резонансную частоту колебаний. Чем больше упругость этих элементов (например, чем толще связывающий ноги резиновый шнур), тем выше резонансная частота. Значит, чтобы ходить и бегать быстрее, нужно... связать ноги (разумеется, упругой связью).

В одной старой немецкой сказке повествуется о человеке, который мог бегать на редкость быстро. Чтобы ходить с нормальной скоростью, он привязывал к ногам гири. Скороход знал, что делал. Ведь тем самым он увеличивал приведенную длину ног и, следовательно, уменьшал их резонансную частоту колебаний, а вместе с ней — и скорость хода. А вот если бы вместо гирь он прикреплял к ногам упругие элементы, то бегал бы еще быстрее. Впрочем, можно подозревать, что секрет быстрого бега скорохода как раз и состоял в том, что его ноги имели гораздо более высокую резонансную частоту колебаний, чем у других людей.

Любой здоровый человек тоже может стать скороходом, повысив с помощью упругих элементов резонансную частоту колебаний ног. Представим себе такого человека, принимающего участие в легкоатлетических состязаниях. Перед стартом он связывает себе ноги и, чтобы как-то объяснить свое странное поведение, скромно поясняет судьям, что он-де бежит очень быстро и, чтобы не убежать слишком далеко от своих соперников, имеет обыкновение слегка связывать ноги. Заняв свое место на старте, наш спортсмен с некоторым усилием отводит одну ногу назад, тем самым «заряжая» ее потенциальной энергией. Как только в момент старта он отрывает эту ногу от земли, нога «выстреливается» вперед, как из рогатки. Кстати, при этом сокращается и время разгона. Конечно, бегун со связанными ногами придет к финишу первым. Вот только остановиться ему будет труднее, и он пробежит несколько лишних шагов: ведь связанные эластичной резинкой ноги «бегут сами». Кстати, уж если быть последовательным до конца, то с целью облегчения бега следует прикреплять упругие элементы и к рукам, которые,



Рис.2. Способ крепления резинового кольца к ногам: 1 – эластичное резиновое кольцо, 2 – жесткая повязка, 3 – точка крепления резинового кольца к повязке, 4 – бечевка

канат. Такой канат состоит из множества тонких эластичных резинок. Нарезав эти тонкие резинки на куски длиной по 75 см, мы изготовили из них несколько жгутов-колец толщиной примерно в один сантиметр. Техника изготовления была простой: из каждого куска, связав его концы, сделали кольцо, а из семи-восьми десятков таких колец составили одно толстое кольцо-жгут. Дабы жгут не рассыпался, его пришлось перевязать в нескольких местах (точно так же, как перевязывают прутья при изготовлении веника).

Если такое кольцо надеть на обе ноги (рис.2), то в положении, когда ноги составлены вместе, кольцо окажется нерастянутым, но будет плотно обхватывать ноги, не провисая. При ходьбе или беге оно будет периодически растягиваться. Возникающие при этом упругие силы будут стремиться вернуть ноги в положение равновесия, что и приведет к повышению резонансной частоты колебаний ног. Одно такое кольцо, **обхватывающее** ноги на уровне икр, **повышает** резонансную частоту в полтора раза.

Чтобы кольцо не перетягивало кровеносные сосуды, мы надевали его поверх жестких повязок, сделанных из картона или другого подходящего материала. Наконец, чтобы кольцо

как уже было отмечено, играют определенную роль при ходьбе и беге. Это можно сделать, например, привязав руки (повыше кисти) к поясу эластичными резинками. Общий вывод таков: если «связать» человека по рукам и ногам, он будет бегать быстрее.

Когда я изложил эти соображения своим товарищам по работе, они посмеялись, но согласились со мной, а самый решительный из них, заявив, что нечего тянуть резину, пошел к экспериментаторам и принес от них резиновый амортизационный

не съезжало с повязок (вверх по ноге), мы прикрепляли его к повязкам в двух точках, а другие две точки кольца соединяли бечевками с обувью. Бечевки препятствовали смещению точек кольца, к которым они были прикреплены, вверх по ноге, но не стесняли движения кольца в горизонтальной плоскости, поскольку угол между бечевкой и ногой всегда мал и бечевка остается практически параллельной ноге.

Резиновые кольца можно надевать на ноги как выше, так и ниже колен – в любом случае резонансная частота колебаний ног будет возрастать. Но поскольку кинетическая энергия колебательного движения нижней части ноги (считая от колена и ниже) гораздо больше (в пять-шесть раз) кинетической энергии колебаний верхней части ноги, наиболее целесообразно надевать резиновые кольца ниже колен.

Я пробовал ходить в описанной выше амуниции – скорость хода действительно возрастает. Ощущение такое, что кто-то помогает переставлять ноги, а когда нужно остановиться, ноги произвольно идут «сами» еще несколько лишних шагов.

Надетые на ноги резиновые кольца стремятся возвратить ноги в положение равновесия и при ходьбе или беге давят попеременно то на переднюю, то на заднюю сторону каждой ноги, осуществляя тем самым своего рода массаж мышц ног. Все же при длительной ходьбе или беге этот «массаж» сможет оказаться нежелательным. Поэтому при ходьбе и беге на большие расстояния представляется предпочтительным такой способ прикрепления упругих элементов к ногам, когда упругие элементы вообще не касаются мышц, около которых много кровеносных сосудов. Пожалуй, самый простой способ правильного крепления – привязать концы эластичного резинового шнура к ремешкам, плотно обхватывающим ступни ног. Чтобы шнур не болтался под ногами, когда он оказывается в нерастянутом состоянии, к его середине прикрепляется тонкий резиновый шнурок, который в слегка растянутом состоянии привязывается другим своим концом к поясу. При этом середина шнура оказывается в приподнятом положении, и шнур не мешает движению. Заметим, однако, что при большом натяжении упругий элемент будет стремиться поворачивать ступни ног вокруг вертикальной оси, и возникающие при этом силы придется компенсировать напряжением мышц ног. Иначе характер движения будет напоминать бег полицейских псов из Страны Дураков, которые, как свидетельствует А.Н.Толстой в «Золотом ключике», бежали «особым хитрым галопом, заноса задние ноги вбок».

ФИЗИКА НА ГОРНОЙ РЕКЕ

И. Ф. Гинзбург

Мне давно хотелось написать статью о том, как делается научная работа. Однако описание предмета моих собственных исследований требует слишком громоздкого математического аппарата, недоступного для школьников, и казалось, что моим желаниям не суждено сбыться. Но недавно передо мной возникли две задачи, связанные с моим увлечением — сплавом по горным рекам. Решив их, я понял, что это — прекрасные модели настоящей научной работы и что описание их решения может оказаться интересным. Я попробую восстановить ход решения, начиная с постановки вопроса и мотивов, вызвавших мой интерес, и до этапа, когда я задумался, как надо изложить результаты, чтобы они были понятны рядовому туристу, знакомому с физикой в объеме забытого курса средней школы.

Но сначала — как мы плаваем.

Сейчас почти нет туристов, плавающих на настоящих деревянных плотах. Многие туристы ходят на байдарках; грузоподъемность типичной двухместной байдарки не менее 300 кг. По горным рекам большинство туристов плавает на плотах или катамаранах с надувными элементами — автомобильными камерами (для плотов) или специально склеенными гондолами из прорезиненной ткани. Деревянный (иногда металлический) каркас массой до 150—200 кг изготавливается на месте. Обычно на одного человека приходится не менее 200 л объема воздуха в гондолах или камерах. Таким образом, запас плавучести (отношение максимальной подъемной силы к силе тяжести судна с гребцами) не бывает меньше 1,5. Это позволяет уверенно маневрировать среди валов и камней. Необходимой деталью личного снаряжения является спасательный жилет объемом 16—30 л.

Итак, первый вопрос (первая задача).

Средняя плотность воды после слива. Туристам хорошо известно, что после прохождения порога, сразу за сливом,

судно «проседает». Дело в том, что в пороге вода перемешивается с воздухом, и после слива (рис.1) пузырьки воздуха уменьшают среднюю плотность воды.

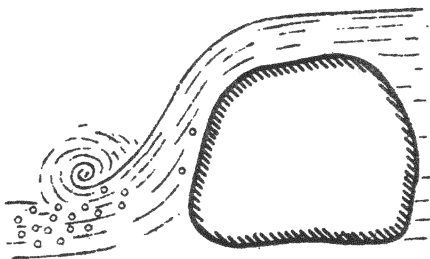


Рис. 1

Я знал это утверждение и неоднократно пересказывал его начинающим «сплавщикам».

Но однажды мне захо-

телось большей определенности в этом вопросе, и я попробовал оценить среднюю плотность воды после слива $\rho_{\text{ср}}$. Интуиция подсказывала, что в действительности роль пузырьков значительно меньше, чем об этом думают. А если так — достаточно оценить $\rho_{\text{ср}}$ снизу, т.е. получить наименьшее значение $\rho_{\text{ср}}$, совместимое с наблюдениями. Но какие наблюдения использовать?

Я вспомнил, что обычно после слива в воде действительно видны всплывающие пузырьки и в то же время при не очень большой глубине на дне вполне отчетливо (если нет мути) видны камни. Этого было достаточно, чтобы использовать одну идею, хорошо известную из физики газов и жидкостей.

Будем для простоты считать, что все пузырьки имеют один и тот же радиус r , а их среднее число в единице объема n . Тогда их суммарный объем в единице объема есть $4\pi r^3 n/3$, и, пренебрегая массой воздуха, среднюю плотность воды можно считать равной

$$\rho_{\text{ср}} = \rho_0 \left(1 - \frac{4}{3} \pi r^3 n \right),$$

где ρ_0 — плотность «чистой» воды, без пузырьков.

Теперь вернемся к камням, видимым на дне. Если на пути светового луча, идущего от дна, встречаются пузырьки, то сквозь них мы не можем увидеть камень четко — свет рассеивается на пузырьках. Оценим, при какой глубине l на пути светового луча почти наверняка встретится хоть один пузырек. Выделим на дне участок площадью S и рассмотрим столб воды над ним. Его объем lS , в нем находится $N = nlS$ пузырьков, и они «перекрывают» свету площадь, не большую $S_1 = N\pi r^2 = nlS\pi r^2$. Путь свету полностью «перекрыт», если

площадь S_1 совпадает с S (мы считаем для простоты, что смотрим почти вертикально вниз, и пренебрегаем случайными перекрытиями, учет которых несущественно меняет ответ). Поэтому наибольшая глубина l_{\max} четкого видения дна определяется из условия $S_1 = S$, откуда

$$l_{\max} = \frac{1}{n\pi r^2}.$$

Подставляя это соотношение в выражение для $\rho_{\text{ср}}$, получаем

$$\rho_{\text{ср}} = \rho_0 \left(1 - \frac{4}{3} \frac{r}{l_{\max}} \right).$$

Это – ответ. Подставим теперь цифры, чтобы понять, что стоит за этой формулой.

Встречаются два сорта сливов. После одних видны довольно крупные пузырьки с $r \lesssim 0,5$ см, а глубина видения дна $l_{\max} \gtrsim 0,5$ м. После других вода кажется молочно-белой от очень мелких пузырьков с $r \lesssim 0,1$ см, а глубина видения дна (точнее – предметов в воде) после таких сливов $l_{\max} \approx 5-10$ см. Подставляя эти цифры в формулу для $\rho_{\text{ср}}$, найдем, что в обоих случаях $\rho_{\text{ср}} \gtrsim 0,98\rho_0 = 0,98$ кг/л.

Из формулы для $\rho_{\text{ср}}$ видно, что чем меньше размер пузырьков, тем ближе $\rho_{\text{ср}}$ к ρ_0 . Поэтому с точки зрения поставленной задачи наше предположение об одинаковом большом радиусе всех пузырьков вполне разумно.

Итак, для современных туристских судов с большим запасом плавучести отличие $\rho_{\text{ср}}$ от ρ_0 несущественно, и «фольклорное» утверждение о проседании судна после прохождения порога несправедливо.

А теперь – второй вопрос (вторая задача).

Веревка на туристском судне. В одном из туристских альманахов я увидел статью «О пределах применимости веревки в водном туризме». По расчетам ее автора, безопасно зачалить среднее туристское судно с помощью веревки диаметром 10 мм можно лишь при скорости течения не более 1,5–2 м/с. А мы, используя более тонкую веревку диаметром 6–8 мм, уверенно чалимся на скорости 3–4 м/с. Мне стало ясно, что в статье в расчетах содержится ошибка. Казалось бы, Бог с ней. Пусть тот, кто поверит автору, берет более толстую веревку (запас карман не тянет). Но более толстая веревка – менее гибкая, и работать с ней не очень удобно, т.е. при ее использовании труднее обеспечить безопас-

ность; таскать такую веревку тяжело; из таких расчетов могут произтечь и ошибочные административные решения чиновников от туризма, а им нельзя давать дорогу; наконец, упомянутая статья имеет «очень научный» вид – автор считал на ЭВМ, и его результаты неискушенному читателю кажутся точными.

Мне стало обидно за науку, и я решил сделать правильные расчеты.

Первый вопрос – о точности расчетов. По-видимому, их можно делать довольно грубо, а значит – просто. Ведь если удастся использовать простые наглядные вычисления, обойдясь без второстепенных «уточняющих» деталей, то надежность результатов возрастет. Нестандартность изготовления веревки, небольшие неоднородности по длине (микронадрезы), наконец, изменение свойств веревки при хранении (старение) приводят к разбросу свойств веревки, который никак не меньше 15–20%. Ясно, что считать с большей точностью не имеет смысла. И мы увидим, что при такой точности расчет становится совсем простым.

Итак, нас интересует такая задача: необходимо остановить в потоке судно массой M с помощью веревки длиной L . При какой наибольшей скорости течения это возможно?

Но прежде чем переходить к основным расчетам, поговорим отдельно о веревке и о туристском судне.

Веревка. Довольно подробный рассказ о веревках, используемых в туризме и альпинизме, содержится в статье А.Б.Геллера «Нужна ли альпинисту физика?». Но нам осталось сказать еще немало.

Естественно, нас прежде всего интересует прочность веревки, т.е. максимальное натяжение, которое она выдерживает. Обозначим через L_0 и S_0 длину веревки и площадь ее сечения ($S_0 = \pi d^2/4$, где d – диаметр веревки). Хорошо известно, что при сравнительно небольших усилиях F удлинение веревки ΔL пропорционально F (закон Гука):

$$F = E \frac{S_0}{L_0} \Delta L = ES_0 \epsilon, \quad (1)$$

где E – модуль упругости (он одинаков для обычно употребляемых веревок одинакового плетения), $\epsilon = \Delta L/L_0$ – относительное удлинение веревки. Соответственно, потенциальная энергия деформации растянутой веревки равна

$$W = \frac{k(\Delta L)^2}{2} = \frac{1}{2} ES_0 L_0 \epsilon^2. \quad (2)$$

Эта энергия пропорциональна длине веревки L_0 , так что полезно ввести понятие энергии единицы длины веревки w :

$$w = \frac{W}{L_0} = \frac{ES_0\varepsilon^2}{2} = \frac{F\varepsilon}{2} = \frac{F^2}{2S_0E}. \quad (3)$$

Отметим, что при заданной величине относительного удлинения ε величины F и w пропорциональны S_0 и не зависят от L_0 .

Таким образом, при малых усилиях зависимость ε от F линейная:

$$\varepsilon = \frac{F}{ES_0}. \quad (1')$$

При больших усилиях эта зависимость нарушается – с ростом силы удлинение начинает расти быстрее, чем по закону (1'). Когда же сила натяжения превышает некоторое значение F_{\max} , веревка начинает рваться. Все это отражено на рисунке

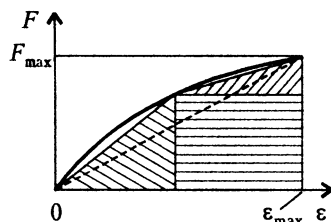


Рис. 2

2, где приведена так называемая нагрузочная характеристика – кривая зависимости силы натяжения веревки от ее относительного удлинения. Величины F_{\max} и ε_{\max} , так же, как и точный вид нагрузочной характеристики, можно найти в специальных справочниках. Зная их, нам нужно определить w_{\max} – макси-

мальную энергию деформации, приходящуюся на единицу длины веревки (она описывается площадью под кривой на рисунке 2). Обычно это делают численно (нередко на ЭВМ). Однако попробуем упростить расчет: заменим нагрузочную характеристику линейным графиком закона Гука (см. (1)), приняв в нем E равным «среднему» значению, которое определим как

$$E_{\text{ср}} = \frac{F_{\max}}{S_0\varepsilon_{\max}}.$$

При этом энергия единицы длины веревки \bar{w} будет определяться площадью под пунктирной прямой на рисунке 2, которая отображает зависимость

$$F = E_{\text{ср}}S_0\varepsilon_{\max}. \quad (4)$$

Из рисунка видно, что

$$\bar{w} = \frac{1}{2} E_{\text{ср}} S_0 \epsilon_{\text{max}}^2 = \frac{F_{\text{max}} \epsilon_{\text{max}}}{2} \quad (5)$$

меньше истинного значения w_{max} . Нам удобно пользоваться заниженным значением – ведь нас интересует безопасность. Но хорошо бы представлять, на сколько мы ошибаемся, т.е. на сколько истинное значение w_{max} больше получающегося из (5). Для этого рассмотрим упрощенную нагрузочную характеристику – ломаную на рисунке 2, которая значительно ближе к истинной кривой, чем пунктирная прямая (4). При удлинении $\epsilon < \epsilon_{\text{max}}/2$ имеет место закон Гука (1) с модулем упругости E , а при $\epsilon > \epsilon_{\text{max}}/2$ выполняется закон Гука с модулем упругости $E/2$. Тогда

$$E_{\text{ср}} = \frac{3}{4} E, \text{ т.е. } E = \frac{4}{3} E_{\text{ср}}.$$

В этом случае энергия единицы длины веревки, растянутой до удлинения ϵ_{max} , которая вычисляется как площадь под ломаной, равна

$$\begin{aligned} \bar{\bar{w}} &= \frac{1}{2} E S_0 \left(\frac{\epsilon_{\text{max}}}{2} \right)^2 + \frac{1}{2} \frac{E}{2} S_0 \left(\frac{\epsilon_{\text{max}}}{2} \right)^2 + \\ &+ E S_0 \frac{\epsilon_{\text{max}}}{2} \frac{\epsilon_{\text{max}}}{2} = \frac{7}{16} E S_0 \epsilon_{\text{max}}^2 = \frac{7}{12} E_{\text{ср}} S_0 \epsilon_{\text{max}}^2. \end{aligned}$$

Сравнивая с выражением (5), мы видим, что

$$\bar{\bar{w}} = \frac{7}{6} \bar{w} \approx 1,17 \bar{w},$$

т.е. в пределах нашей точности различие несущественно.

Для хорошей альпинистской веревки $\epsilon_{\text{max}} = 0,25 - 0,3$. К сожалению, наша веревка дает меньшие значения. Я принял $\epsilon_{\text{max}} = 0,15$. Приведем также известное из опыта значение F_{max} и величину w_{max} , вычисленную по формуле (5) (все – для веревки диаметром 10 мм):

$$F_{\text{max}} = 12000 \text{ Н} (\pm 10 - 15\%), \quad (6)$$

$$w_{\text{max}} = 900 \text{ Дж/м} (\pm 20 - 25\%).$$

Формулы (1) и (2) позволяют пересчитать эти цифры для других веревок. Для туристов из этих вычислений можно

сообщить только минимум, зато надо дать таблицу значений F_{\max} и w_{\max} для основных используемых веревок.

Но тут же передо мной встал следующий вопрос: а если кто-то использует другую веревку? Или захочет более точных цифр? Надо придумать простые способы измерения F_{\max} и w_{\max} .

С измерением w_{\max} все просто. Возьмите короткий кусок веревки длиной L . Жестко закрепите один конец веревки, привяжите к другому концу груз, поднимите его вертикально вверх (насколько можно), а затем предоставьте грузу свободно падать. Повторяйте опыт, понемногу увеличивая массу груза. Если веревка порвалась при массе груза m , то $w_{\max} = 2mg(1 + a/L)$, где a — расстояние от точки закрепления веревки на грузе до его центра тяжести. (До разрыва центр тяжести опустится на $2(L + a)$, т.е. потенциальная энергия уменьшится на $2mg(L + a)$. Эта энергия перейдет в энергию растянутой веревки $w_{\max}L$. Приравнявая энергии, получим приведенный результат. Здесь не учтена добавка к измерению потенциальной энергии, связанная с удлинением веревки, а именно $mg\Delta L = mgL\varepsilon_{\max}$. За счет этого полученное значение w_{\max} на 7—10% меньше истинного, что полезно для наших целей.)

К сожалению, столь же простого способа измерения F_{\max} мне придумать не удалось. Вот мой рецепт. Жестко закрепите один конец короткого куска веревки, а нагрузку на второй плавно увеличивайте с помощью автомобиля или лебедки. Если веревка порвется при усилии F_p , то с учетом необходимости неоднократного использования ее F_{\max} должно быть порядка $0,9F_p$. Если у вас есть специальный динамометр, рассчитанный на усилия в тысячи ньютонов, вы можете с его помощью определить F_p . Если такого динамометра нет, воспользуйтесь лебедкой, к рукоятке которой подвешен груз. Увеличивайте груз, пока при некотором значении m_p не произойдет разрыв. Тогда $F_p = m_pgH/r$, где H — расстояние от оси лебедки до груза, а r — радиус барабана лебедки.

На этом оставим пока веревку и займемся судном.

Судно. При движении в воде большую роль играет сила сопротивления, действующая со стороны воды на судно. Ее можно записать в виде

$$F_c = \alpha \rho S u^2,$$

где u – скорость воды относительно судна, ρ – плотность воды, S – площадь сечения погруженной в воду части судна (сечение перпендикулярно потоку), α – численный коэффициент, зависящий от обводов судна ($\alpha \lesssim 0,5$). В действительности этот коэффициент зависит и от скорости, но эта зависимость существенна только на гладкой воде, и мы ее учитывать не будем.

Я сделал оценки, используя эту формулу. Но насколько они надежны? Ведь и коэффициент α , и площадь S известны очень плохо. И тогда я сообразил, что эти два параметра можно объединить в один, который я назвал эффективной длиной судна. Согласно закону Архимеда, масса судна $M = \rho V$, где V – объем погруженной в воду части судна, приблизительно равный произведению S на длину судна по ватерлинии l . Эффективной длиной судна $l_{\text{эф}}$ я назвал величину l/α . Тогда

$$F_c = \frac{Mu^2}{l_{\text{эф}}}. \quad (7)$$

Сначала я оценил $l_{\text{эф}}$ совсем грубо. Поскольку $\alpha \lesssim 0,5$ и длина судна l обычно не меньше 4 м, то $l_{\text{эф}} \gtrsim 8$ м. Но потом я понял, что $l_{\text{эф}}$ можно измерить.

Разгоним судно на стоячей воде до какой-то скорости v_0 , а потом отпустим. Дальнейшее его движение под действием силы сопротивления описывается вторым законом Ньютона

$$Ma = -\frac{Mv^2}{l_{\text{эф}}}.$$

При этом изменение кинетической энергии судна на пути Δx равно работе силы сопротивления на этом пути, т.е.

$$\Delta \left(\frac{Mv^2}{2} \right) = - \left(\frac{Mv^2}{l_{\text{эф}}} \right) \Delta x,$$

или

$$\Delta \left(\frac{v^2}{2} \right) = - \frac{v^2}{l_{\text{эф}}} \Delta x.$$

Будем теперь искать скорость в зависимости не от времени, а от пройденного пути x . Из уравнения для энергии видно, что отношение v/v_0 зависит только от $x/l_{\text{эф}}$, т.е. $v/v_0 = f(x/l_{\text{эф}})$.

Аккуратное решение дает

$$\frac{v}{v_0} = e^{-x/l_{\text{эф}}} \approx 2,7^{-x/l_{\text{эф}}}$$

(Для тех, кто знаком с дифференцированием, заметим, что это соотношение есть решение уравнения баланса энергии, которое можно переписать в виде $dv/v = -dx/l_{\text{эф}}$.)

Таким образом, вот способ измерения $l_{\text{эф}}$: путь, пройденный судном к тому времени, когда его скорость уменьшится в 2,5–3 раза (точнее в $e \approx 2,7$ раз), примерно равен $l_{\text{эф}}$. Из наблюдений мы хорошо знаем, что такой путь практически для всех судов больше чем 10 м, т.е. $l_{\text{эф}} \gtrsim 10$ м (как я и считал раньше).

Зачаливание судна. Теперь можно перейти к решению основной задачи: при какой наибольшей скорости течения v_{max} судно массой M можно зачалить (остановить) с помощью веревки длиной L ?

Чтобы разобраться в ситуации, рассмотрим сначала простейший случай – приближение, когда сопротивлением воды можно пренебречь. В этом случае решение таково. Начальная кинетическая энергия судна $Mv^2/2$ переходит в потенциальную энергию натянутой веревки W . Максимальное значение этой энергии $W_{\text{max}} = w_{\text{max}}L$ найдено выше. Таким образом, максимальная скорость, при которой судно можно остановить на быстройтоке (без учета давления потока), определяется из уравнения

$$\frac{1}{2} M v_{\text{max}}^2 = w_{\text{max}} L$$

и составляет

$$v_{\text{max}} = \sqrt{\frac{2w_{\text{max}}L}{M}}. \quad (8)$$

При заданном значении v_{max} минимальная длина веревки должна быть

$$L_{\text{min}} = \frac{1}{2} \frac{M v_{\text{max}}^2}{w_{\text{max}}}. \quad (9)$$

Далее мы используем простое приближение (4). При этом энергия растянутой веревки составляет $W = F^2 L / (2S_0 E_{\text{ср}})$

(см. формулы (2), (3)). Приравнивая это выражение к кинетической энергии судна, получаем, что при скорости течения $v < v_{\max}$ максимальное натяжение веревки есть

$$F_v = F_{\max} \frac{v}{v_{\max}}. \quad (10)$$

Ну, а теперь выясним, какова роль силы сопротивления воды. Эта сила при скорости потока v составляет $F_c = Mv^2/l_{\text{эф}}$. Найдем отношение этой добавки к натяжению веревки F_v . С учетом соотношений (3), (8) и (10) получаем

$$\begin{aligned} \frac{F_c}{F_v} &= \frac{Mv^2}{l_{\text{эф}}F_v} = \frac{Mv^2}{l_{\text{эф}}F_{\max}(v/v_{\max})} \frac{Mv_{\max}^2/2}{Mv_{\max}^2/2} = \\ &= \frac{v^2}{l_{\text{эф}}(v/v_{\max})} \frac{2LF_{\max}\varepsilon_{\text{эф}}/2}{v_{\max}^2F_{\max}} = \frac{L\varepsilon_{\max}}{l_{\text{эф}}} \frac{v}{v_{\max}}. \end{aligned}$$

Таким образом, роль сопротивления воды описывается параметром

$$\beta = \frac{L\varepsilon_{\max}}{l_{\text{эф}}}.$$

Обычно при таком зачаливании используется веревка не длиннее 20 м. При $\varepsilon_{\max} = 0,15$ это дает полное удлинение веревки 3 м, тогда при $l_{\text{эф}} \approx 10$ м $\beta \leq 1/3$.

Итак, при скорости течения меньше v_{\max} величина F_c не превосходит $F_{\max}/3$. Поэтому добавка, обусловленная давлением потока, играет небольшую роль, и предельная скорость близка к v_{\max} .

Теперь надо дать численные оценки для туристов. Пусть судно необходимо остановить на струе при скорости течения $4 \text{ м/с} = 14 \text{ км/ч}$ (это большая скорость!). Необходимые параметры для веревки мы определим из формул (9), (3) и (6). Чтобы учесть разброс параметров и давление потока, мы подставим в формулу (9) несколько большее значение максимальной скорости: $v_{\max} = 5 \text{ м/с}$. Результаты расчетов для судов разных масс приведены в таблице (см. с. 176), где указана (округленно) минимальная длина чальной веревки при различных типовых значениях ее диаметра.

Это, собственно, и есть главный результат. А в заключение рассмотрим еще один вариант зачаливания.

Масса судна	Диаметр веревки и ее минимальная длина
200 кг	6 мм, 10 м
400 кг	6 мм, 20 м или 8 мм, 10 м
800 кг	8 мм, 20 м или 10 мм, 10 м
1200 кг	10 мм, 20 м

Поперечная веревка. Иногда для остановки судна поперек реки навешивают веревку. Конец чальной веревки с идущего судна с помощью крюка цепляется за эту поперечную веревку. Ее навешивают под углом к течению, чтобы судно соскользнуло вдоль нее к берегу, или предусматривают ее обрыв с одного берега так, чтобы судно «маятником» пришло к другому берегу.

Если эти варианты реализовать нельзя, веревку навешивают поперек течения. При натяжении чальной веревки натягивается и эта поперечная веревка. Ее натяжение возьмет на себя часть кинетической энергии судна. Но не приведет ли это к разрыву поперечной веревки? Действительно, если натяжение чальной веревки судна есть $F_{\text{ч}}$, то натяжение поперечной веревки $F_{\text{п}} = F_{\text{ч}} / (2 \sin \alpha)$, где α – угол между направлением

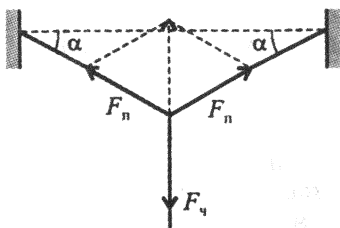


Рис. 3

растянутой веревки и ее первоначальным направлением (рис.3). Если угол α меньше 30° , то $F_{\text{п}}$ больше $F_{\text{ч}}$, т.е. очень туго натянутая веревка может порваться.

Разберемся в этом поподробнее. При $\alpha = 30^\circ$ длина поперечной веревки должна быть в $2/\sqrt{3} \approx 1,15$ раза больше

расстояния между точками закрепления. Но предельное относительное удлинение $\epsilon_{\text{max}} = 0,15$, т.е., если первоначально веревка не была натянута, ее длина в растянутом состоянии составит почти точно нужную величину, а провис под собственной тяжестью создаст необходимый резерв длины (он нужен, например, если судно идет не по центру веревки).

Некоторые выводы. При обсуждении обоих поставленных вопросов мы пользовались по существу одной и той же схемой их решения

Первый этап – сама постановка (не очень четкая) вопроса. Напомним: какова средняя плотность воды после порога; какой веревкой можно пользоваться?

Второй этап – осмысление ситуации и постановка задачи (с частичным угадыванием ответа). А именно: показать, что изменение средней плотности воды после порога ничтожно мало; определить, какую веревку надо использовать при принудительном зачаливании. Сюда же относится предварительная оценка погрешности последующего решения.

Третий этап – собирание и организация сведений; оценка базовых параметров. В наших примерах хватило уже имевшихся у меня знаний. Вообще же на этом этапе могут потребоваться дополнительные, вспомогательные эксперименты. Очень важным шагом на этом этапе было формальное решение с использованием избытка данных (например, S и α в формуле для силы сопротивления). Это позволило, представив ответ, избавиться от определения большого числа ненужных промежуточных величин, заменяемых одной легко оцениваемой величиной (в нашем случае $l_{эф}$).

Четвертый этап – решение задачи, т.е. получение формул, а затем и чисел. Без чисел, без знания соотношения параметров невозможно понять, правильное ли решение получено или реальная ситуация определяется совсем другими причинами. Важным является и вопрос о том, как представить полученные результаты, ибо решение реальной задачи обычно адресуется какому-то конкретному «потребителю».

НУЖНА ЛИ АЛЬПИНИСТУ ФИЗИКА?

А.Б.Геллер

Люди, покоряющие горные вершины, обычно романтики. А сами горы с их белыми вершинами настолько величественны, что любые слова о физических объяснениях тех или иных явлений, возникающих в горах, о расчетах и обоснованиях каких-то конкретных ситуаций иногда кажутся смешными. Чем-то вроде формулы для стихов или алгоритма для создания живописного полотна. И все-таки мы попытаемся решить одну такую задачу и на ее примере показать, как физика помогает альпинистам.

Итак, мы собираемся в горы. Разумеется, мы должны хорошо подобрать и подогнать необходимое снаряжение, запастись скальными и ледовыми крючьями, хорошими веревками.

Альпинистская веревка, как и большинство других предметов снаряжения в современном спорте, — сложное инженерное «сооружение». Мы расскажем в этой статье, почему альпинистам нужны специальные веревки и как они «работают» в горах. Но сначала обсудим типичную и, увы, нередко возникающую при восхождениях или на тренировках ситуацию.

На рисунке 1 схематически показано движение связки-двойки. Первый альпинист, назовем его Алексеем, поднялся по скале на высоту $L = 5$ м выше второго, которого назовем Виктором. Алексей забил в точке A крюк, который является точкой страховки, а затем поднялся еще на $l_0 = 2,5$ м. Внезапно Алексей сорвался. Виктор же очень прочно закрепил свой конец веревки, и Алексей повис на ней. Вопрос, который нас интересует, та-

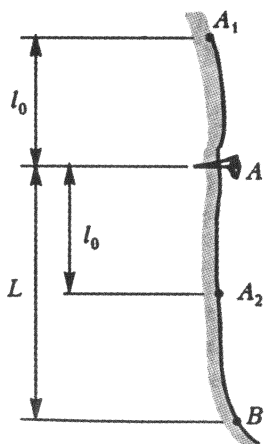


Рис. 1

кой: какими свойствами должна обладать веревка, чтобы Алексей остался невредим?

Конечно, первым делом (пока мы еще дома) стоит заглянуть в какой-нибудь справочник, где приводятся характеристики спортивного снаряжения. Там мы узнаем, что для веревки диаметром 10 мм прочность, т.е. сила, которую нужно приложить, чтобы порвать ее, равна $F = 1,5 \cdot 10^4$ Н. Известно также, что максимальное усилие, которое выдерживает человеческое тело, составляет $F_{\max} = 5 \cdot 10^3$ Н. Нам понадобится еще масса альпиниста с рюкзаком M . Будем считать, что $M = 100$ кг, это вполне разумная оценка.

Казалось бы, для безопасности Алексея достаточно, чтобы веревка была прочной. Тогда при падении он останется цел, так как веревка не порвется. Но вспомним, что человек, упавший с высоты 10 м (высота третьего этажа), чаще всего разбивается, если падает на твердую землю. Если же он упадет на стог сена или в глубокий сугроб, то скорее всего отделается просто испугом. Срыв альпиниста, повисшего на нерастяжимой веревке, тоже приведет к удару в конце его полета, даже если он и не долетит до основания скалы. Поэтому напрашивается вывод: скорость, которую приобрел человек при падении, нужно погасить плавно. Вот мы и попробуем понять, как это сделать.

Можно считать, что при срыве скорость Алексея в точке A_1 равна нулю и его падение почти до точки A_2 есть просто свободное падение (веревка не натянута!). В точке A_2 его скорость равна $v_0 = gt$, где t — время падения. За это время Алексей пролетит расстояние $gt^2/2 = 2l_0$, так что $t = \sqrt{4l_0/g}$ и $v_0 = g\sqrt{4l_0/g} = 2\sqrt{gl_0}$.

Скорость v_0 гасится более или менее плавно за счет растяжения веревки. В тот момент, когда веревка натянулась и начала растягиваться, скорость Алексея $v = v_0$, а когда удлинение веревки стало максимальным и падение прекратилось, $v = v_k = 0$. Если время, за которое будет «погашена» скорость, обозначить Δt , то средняя сила, действующая на альпиниста в течение этого времени, будет

$$F_{\text{ср}} = \frac{M(v_0 - v_k)}{\Delta t}.$$

Величина

$$\frac{v_0 - v_k}{\Delta t} = \frac{v_0}{\Delta t} = a$$

имеет смысл среднего ускорения, с которым происходит «торможение». Очевидно, что чем больше начальная скорость и чем меньше время торможения, тем больше сила $F_{\text{ср}}$. Но тогда из того, что мы сказали, следует, что веревка, связывающая Алексея и Виктора, должна быть такой, чтобы время Δt до остановки Алексея было достаточно большим. Что значит – достаточно большое время торможения? А это значит, что во всяком случае средняя сила $F_{\text{ср}}$, действующая на Алексея со стороны веревки, должна быть меньше, чем то максимальное усилие $F_{\text{max}} = 5 \cdot 10^3$ Н, которое может выдержать человеческое тело. Итак, должно выполняться неравенство

$$F_{\text{max}} \geq F_{\text{ср}} = \frac{Mv_0}{\Delta t},$$

откуда

$$\Delta t \geq \frac{Mv_0}{F_{\text{max}}}.$$

(Заметим, кстати, что $a = \frac{v_0}{\Delta t} \leq \frac{F_{\text{max}}}{M} = \frac{5 \cdot 10^3 \text{ Н}}{10^2 \text{ кг}} = 50 \text{ м/с}^2$,

а это значит, что a может быть и больше $g = 10 \text{ м/с}^2$.) Для нашего конкретного примера легко получить, что $\Delta t \geq 0,2 \text{ с}$.

Что же может обеспечить необходимое время Δt , а следовательно, и безопасность альпинистов? Только способность веревки хорошо растягиваться. Для упрощения расчетов будем считать, что такое торможение при растяжении веревки есть процесс равнозамедленного движения. Тогда путь, пройденный Алексеем до его задержания (остановки), равен удлинению веревки: $\Delta l = a(\Delta t)^2/2$. Подставив сюда $a = v_0/\Delta t$, получим $\Delta t = 2\Delta l/v_0$. Комбинируя же эту последнюю формулу с написанным выше неравенством для Δt , придем к неравенству

$$\Delta l \geq \frac{Mv_0^2}{2F_{\text{max}}} = \frac{M \cdot 4gl_0}{2F_{\text{max}}} = \frac{2Mgl_0}{F_{\text{max}}}.$$

Такова оценка для расстояния, на котором скорость должна быть погашена, чтобы не причинить вреда альпинисту. При $l_0 = 2,5 \text{ м}$ и $M = 100 \text{ кг}$ $\Delta l \geq 1 \text{ м}$.

Разделим теперь обе части неравенства для Δl на длину веревки до растяжения, равную $L + l_0$. Отношение $\varepsilon = \Delta l/(L + l_0)$ называется относительной деформацией или

просто деформацией. Если в правую часть неравенства

$$\varepsilon \geq \frac{2Mgl_0}{(L + l_0)F_{\max}}$$

подставить числовые значения для нашей конкретной ситуации, получится, что $\varepsilon \geq 0,13$. Можно утверждать теперь, что Алексей при срыве не пострадает, если деформация альпинистской веревки больше 13%. На самом деле хорошая современная альпинистская веревка имеет деформацию при нагрузках порядка 10^4 Н около 40—45%.

Казалось бы, все теперь ясно. Мы возьмем с собой в горы веревку с необходимыми для безопасности характеристиками, а Виктор может, не задумываясь, жестко закреплять ее.

Но теперь представьте себя в роли альпиниста, которому необходимо подняться по такой веревке. Это часто приходится делать в альпинистской практике. Идущий первым прокладывает путь по сложному рельефу, используя весь арсенал альпинистской техники. Затем он закрепляет веревку, а все остальные участники восхождения поднимаются уже по ней. Естественно, что веревка под нагрузкой, которая создается альпинистом, растягивается. Чем дальше альпинист находится от точки закрепления, тем больше будет абсолютное удлинение веревки. Ощущения у лезущего по такой веревке будут примерно такие же, как у альпиниста, «подвешенного на резиночке». Это, поверьте, не очень приятно, особенно когда вокруг острые камни! Хорошо бы иметь веревку, у которой зависимость деформации от нагрузки изображалась кривой *a* на рисунке 2. Тогда при малых нагрузках веревка почти не растягивалась бы. Это позволяло бы подниматься по закрепленной веревке, как по канату в спортивном зале. При больших нагрузках, наоборот, нам выгоден быстрый рост деформации. В самом деле, если нагрузки, при которых ε

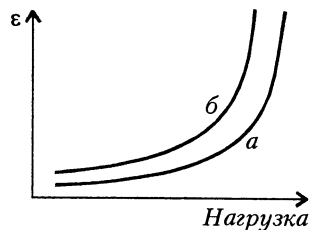


Рис. 2

быстро растет, примерно те же, что и нагрузки после срыва альпиниста, то веревка работает как резина, «принимая рывок на себя».

В природе не существует материалов, которые обладали бы такими характеристиками. Однако сочетания различных материалов позволяют сконструировать веревку, которая

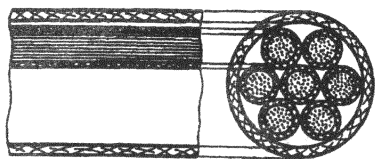


Рис. 3

обеспечит альпинистам и необходимую безопасность, и удобства при подъеме. Кривая 6 на рисунке 2 – схематическая характеристика реальной веревки. Разрез такой альпинистской веревки изобра-

жен на рисунке 3. Наружная оплетка ее изготовлена специальным образом. Достаточно жесткие и прочные капроновые нити (иногда их заменяют лавсановыми) располагаются под углом к оси веревки. Под нагрузкой эти нити меняют свое направление и постепенно располагаются почти параллельно оси. Внутренняя часть веревки представляет собой сочетание (пучок) нескольких таких же оплеток, но меньшего диаметра. Нити внутри каждой такой оплетки очень прочные, они почти не изменяют свою длину вплоть до разрушения. Количество нитей подбирают так, чтобы они выдерживали нагрузку примерно $3 \cdot 10^3$ Н. При срыве альпиниста, как только нагрузка на веревку превысит эту величину, внутренние жесткие и прочные нити рвутся, а вся веревка в целом растягивается. Разрываясь, жесткие нити оказываются первыми «гасителями» кинетической энергии падающего тела. Существенная часть этой энергии переходит в работу, затраченную на разрыв нитей. Вербкой, которой пользуются после срыва, вполне безопасно можно страховать напарника, а вот подниматься по ней будет, как мы теперь уже понимаем, неудобно.

Главный вывод, к которому мы пришли, таков: идеальная альпинистская веревка должна быть не только очень прочной, но и хорошо деформироваться. К сожалению, пока промышленность выпускает мало такой веревки. И многим спортсменам-альпинистам приходится пользоваться обычной капроновой веревкой (лет тридцать-сорок назад, когда таких веревок тоже было мало, альпинисты пользовались прочными сизалевыми канатами). Прочность у капроновой веревки вполне достаточная, а вот деформация маловата. Она не превышает 15–20% при нагрузках порядка 10^4 Н. Что же это получается? Неужели альпинисты сознательно подвергают свою жизнь опасности, используя непригодное снаряжение?

Ответить на вопрос нам опять помогут опыт и физика. Но сначала скажем еще несколько слов о превращениях энергии при подъеме и падении Алексея. Когда Алексей поднимался выше страхующего его Виктора, он с каждым шагом увеличи-

вал свою потенциальную энергию относительно точки страховки (или относительно Виктора). После срыва эта потенциальная энергия переходит в кинетическую энергию свободно падающего альпиниста. После падения на всю длину свободной веревки Алексей начинает ее растягивать. Его кинетическая энергия переходит теперь уже в энергию деформации веревки. Ситуация могла бы быть похожей на движение альпиниста на растягивающейся пружине или резинке, если бы веревка была идеально упругой. Будь это так, альпинист после остановки при падении начал бы двигаться снова вверх. Однако такой колебательный процесс на самом деле не реализуется. Под нагрузкой отдельные волокна, из которых сделана веревка, взаимодействуют между собой – трутся друг о друга. Кроме того, при растяжении волокон тоже выделяется тепло. Колебания, о которых мы могли бы подумать, реально затухают, не успев начаться. Кинетическая энергия упавшего Алексея переходит в тепло, выделяющееся в веревке. Ну, а если упругие свойства веревки таковы, что она не может обеспечить плавное замедление упавшего спортсмена? Тогда такое торможение может осуществить партнер по связке, страхующий своего товарища. Для этого Виктору достаточно «протравить», выпустить под натяжением какую-то часть веревки. Надежность правильной страховки, оказывается, не в том, чтобы как можно прочнее, жестче закрепить веревку, если товарищ сорвался, а в том, чтобы успеть правильно и вовремя регулировать ее натяжение. Как мы уже поняли, в случае хорошей альпинистской веревки происходит переход кинетической энергии падения в тепловую и упругую энергию веревки. Для «плохой» веревки (прочной, но нерастяжимой) та же кинетическая энергия в значительной степени переходит в тепло при трении веревки о руки страхующего. Тепло это может быть довольно большим, поэтому одно из основных правил в альпинизме – «Страхуй в рукавицах!».

Достаточно простые рассуждения показывают, что это правило придумано совсем не зря. Так как мы хотим получить лишь оценку выделяющегося количества теплоты, примем условно, что вся энергия падения альпиниста переходит, за счет трения веревки о руки страхующего, в тепло. Кинетическая энергия падающего альпиниста к моменту, когда начинает «работать» веревка или страхующий его товарищ, равна

$$E_k = \frac{Mv_0^2}{2} = 2Mgl_0.$$

Подставляя $l_0 = 2,5$ м, $M = 100$ кг, $g = 10$ м/с², получим $E_k = 5 \cdot 10^3$ Дж. Вот эта-то энергия и должна перейти в тепло. Много это или мало? Давайте посмотрим, какое количество воды можно было бы вскипятить, подведя к нему количество теплоты $Q = 5 \cdot 10^3$ Дж. Тепло, необходимое для нагрева воды от $t_1 = 20$ °С до $t_2 = 100$ °С, равно $cm(t_2 - t_1)$. Удельная теплоемкость воды $c = 4,2 \cdot 10^3$ Дж/(кг · К), поэтому $m = Q/(c(t_2 - t_1)) \approx 15$ г. Не так уж и мало!

Конечно, мы сделали сейчас довольно грубую оценку. Реально же нужно иметь в виду, что нагреваются не только руки страхующего, но и сама веревка. Но важнее другое. Человеческое тело сравнительно плохо проводит тепло (физик сказал бы: обладает плохой теплопроводностью). Поэтому при страховке голыми руками нагревается и «обжигается» тонкий слой ткани рук. У слова «обжигается» здесь можно было бы кавычки и опустить. А вот чтобы не обжечь руки на самом деле, нужно страховать в рукавицах – теплопроводность материала, из которого сшиты рукавицы, еще меньше, чем теплопроводность тела альпиниста.

Таковы физические основы страховки в горах. Знать их полезно, конечно, не только альпинистам. И теперь вы сами уже наверняка однозначно ответите на вопрос, который стоит в заголовке этой статьи. Удачных вам восхождений!

РАЗМЫШЛЕНИЯ ФИЗИКА-АЛЬПИНИСТА

Дж. Вайли

Немного есть на свете вещей, которые я люблю больше, чем поиск общей физической основы у совсем несхожих внешне элементов природы. И неважно, что я не оказываюсь при этом первооткрывателем, а в большинстве случаев еще и обнаруживаю, что отстал лет на 200—300. Удовлетворение возникает оттого, что я делаю это сам и увязываю это с моим собственным опытом.

В течение некоторого времени я изучал элементы скалолазания и альпинизма. Ныне вся эта область стала ареной приложения настоящей науки — от атмосферной физики до динамики лавин, от динамики тела спортсменки во время подъема до технологии производства современных альпинистских веревок.

Во время моего недавнего путешествия в горы в некоторый момент я обнаружил, что стою на очень крутом каменистом склоне и обзираю ледник в 600 метрах ниже. И тогда, будучи физиком, я получил повод поразмышлять о трении, которое обеспечивало мое благополучие.

Трение. В последнее время резко возрос интерес к спортивному скалолазанию. Как уже случалось с другими видами спорта, становившимися популярными, этот рост сопровождался технологической революцией в необходимом (хотя для многих видов спорта лучше сказать «желательном») оборудовании. Можно утверждать вполне аргументированно, что наибольшим изменением в скалолазании было введение в практику высокофрикционных скалолазных ботинок. В отличие от тяжелых туристских ботинок с рантом, которые использовались многие годы, эти ботинки — очень легкие и имеют гладкую резиновую подметку. Воздействие, которое эти ботинки оказали на спорт, можно проиллюстри-

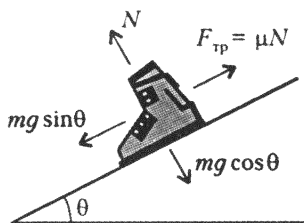


Рис. 1. Альпинистский ботинок на наклонной плоскости

ровать традиционной задачей о бруске на наклонной плоскости.

Рассмотрим скалолазный ботинок нового поколения на поверхности скалы, наклоненной под углом θ к горизонту (рис.1). Стандартный подход позволяет вычислить максимальный угол, при котором ботинок не будет скользить по плоскости. Приравнивая составляющие сил вдоль наклонной плос-

кости, мы находим

$$mg \sin \theta = \mu N = \mu mg \cos \theta,$$

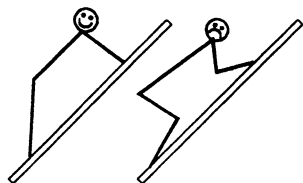
где μ – коэффициент трения между подошвой ботинка и поверхностью наклонной плоскости, откуда следует

$$\operatorname{tg} \theta = \mu.$$

Это не представляется таким уж потрясающим результатом, пока мы не обнаруживаем, что для этой новой резины на гладком граните

$$\mu = 1,2, \text{ или } \theta = 50^\circ.$$

Только новичок чувствует некоторый трепет, шагая вверх (или вниз) по склону с углом, близким 50° , для опытной скалолазки¹ это обычное дело.



Правильно Неправильно

Рис. 2. Два возможных положения тела альпинистки на крутом склоне

Мы можем теперь понять физику, скрывающуюся за манерой поведения любой хорошей скалолазки – она держит корпус отклоненным от скалы (рис.2). Естественное желание, с другой стороны, состоит в том, чтобы наклониться поближе к поверхности скалы и вжаться в стену. Оттал-

¹ Чтобы не навлечь на себя упрёки в мужском шовинизме со стороны поборниц женского равноправия, автор далее всюду говорит о своем действующем лице «она». Соответственно в переводе неизбежно появляются «альпинистка» и «скалолазка». Ассоциации с прелестной песней Высоцкого не возбраняются, но в оригинале они маловероятны. (Прим. перев.)

квиваясь от скалы, наша опытная скалолазка переносит большую часть своего веса, если не весь вес, на ноги – на свои дорогие резиновые скалолазные ботинки. Увеличение силы нормального давления на ноги приводит к возрастанию максимальной силы трения покоя. В то же время плохая скалолазка переносит слишком большую часть веса на руки, где трение вовсе не такое большое... и может стать еще меньше, если она начнет нервничать.

К счастью, не все восхождения совершаются в таких легких условиях. Наиболее волнующие восхождения происходят на более крутых склонах. Правило «прижимай ноги к камню» все еще остается в силе. Хороший пример тому – восхождение по так называемой трубе (расщелине) или углу. В этих ситуациях скалолазка находится между двумя противоположными скальными стенками и должна создать ногами распорку между ними. Скалолазка на рисунке 3 поднимается между двумя параллельными стенками. Труба достаточно широка, чтобы позволить положение, показанное на рисунке. В более узких трубах скалолазка может оказаться вынужденной использовать стиль, при котором ее спина и одна согнутая нога упираются в одну стенку, а другая нога – в другую. Скалолаз на рисунке 4 использует положение «в распорку», поднимаясь по крутому углу.

Чтобы понять физику, скрытую за каждой ситуацией, давайте взглянем на силы, действующие на ногу скалолазки, находящейся в трубе. Для того чтобы скалолазка оставалась в уютном равновесии, равнодействующая сил, приложенных к ее ноге со стороны каменной стенки, должна быть направлена вдоль ее распрямленной ноги. Как в предыдущей задаче, условие отсутствия проскальзывания сводится для максимального угла к уравнению $\text{tg } \theta = \mu$. Здесь, однако, скалолазка сталкивается с проблемой выбора. При угле меньше, чем этот, сила трения больше, и скалолазка находится в большей безопасности, но это достигается ценой увеличения напряже-

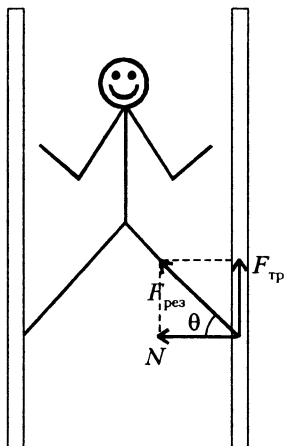


Рис. 3. Альпинистка, использующая положение «в распорку» в широкой трубе. Сила $\vec{F}_{\text{рез}}$, действующая со стороны скальной стенки на ногу альпинистки, направлена вдоль ноги



Рис. 4. Автор использует положение «в распорку» для восхождения по крутому углу. Руки и предплечья только поддерживают равновесие

ния в ногах и бедрах скалолазки. Безусловно, общая гибкость скалолазки является важным фактором. У каждой скалолазки есть свой оптимальный угол с учетом ее роста, безопасности и нагрузки, при котором она чувствует себя наиболее комфортно и к которому она приходит естественным образом, через опыт.

Чтобы подняться по более широкой (или более узкой) расщелине, однако, скалолазка вынуждена отклоняться от этого угла. Не замечательно ли было бы, если бы скалолазка могла

увеличивать или сокращать длину своих ног так, чтобы всегда использовать при восхождении свой оптимальный угол? Можно представить, что именно такие мысли были исходным толчком для следующего важного шага в технологии восхождения, но сначала – несколько слов о связи страхов и методов восхождения.

Страхи. При надежной технике восхождения, силе и абсолютной уверенности в себе альпинисты не нуждались бы в веревках и других приспособлениях, используемых для обеспечения безопасности. Но реальность такова, что большинство предпочитает безопасность, обеспечиваемую веревкой, особенно на новых или особенно трудных маршрутах или когда опасность создают падающие камни.

Когда скалолазка поднимается первой, волоча веревку за собой, она должна как-то закрепить веревку на скале, чтобы, даже сорвавшись, пролететь только удвоенное расстояние до ближайшей точки прикрепления. Скалолаз-партнер, или напарник, находится ниже, вытравляя веревку по требованию и готовясь удержать свою спутницу в случае падения. Один из традиционных методов закрепления веревки использует крюки. Крюк – это стальной гвоздь, который забивают в трещину или щель скалы. Алюминиевое кольцо-защелка, называемое карабином, закреплено в отверстии выступающей головки

крюка, а веревка продернута через карабин. Альпинисты всегда ощущали, что этот метод не является оптимальным. Во-первых, вбивать крюки в скалу – тяжелая работа, во-вторых, они серьезно повреждают скалу.

Недавно началось энергичное развитие «чистых» страховок – маленьких алюминиевых распорок и муфточек, которые служат почти тем же целям, что и крюки, но могут быть закреплены и удалены без ненужных усилий и повреждений скалы. Обычно такое страховочное приспособление надо протиснуть в щель или трещину скалы, а затем прикрепить к нему веревку с помощью карабина.

Довольно долгое время наиболее сложным для конструкторов оставался вопрос крепления страховочных узлов в щелях с параллельными стенками, где нельзя ни крюк забить, ни новый страховочный узел заклинить. Эти щели представляют собой в основном очень узкие трубы (шириной 1–10 см). Многие такие возможные трассы подъема оставались неосвоенными, поскольку лишь немногие альпинисты были достаточно самоуверенны, чтобы пройти их без страховки. Элегантным решением было бы изобретение устройства, использующего трение, чтобы удержаться на месте даже при нагрузке. И это подводит нас к одному из красивейших применений физики в альпинизме.

Друзья. К решению можно подойти примерно таким образом: давайте создадим устройство с двумя кулачками, которое имитирует альпинистку с рисунка 3. Альпинистка, как вы помните, могла удерживать ноги под оптимальным углом к стене только при одной определенной ширине трещины. Наше же устройство должно быть применимо для различных трещин и всегда действовать при оптимальном угле θ . Для этого кулачки должны быть изготовлены с увеличивающимся радиусом кривизны r так, чтобы сохранять постоянный угол при увеличении ширины трещины. Такие устройства действительно были разработаны и носят общее название «кулачковые устройства с пружиной». Одно

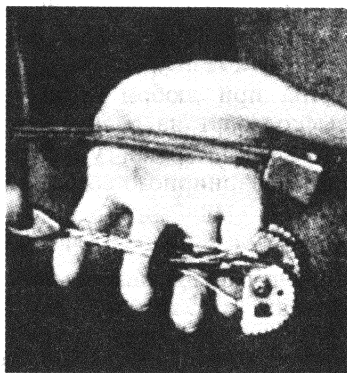


Рис. 5. Друг и муфта, прикрепляемые к карабину

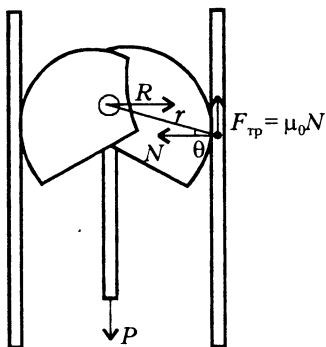


Рис.6. Друг в вертикальной трещине с параллельными гранями. Это – классическое размещение Друга

из наиболее популярных из них выпущено на рынок с торговой маркой «Друг» (рис.5). Название настолько подходящее, что я буду пользоваться им (без кавычек, но с большой буквы) в оставшейся части статьи. (Кстати, на рисунке 4 вы можете обнаружить небольшого Друга, помещенного в вертикальную трещину в скальной стенке на уровне ног, и еще одного – в щели чуть выше уровня глаз. Правильно размещенный Друг оказывается невидимым снаружи!)

Рассмотрим более детально силы, действующие на один из кулачков Друга, помещенного в вертикальной щели, как на рисунке 6. Это – сила \vec{N} нормальной реакции со стороны скалы, сила трения $\vec{F}_{\text{тр}}$ между скалой и кулачком и силы \vec{R} и \vec{P} со стороны оси. Как же добиться того, чтобы все точки внешней поверхности кулачков были в равном положении? Иными словами, чтобы условие проскальзывания было одинаковым для разных точек касания? Для этого надо придать кулачкам Друга такую форму, чтобы отношение $F_{\text{тр}}$ к N было одинаковым для всех точек касания:

$$F_{\text{тр}} = \mu_0 N.$$

Тогда при любом коэффициенте трения $\mu > \mu_0$ Друг не выскользнет из расщелины любой (не слишком большой) ширины. Записав уравнение моментов сил относительно точки шарнирного соединения кулачков:

$$F_{\text{тр}} r \cos \theta = N r \sin \theta,$$

получим фундаментальное уравнение для конструирования Друга:

$$\operatorname{tg} \theta = \mu_0 = \text{const},$$

где μ_0 имеет смысл минимального коэффициента трения для применимости Друга.

Какова должна быть форма кулачка, удовлетворяющего этому требованию? Любой математик угадает ответ немедленно. (Будучи физиком, я сперва получил решение, а потом почувствовал себя глупцом, когда обнаружил, насколько хорошо известен ответ.) Форма кулачка – это логарифмическая спираль, уравнение которой в полярных координатах (r, α) имеет вид

$$r = r_0 \exp(-\alpha \operatorname{tg} \theta).$$

Здесь θ – угол, который радиальное плечо кривой составляет с нормалью к касательной в любой точке кривой. Этот угол постоянен! Поскольку мы уже нашли, что наш Друг должен удовлетворять условию $\operatorname{tg} \theta = \mu_0$, мы получаем уравнение спирали Друга, выраженное через минимальный коэффициент трения:

$$r = r_0 \exp(-\alpha \mu_0).$$

Эта кривая показана на рисунке 7. Для данного чертежа была выбрана величина $\mu_0 = 0,3$. Физически это соответствует алюминиевому кулачку на гладком граните. Различные марки кулачковых устройств имеют слегка различающиеся контактные углы, что придает каждому из них свой единственный характер. На график наложен эскиз реального кулачка.

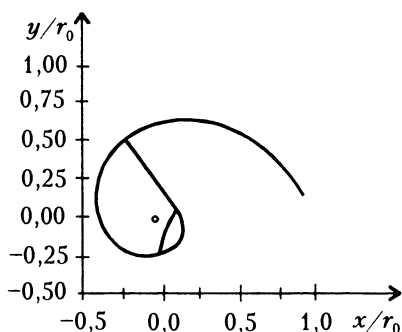


Рис.7. График логарифмической спирали, на который наложен профиль реального кулачка

На практике Другу изготавливаются разных размеров – для щелей разной ширины, но внешний контур кулачка является участком той же самой спирали. Друг, размещенный правильно, сломается прежде, чем выскользнет из трещины с параллельными стенками. Эта поломка произойдет при нагрузке, заметно превышающей 10000 Н.

Итак, стою я на «лбу» скалы, размышляя обо всем этом, и вдруг мне приходит в голову, что при серьезном падении я вполне могу создать нагрузку намного больше допустимой. Вот здесь-то в игру и вступает веревка.

Падение. Представьте себе падение на веревке, у которой динамические характеристики слабы или отсутствуют, т.е. на

веревке, которая не растягивается. Предположим, что, пролетев некоторое расстояние, альпинистка приобретет направленный вниз импульс, который должен быть сведен к нулю в течение времени Δt за счет действия веревки. Обозначим изменение импульса альпинистки Δp . Мы видим, что средняя сила $F_{\text{ср}} = \Delta p / \Delta t$, действующая на альпинистку и страховочное приспособление, удерживающее веревку, может быть огромной, если время торможения мало, а высота падения велика. Кроме того, что эта сила может привести к тяжелым телесным повреждениям, слишком большая нагрузка на страховочное приспособление может вызвать его поломку или выдергивание из скалы, в результате чего возможен даже смертельный исход.

Вот почему альпинисты используют так называемые динамические веревки. Они всегда изготавливаются с четко заданной прочностью, и опытная скалолазка всегда учитывает эту прочность при анализе ситуации на восхождении.

МАСС (Международная ассоциация альпинистских стандартов) установила следующее требование для веревок, разрешенных к применению. Масса 80 кг, удерживаемая веревкой длиной 2,8 м, должна создавать импульсную силу не более 12 кН. Далее веревки маркируются по числу таких испытательных падений, которые они могут выдержать (обычно восемь или девять). Небольшая порция физики поможет проиллюстрировать соображения конструкторов относительно современной скалолазной веревки.

Качество веревки характеризуется «модулем веревки» $M = ES$ — произведением модуля Юнга E и поперечного сечения S . Типичное значение: $M = 40$ кН. Модуль Юнга определяется формулой

$$F = ES \frac{\Delta l}{l},$$

где F — натяжение веревки длиной l , которое вызывает удлинение веревки Δl . Отношение высоты падения к длине веревки между лидером и ее напарником называется фактором падения и характеризует серьезность падения. При максимальном факторе падения $\Phi = 2$ высота падения равна двойной длине веревки (т.е. между лидером и ее напарником нет промежуточных точек страховки).

Чтобы найти, от чего зависит максимальное натяжение веревки F , запишем закон сохранения энергии. К моменту остановки скалолазка потеряет высоту $h + \Delta l$, а уменьшение

потенциальной энергии тяготения будет равно энергии упругой деформации веревки:

$$mg(h + \Delta l) = \frac{F}{2} \Delta l.$$

Используя определения модуля веревки и фактора падения ($\Delta l = Fl/M$ и $h = \Phi l$), получим уравнение

$$F^2 - 2mgF - 2mgM\Phi = 0.$$

Неотрицательное решение его имеет вид

$$F = mg \left(1 + \sqrt{1 + \frac{2M\Phi}{mg}} \right).$$

С данными теста МААС ($\Phi = 1,8$, $mg = 800$ Н) для веревки с $M = 40$ кН получаем $F \approx 11560$ Н, что очень близко к критическому. При таком падении относительное удлинение ($\Delta l/l = F/M$) составляет примерно 29%. Наиболее серьезное падение – падение с фактором два – подвергает опасности и лидера и напарника. Нейлоновые нити в сердцевине альпинистской веревки могут растянуться больше своего предела эластичности или даже порваться. При менее серьезном падении альпинистка может рассчитывать на 5–10-процентную податливость веревки для смягчения импульсной нагрузки. Во всех этих рассуждениях мы игнорировали массу веревки – примерно 73 г/м. Определение ее роли в практике восхождения представляет самостоятельную интересную задачу.

Что мы узнали в результате всех наших рассуждений? Безопасное падение – не обязательно короткое: это падение с малым фактором падения (l и h не входят в ответ для F по отдельности, а только через Φ). Большая длина веревки между лидером и напарником, при закреплении страховочного приспособления ненамного ниже лидера, приведет к небольшим импульсным силам, действующим на альпинистку и страховочное приспособление. Так что альпинистки могут позволить себе больше рисковать в этом случае. А чтобы не создавать большого фактора падения в начале подъема от напарника, страховочные узлы надо устанавливать почаще.

О ЧЕМ НЕ ДУМАЕТ ГОРНОЛЫЖНИК

А.А.Абрикосов (мл.)

В мире зимних видов спорта горные лыжи, санки и бобслей стоят как бы особняком. Когда наблюдаешь такие спортивные состязания только по телевизору, возникает некоторое недоумение: можно ли вообще соревноваться, кто быстрее съедет с горки; не является ли разброс результатов простой случайностью? Ведь все мы решали задачу о скатывании тела с наклонной плоскости (рис.1). Система уравнений,

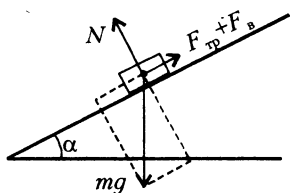


Рис.1. Тело на наклонной плоскости: mg – сила тяжести, N – сила нормальной реакции опоры, $F_{тр}$ и F_v – силы трения и сопротивления воздуха. Основное уравнение движения тела: $m\vec{a} = m\vec{g} + \vec{N} + \vec{F}_{тр} + \vec{F}_v$

позволяет найти ускорение тела на начальном участке, скорость установившегося движения, время движения по трассе от старта до финиша. Тут и возникает парадокс, оправдывающий недоумение телеболельщика: результаты не зависят от поведения спортсмена. Но ведь мы и не пытались учесть этот фактор в исходных уравнениях. А если попытаться?

Сразу приходит в голову мысль обратить внимание на силу трения и силу сопротивления воздуха. Коэффициент трения связан с выбо-

ром мази. Для саночников и лыжников-спусковиков (да и гигантистов тоже) нельзя недооценивать роль аэродинамики. Важно не только принять и сохранить правильную стойку, но и подобрать материал и хорошо сшить из него комбинезон. Примером может служить легендарная победа французской сборной в скоростном спуске. Французы первыми поняли, что трепещущий нагрудный номер – это недопустимая роскошь при скорости 100 км/ч. Под градом шуток они приклеили номера к костюмам пластырем. И повеселились на финише. Ныне в погоне за сотыми долями секунды даже конькобежцы

надели сверхобтекаемые комбинезоны, а лыжников порой обдувают в аэродинамических трубах. Изогнутые палки позволяют принять более выгодную стойку. Испытываются новые мази и покрытия для лыж, сплавы для саночных полозьев. Описанное Л.Кассилем в книге «Ход белой королевы» похищение лыжной мази кажется невинной забавой, когда идет борьба за олимпийское золото.

Но если экипировка участников более-менее равноценна, на первый план выходят индивидуальные качества спортсмена – воля к победе, физическая и специальная подготовка. Мы расскажем, как законы механики позволяют применить свои физические данные и обратить волю к победе в драгоценные секунды результата. Чтобы понять основы лыжной техники, давайте отвлечемся от скоростного спуска (где так важны аэродинамика, умение правильно вести лыжи и удачно выбрать траекторию) и перейдем к слаломным дисциплинам. Здесь спортсменам приходится бороться за успех своими силами, проявляя временами акробатическую ловкость.

Трасса глазами лыжника. Вернемся к силам, которые действуют на лыжника на трассе. Мы, зрители, видим спортсмена в инерциальной системе отсчета, связанной со склоном или с телекамерой. Ну а для лыжника более естественна неинерциальная система, связанная с ним самим. Для вычислений она не очень удобна, но все-таки попробуем взглянуть на трассу глазами лыжника.

Будем предполагать, что речь идет о равномерном скольжении по окружности. В связанной с лыжником системе отсчета наряду с реальными силами (силами тяжести, трения, реакции опоры, сопротивления воздуха) нужно ввести центробежную силу инерции $F_{цб}$, направленную по радиусу от центра дуги и равную

$$F_{цб} = \frac{mv^2}{R},$$

где v – скорость лыжника, R – радиус дуги (рис.2). Центр тяжести лыжника в этой системе неподвижен; значит, в любой момент времени равнодействующая приложенных сил равна нулю. Поэтому сила реакции снега должна быть направлена к центру дуги – ведь это единственная сила, которая может скомпенсировать $F_{цб}$. У саночников это обеспечивается наклоном желоба. А у лыж для лучшего сцепления со снегом скользящая поверхность имеет металлические канты, и при повороте лыжи «кантуют» – спортсмен наклоняет лыжи на

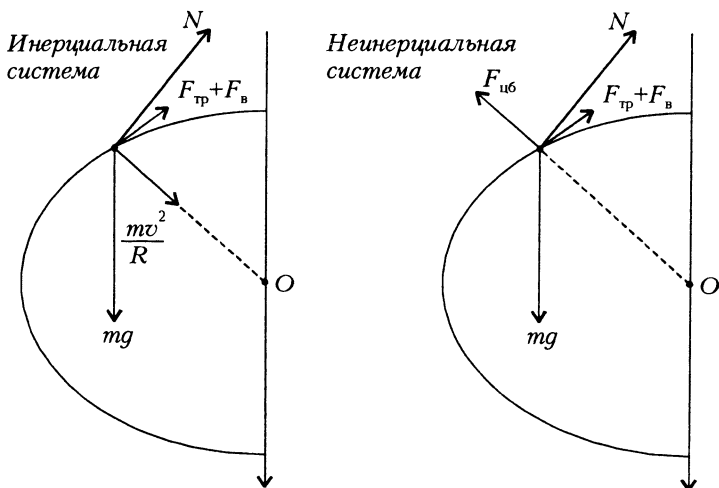


Рис.2. Инерциальная и неинерциальная системы отсчета. Здесь и далее на рисунках вертикальная прямая со стрелкой обозначает линию склона

ребро так, чтобы они зацепились за снег металлическими кантами, как коньки. Горизонтальная составляющая силы реакции снега сообщает спортсмену центростремительное (в инерциальной системе отсчета) ускорение. Чтобы уверенно чувствовать себя на жестких и льдистых склонах, канты нужно регулярно точить, особенно перед соревнованиями.

А кстати, какие нагрузки испытывает спортсмен? Давайте прикинем. Средняя скорость слаломиста около 10 м/с при радиусе дуги порядка 5 м, и $F_{цб} = mv^2/R \approx m \cdot 20 \text{ м/с}^2$, т.е. равна примерно удвоенному весу лыжника. Эту силу нужно векторно сложить с перпендикулярной склону составляющей силы тяжести $mg \cos \alpha$ (обычно $\alpha < 30^\circ$, $\cos \alpha > 1/2$), так что суммарная перегрузка превышает $2g$, причем падает она в основном на «внешнюю» ногу (попытка встать на внутреннюю лыжу, как правило, заканчивается падением). Ну а по характеру своему нагрузка весьма напоминает испытание на вибростенде. Поэтому спортсмены-горнолыжники даже летом занимаются общей физической подготовкой. Например, приседают со штангой.

Оптимальная траектория ± 10 см. Теперь мы начинаем «раскладывать» успех на отдельные слагаемые. Почему лыж-

ника, скатывающегося с горы, нельзя уподобить, скажем, бусинке, соскальзывающей по гладкой изогнутой проволоке? В первую очередь потому, что он сам выбирает маршрут движения в коридоре, заданном флагами (у саночников – желобом). Говоря научным языком, склон горы представляет собой двумерное пространство, где спортсмену (даже если считать его материальной точкой) предстоит найти оптимальную траекторию, в то время как движение бусинки чисто одномерное.¹

Вид оптимальной траектории определяется сочетанием целого ряда факторов. Прежде всего, желательно пройти трассу кратчайшим путем, как можно меньше уклоняясь от линии склона (рис.3). При этом мы выигрываем не только из-за сокращения расстояния, но и за счет увеличения средней крутизны маршрута – чем круче склон, тем больше скатывающая сила и тем меньше сила трения. Поэтому слаломисты стараются идти как можно ближе к флагам, отбивая их плечом и корпусом.

Можно оценить потерю времени вследствие удлинения пути. Пусть отклонение от оптимальной кривой составляет всего лишь ± 10 см. Того же порядка будет удлинение каждой из образующих ее дуг. На слаломной трассе из 50 ворот при средней скорости 10 м/с проигрыш окажется вполне ощутимым:

$$\Delta t \approx \frac{50 \cdot 0,1 \text{ м}}{10 \text{ м/с}} = 0,5 \text{ с}.$$

В то же время в скоростном спуске или слаломе-гиганте, где ворот меньше, а средняя скорость больше, этот фактор скажется незначительно.

Однако, как ни странно, «идти на флаг», т.е. спрямлять участки пути между флагами, также невыгодно. Во-первых, при этом придется сбрасывать скорость, чтобы вписаться в

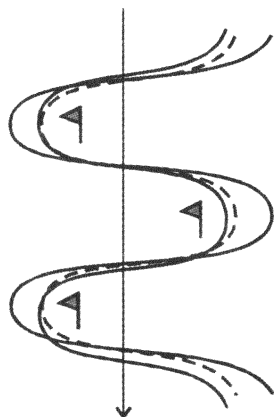


Рис.3. Варианты выбора маршрута на трассе слалома. Выделенная кривая – оптимальная траектория

¹ В каком-то смысле «самым одномерным» является бобслей, где очень многое зависит от умения экипажа разогнать снаряд на старте.

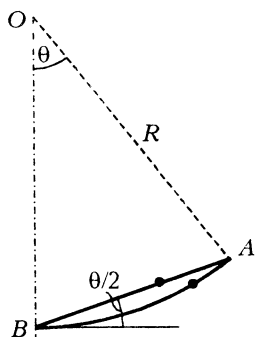


Рис.4. Бусинка на проволочках. Время соскальзывания по дуге АВ меньше, чем по стягивающей ее хорде

более крутой поворот, а во-вторых, время движения по прямой вовсе не обязательно наименьшее.

Рассмотрим простой пример. Бусинка скатывается без начальной скорости из точки А в точку В сначала по дуге окружности, а затем по стягивающей ее хорде (рис.4). Если угловой размер дуги мал, то время движения в первом случае равно четверти периода колебаний математического маятника длиной R (трением пренебрегаем):

$$t_1 = \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{R}{g}}.$$

Длина хорды равна $l = 2R \sin(\theta/2)$, бусинка движется с ускорением $a =$

$= g \sin(\theta/2)$, и во втором случае время равно

$$t_2 = \sqrt{\frac{2l}{a}} = 2\sqrt{\frac{R}{g}}.$$

Отношение $t_1/t_2 = \pi/4 < 1$, т.е. по дуге бусинка скатится быстрее. Никакого чуда здесь нет. Хотя путь вдоль дуги длиннее, он начинается с более крутого участка. Бусинка быстрее разгоняется, и выигрыш в скорости оказывается важнее, чем проигрыш в расстоянии. С этой точки зрения траектория, составленная из плавно сопряженных дуг, также оказывается лучше, чем та, где резкие повороты перемежаются спрямленными участками.

Еще Галилей интересовался формой брахистохроны — линии наискорейшего спуска от одной точки к другой. Он считал, что это дуга окружности (как в рассмотренном нами примере). В 1697 году И.Бернулли показал, что в отсутствие трения это другая магическая кривая — циклоида. Уравнение брахистохроны используют при проектировании санных трасс и «американских» (они же «русские») горок. Но рассчитать, не выходя из кабинета, оптимальный путь лыжника не удастся. Спортсменам приходится полагаться на собственную интуицию, опыт, тщательно запоминать расположение флагов на трассе. И, следуя совету замечательного французского горнолыжника Ж.-К.Килли, «думать на пять врат вперед».

Механизм торможения, или Что такое хорошие лыжи. В горных лыжах, да и во многих других видах спорта, прогресс и развитие техники спортсменов идут бок о бок с совершенствованием инвентаря. Как до появления фиберглассовых шестов нельзя было и мечтать о шестиметровых прыжках, так едва ли можно было вообразить стиль нынешних лыжников, стоя на трофейных гикоревых лыжах с креплениями «Кандахар».

Для того чтобы «быстро бегать», лыжи должны не только хорошо скользить, но и как можно крепче держаться за склон, не соскальзывать в поперечном направлении. Действительно, из формулы для центробежной силы инерции видно, что скорость, с которой можно пройти вираж, пропорциональна квадратному корню из силы F поперечного сцепления лыж со снегом:

$$v = \sqrt{\frac{FR}{m}}.$$

Однако дело не только в этом. Соскальзывание является основной причиной потери скорости (драгоценная энергия расходуется на «сгребание» снега со склона). Обычно лыжники пользуются боковым соскальзыванием, когда нужно погасить скорость, преодолеть крутой участок, где новичок не надеется на свои силы, или просто загладить склон после тренировки. Но если спортсмена «потащило на повороте», это сразу же зафиксирует секундомер. Отсюда стремление поставить лыжу как можно круче к склону и врезаться кантами в снег. (А на открывающейся при этом скользящей поверхности особенно эффектно выглядит реклама лыжной фирмы. Правда, появилась она там совсем недавно.)

У истоков развития горных лыж стоял Ф. Нансен. Великий полярник, политический деятель, лауреат Нобелевской премии мира был также автором первой книги о горных лыжах. Во времена Нансена катались в мягких кожаных ботинках на жестких неокантованных лыжах. А первым собственно горнолыжным приемом был «телемарк» (рис.5), этот красивый поворот требовал ловкости и был чреват падением. На смену «телемарку» пришел более демократичный «плуг» (рис.6). По сей день многие лыжники начинают с него свою карьеру. Это самый простой, но, увы, самый медленный способ. Последнее слово осталось за «христианией» – поворотом на параллельных лыжах. Постепенно совершенствуясь, он прочно занял главное место в техническом арсенале горнолыжни-

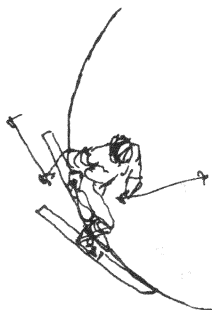


Рис.5. «Телемарк». Лыжник делает выпад вперед внешней лыжей и балансирует руками. Современное снаряжение не позволяет поворачивать таким образом



Рис.6. «Плуг». Стоя на внутренней лыже, лыжник «упирается» в снег отставленной внешней



Рис.7. «Христиания» соскальзыванием. Параллельные лыжи заматают меньшую площадь, чем при «плуге», поэтому торможение меньше

ка. Сначала «христианию» выполняли соскальзыванием (рис.7). Внутренняя лыжа разгружена, корпус лыжника подан чуть вперед, поэтому носок сильнее «держится» за снег. В ходе движения задники немного соскальзывают, и получается поворот. Такой способ был быстрее и надежнее предшествующих. А дальше уже сама собой, просто и естественно напрашивается идея «резаного» поворота (рис.8), при котором сопротивление движению минимально.

Выросли скорости, и требования к снаряжению сменились на прямо противоположные. Теперь делают жесткие и

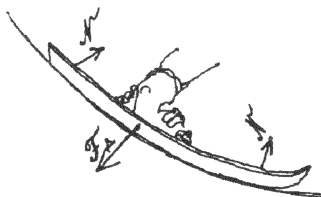


Рис.8. «Резаный» поворот. Лыжи прогнулись и не «сгребают» снег; в этом случае торможение минимально

высокие пластиковые ботинки, которые передают усилие прямо от голени к лыже и позволяют хорошо ее кантовать. А сама лыжа – мягкая, она изгибается по дуге и выписывает поворот, оставляя узкий «резаный» след. Чтобы лыжа легко принимала форму дуги, в середине, где давит ботинок, ее делают немного уже, чем с концов. При кантовании сцепление со снегом оказывается максимальным на концах, и давление посередине прогибает лыжу нужным образом.

Сделать хорошие лыжи непросто, ведь надо убить по крайней мере двух зайцев. Во-первых, лыжа должна мягко гнуться по дуге в продольном направлении. Во-вторых, чтобы не соскальзывать, она должна быть жесткой «на пропеллер», т.е. противостоять скручиванию. Не говоря уже о том, что лыжа должна держать направление и не гнуться в плоскости склона («саблевидный» изгиб»). Найти удачное сочетание хотя бы этих качеств – сложная конструкторская задача, причем выбор конкретного решения неоднозначен. Для слалома, где виражи круче, а скорости меньше, спортсмены берут лыжи короче и податливее, чем для слалома-гиганта. Свои требования предъявляют также метеоусловия и качество снега. Поэтому буквально перед самым стартом будущий чемпион решает, какие из подготовленных накануне лыж послужат ему сегодня.

К счастью, любители не знают таких проблем. Скорее наоборот, ведь спортивный инвентарь зачастую «строг» и не прощает мелких огрехов. Так что те отборные лыжи, которые мы видим по телевизору, – это лишь верхушка айсберга. А миллионы более комфортных туристских лыж верно служат многочисленным любителям и «фанатам» – тем, на кого опирается большой спорт.

Поворот с ускорением, или Фокусы на кривой дорожке.

Наконец, мы переходим к важнейшему элементу, без которого немыслима техника современного слалома и слалома-гиганта. Несмотря на ясность лежащих в основе физических принципов, этот раздел может вызвать разногласия. До сих пор некоторые специалисты не верят, что спортсмен может ускорять себя при спуске с горы, хотя кинограммы движения хороших лыжников доказывают это. Какие возможности таит активное ведение лыж, показал еще в самом начале своего фантастического взлета Ингемар Стенмарк. «Шведский ураган» опережал соперников больше чем на секунду, в то время как борьба шла за десятые доли.

Горнолыжников, пожалуй, может удивить непривычный взгляд на «данное им в ощущениях». Ни в коем случае не посягая на личный опыт читателей, мы лишь предлагаем свою точку зрения на «объективную реальность». Давайте оглянемся, не подскажут ли разгадку горнолыжного ускорения другие виды спорта? Скажем, обычные беговые лыжи...

Теперь здесь правит коньковый ход (рис.9,а). Благодаря ему выросли скорости. Не перенять ли опыт слаломистам? Идея не новая. Ход «коньком» был опробован именно в горных лыжах, а уже потом спустился на равнину. На склоне это выглядит так: каждый поворот сопрягается с одним отталкиванием внешней лыжей, и следы слегка расходятся от начала к концу дуги (рис.9,б). Кажется бы, возникает выигрыш в скорости, но за него приходится платить. Во-первых, «конек» требует очень точной координации работы ног и соблюдения равновесия, когда лыжник загружает внутреннюю ногу. А во-вторых, затягивается переход из поворота в поворот. В точках пересечения траектории с линией склона спортсмен «перекладывается» из дуги в дугу, перенося свой центр тяжести над лыжами. Затем начинается

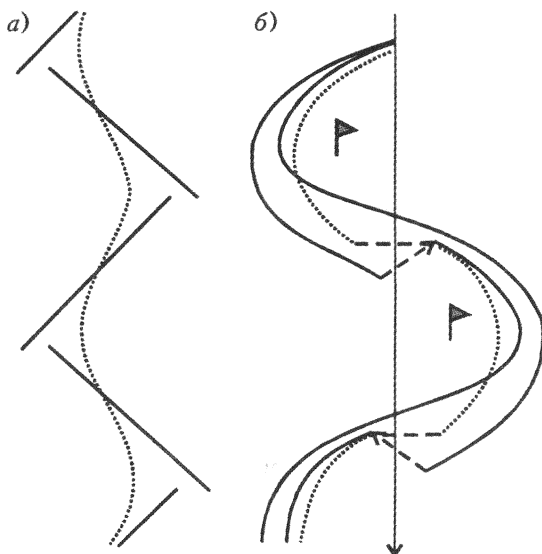


Рис.9. Коньковый ход на ровном месте (а) и на склоне (б). Выделенные кривые – траектории центра тяжести лыжника, остальные – следы лыж

следующий поворот. Если лыжи стоят широко, то перекладывание займет больше времени, вырастет спрямленный участок траектории. Кроме того, лыжи дольше будут не закантованы, проскальзывание приведет к торможению. Сильнее всего это заметно на льдистых трассах, где так трудно уцепиться за склон. Вот и получается, что на горе «конек» – не самая резвая лошадка.

Хорошо бы и ускоряться, и лыжи вести поуже. Возможно ли такое? Присмотримся еще раз к коньковому ходу (рис. 9,а). Центр тяжести конькобежца или лыжника-гонщика описывает волнообразную траекторию (выделенная линия на рисунке). Корпус спортсмена опережает опорную лыжу и движется под углом к ней. При этом (а не при переступании с ноги на ногу) совершается работа и набирается скорость. Поймите, но ведь слаломист тоже движется по «змейке»! Причем его корпус вовсе не следует за лыжами буквально. В конце поворота центр тяжести спортсмена «догоняет» лыжи, проходит над ними и уходит вперед – внутрь следующей дуги. Нельзя ли дополнить это отталкиванием? Оказывается, можно.

Правда, такой толчок имеет мало сходства с «коньком» и совсем не бросается в глаза. Составляют его две фазы: сгибание и разгибание. Вначале, при подходе к точке сопряжения дуг (к точке пересечения траектории с линией склона), когда корпус нагоняет лыжи, спортсмен сгибает ноги, словно «амортизируя» бугор. Такое сгибание (иногда очень резкое «проглатывание» – авальман) позволяет сохранить набранную скорость, избежать соскальзывания лыж. Сразу за точкой сопряжения следует разгибание, которое выносит корпус чуть вперед, сообщая ему добавочный импульс по линии склона. К концу дуги лыжи снова опережают спортсмена, и следуют новые сгибание (амортизация) и разгибание (отталкивание). Причем на узко поставленных лыжах.²

Лучше понять физику такого, казалось бы, нехитрого процесса нам поможет известное совсем не зимнее развлечение.

Летние аналоги. Итак, давайте немного отвлечемся и вспомним, как летом мы раскачиваемся на качелях – больших

²Наблюдая за горнолыжниками, вы, возможно, замечали, что часто, сопрягая дуги, мастера делают как бы приставной шаг с лыжи на лыжу. Это не должно сбивать вас с толку. Порой это продиктовано спецификой трассы, а иногда... Даже великие иногда ошибаются.

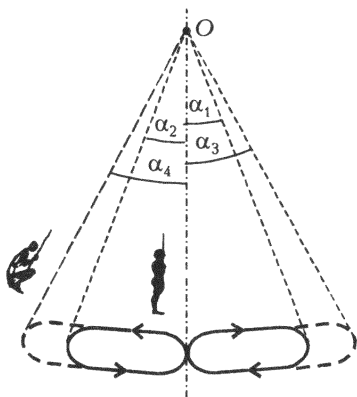


Рис.10. Движение центра тяжести при раскачивании на качелях

парковых качелях-лодках. Представьте себе, вот качели, постепенно замедляясь, летят вверх. В тот миг, когда они зависают в верхней точке, мы приседаем и вот уже мчимся вниз, так, что ветер свистит в ушах. Внизу, когда перегрузка максимальна, встаем и снова, с замиранием сердца, наверх, уже чуть выше, чем в прошлый раз. Центр тяжести системы описывает при раскачивании восьмеркообразную спираль (рис.10).

Раскачивание колебательной системы за счет изменения ее параметров (на качелях это расстояние от точки подвеса до центра тяжести) называется параметрическим возбуждением. Вставая в нижней точке, мы совершаем положительную работу против суммы силы тяжести и центробежной силы инерции (мы рассматриваем движение в неинерциальной системе отсчета). А в верхней точке центробежная сила инерции равна нулю, а от силы тяжести остается лишь проекция $mg \cos \alpha$. Поэтому отрицательная работа при приседании (с той же амплитудой) по модулю меньше. Полная работа, совершенная за цикл, положительна, и энергия системы растет.

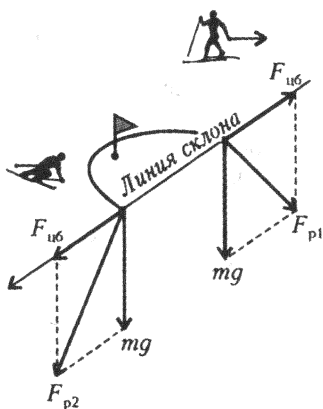


Рис.11. Равнодействующие сил тяжести и центробежной в начале и в конце дуги: $F_{р2} > F_{р1}$

А теперь попробуем прикинуть энергетический баланс горнолыжника, как мы только что это сделали для качелей. Здесь нас подстерегает сюрприз. На первый взгляд, все очень похоже. При движении по дуге на лыжника тоже действуют сила тяжести и центробежная сила инерции (рис.11). Угол между ними меняется, так что их равнодействующая минимальна в начале дуги ($F_{р1}$) и достигает

максимума в конце (F_{p2}). Приседая, лыжник совершает отрицательную работу, а вставая – положительную. Однако когда он разгибается в начале дуги, на него действует меньшая сила, чем при сгибании в конце. Значит, суммарная работа, совершаемая за цикл сгибания – разгибания (амортизация – толчок), будет отрицательна. Парадокс?! Казалось бы, гораздо естественнее совершать положительную работу и увеличивать кинетическую энергию. Никакой ошибки здесь нет. Просто до сих пор мы не заботились особенно о балансе энергии и думали только о том, как сократить потери и выиграть скорость. В этой теоретической гонке за секундами немудрено было и перегнуть палку. Настало время поставить все на свои места.

Давайте запишем закон сохранения энергии на каком-либо участке трассы:

$$mg\Delta h + \frac{\Delta(mv^2)}{2} = A_{\text{тр}} + A_{\text{в}} + A_{\text{лыжн}}.$$

В левой части стоит изменение потенциальной ($mg\Delta h$) и кинетической ($\Delta(mv^2)/2$) энергии лыжника, в правой – работа, совершаемая самим лыжником, силами трения и сопротивления воздуха. Каковы соотношения между этими слагаемыми?

Начнем с левой части уравнения. Средняя скорость слаломиста на трассе меняется не слишком сильно. Поэтому второе слагаемое едва ли существенно, т.е. $\Delta(mv^2/2) \approx 0$. А вот первое, наоборот, велико. Чтобы набрать обычную для слаломиста скорость $v \sim 10$ м/с, достаточно потерять всего лишь $\Delta h = v^2/(2g) = 5$ м высоты. (В больших горах перепады, как правило, исчисляются сотнями метров.)

Теперь о правой части. Торможение лыж при резаном повороте очень мало. Сопротивление воздуха зависит от скорости. Однако обе эти силы не мешают спусковикам превышать скорость 100 км/ч, т.е. 28 м/с. Но трасса слалома на такой скорости сливается в непробиваемый частокол, становится непроходимой.³ И задача слаломиста – не увеличивать скорость, а по крайней мере сдерживать ее рост. Так

³ Разумеется, на слаломной дуге трение лыж больше, чем на спуске, но не настолько, чтобы изменить последующий вывод.

что отрицательная работа, совершаемая лыжником в цикле сгибания – разгибания, есть необходимое условие баланса энергии:

$$A_{\text{лыжн}} < 0.$$

Итак, чтобы выиграть, горнолыжник должен совершать работу, которая не становится легче от знака «минус». Законы физики подтверждают: за победу надо бороться!

Чем же такой способ понижения энергии выгоднее постепенного расхода при повороте соскальзыванием? Во-первых, заменой статических нагрузок на менее утомительные динамические. Нет нужды что есть силы упираться кантами в снег и терять в конце дуги набранную скорость. А во-вторых, вспомним пример с двумя бусинками (см. рис.4). Если энергия лыжника тратится на трение, его движение по дуге можно грубо представить себе равноускоренным, как у бусинки на прямой проволочке. А при повороте с ускорением лыжник сначала совершает работу и набирает скорость и лишь затем гасит ее излишек в конце дуги. В итоге средняя скорость больше, и на поворот уходит меньше времени (как у бусинки на дуге). Режим сгибания – разгибания оказывается дополнительным средством контроля скорости.

Свобода движений и уникальные динамические возможности отличают горные лыжи от санок и бобслея и роднят с роликовой доской – скейтбордом, или просто скейтом. Кстати, вот прекрасный пример того, что ускоряться не обязательно «коньком»: куда шагнешь, если обе ноги стоят на одной доске? Тем не менее, ускорение за счет параметрического резонанса позволяет даже преодолевать на скейте небольшие подъемы. А механизм все тот же: корпус наклонен внутрь дуги, значит, разгибание в начале поворота и сгибание в конце дают суммарный импульс в направлении движения. И вас не должно смущать, что на скейте сгибание сопровождается энергичным скручиванием в пояснице, помогающим вести дугу. С точки зрения внешнего наблюдателя, главную роль играет перпендикулярная оси доски составляющая силы трения (на лыжах это составляющая силы реакции снега при кантовании). При движении по «змейке» она меняется по величине и по направлению, но в среднем направлена вперед.

Вот и весь секрет. Только не обольщайтесь, ведь наша теоретическая модель «сесть – встать на два счета» предельно упрощена. Учиться плавать надо в воде. И не было еще на

свете лыжника, не измерившего собой пару-тройку больших сугробов.

Заключение. Ни с чем не сравнимое чувство удивительной свободы, когда весь мир рвется тебе навстречу, сверкая искрами морозного снега, не описать формулами. Маленькие дети учатся кататься, подражая взрослым, и не думают о физике. Но знание законов Ньютона открывает второй путь – от головы к ногам.⁴ Может быть, именно здесь горнолыжник найдет ответ на какие-то нерешенные вопросы. Ну а не горнолыжник...

Неужели теперь, когда вы столько знаете, вам не захотелось попробовать? Право же, эта мечта достойна воплощения.

⁴ А здесь есть еще о чем подумать. Например, о моментах сил, действующих на горнолыжника. Ведь мы даже не касались этой важнейшей, но сложной темы.

О ДИНАМИКЕ МЯЧА ДЛЯ ИГРЫ В ГОЛЬФ

*Сообщение, сделанное членом Королевского
общества сэром Дж.Дж.Томсоном
в Королевском институте в пятницу 18 марта
1910 года*

С игрой в гольф связано так много проблем динамики, что обсуждение их всех заняло бы гораздо больше времени, чем имеется сегодня в моем распоряжении. Поэтому я даже не сделаю попытки затронуть множество важных вопросов, возникающих при рассмотрении взаимодействия клюшки с мячом, а ограничусь лишь обсуждением полета мяча после того, как он оторвался от клюшки. Как бы то ни было, эта проблема очень интересна; она была бы еще интереснее, если бы мы могли принять те объяснения поведения мяча, которые давались многочисленными авторами в обширнейшей литературе, посвященной игре в гольф. Если бы эти объяснения были верны, то мне пришлось бы представить вам сегодня новую динамику и объявить, что материя, когда она принимает форму мяча для гольфа, подчиняется законам, совершенно отличным от тех, которые определяют ее движение при любых других условиях.

Если бы мы могли послать мяч клюшкой без вращения, как из катапульты, то его поведение было бы педантично правильным, но неинтересным: при отсутствии ветра его траектория лежала бы в вертикальной плоскости, не отклоняясь ни вправо, ни влево, и он упал бы на землю после относительно короткого полета.

К счастью, мяч для гольфа, отрываясь от клюшки, лишь в редких случаях не имеет вращения, и именно вращение придает интерес, разнообразие и живость полету мяча. Именно вращением объясняется отклонение мяча вправо или влево, именно вращение заставляет мяч взмывать над полем, или

нырять, или делать неистовые зигзаги, порождая легенду о его артистическом темпераменте; он совершает эти чудачества, как акробат, забавы ради крутящий одно-два сальто. В действительности, однако, мяч является самым прозаическим предметом, знающим в воздухе только одно правило поведения, которому он подчиняется с глупой добросовестностью: он всегда следует за своим «носом» (передней частью). Это правило — ключ к пониманию поведения всех мячей, находящихся в воздухе, безразлично, являются ли они мячами для гольфа, бейсбола, крикета или тенниса. Теперь же, до того как перейти к рассмотрению сути этого правила, обсудим некоторые из его следствий.

Представим, что мяч вращается вокруг горизонтальной оси так, как показано на рисунке 1,а, и предположим, что его скорость направлена горизонтально. Тогда «нос» мяча А движется вверх, и так как по нашему правилу мяч пытается следовать за своим «носом», он будет подниматься, траектория полета будет изогнута, как показано пунктиром. Если бы мяч вращался в противоположном направлении (рис.1,б), его «нос» А двигался бы вниз, и мяч, следуя за точкой А, «нырнул» бы вниз.

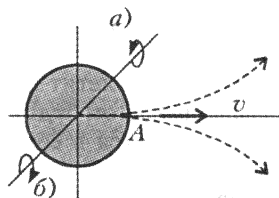


Рис. 1

Предположим теперь, что мяч вращается вокруг вертикальной оси, как показано на рисунке 2,б. Тогда если мы посмотрим вдоль направления его полета, то увидим, что «нос» А движется вправо, и, следовательно, согласно нашему правилу, мяч тоже будет двигаться вправо по траектории, показанной пунктиром; фактически мяч будет себя вести, как при закрученном вправо ударе. В действительности мяч, закрученный вправо, именно так вращается вокруг вертикальной оси. Если же мяч вращается вокруг вертикальной оси в противоположном направлении (рис.2,а), то он полетит влево. Это будет «левая закрутка».

В случае, когда ось вращения совпадает с направлением полета и проходит через «нос» мяча, он, следуя нашему правилу, будет двигаться без отклонения.

Яркие примеры влияния враще-

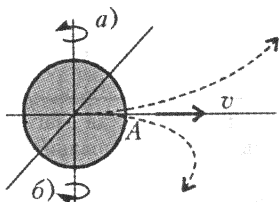


Рис. 2

ния на полет мяча дает игра в бейсбол; опытный подающий может, придавая нужное вращение, заставить траекторию мяча изогнуться вправо или влево, вверх или вниз. Для того чтобы мяч отклонился в сторону, вращение должно происходить вокруг вертикальной оси, для отклонения же вверх или вниз – вокруг горизонтальной.

Игрок в теннис использует этот эффект, когда закручивает мяч сверху, т.е. ударяет по верхней части мяча так, чтобы заставить его вращаться вокруг горизонтальной оси. «Нос» мяча движется вниз, как на рисунке 1,б, и мяч гораздо быстрее падает на площадку, не вылетая за ее пределы.

Перед тем как перейти к обсуждению эффектов, возникающих вследствие подобного вращения, я покажу несколько опытов. Так как силы, действующие на мяч, зависят от движения мяча и воздуха друг относительно друга, они не изменятся, если мы будем рассматривать неподвижный мяч в движущемся потоке воздуха. Так, предположим, что мяч стремительно летит через неподвижный воздух со скоростью v ; силы при этом будут такими же, как и в случае, когда центр мяча находится в состоянии покоя, а ветер обдувает мяч со скоростью $-v$. В лекционных экспериментах пускать мяч по комнате неудобно, гораздо удобнее иметь неподвижный мяч и приводить в движение воздух.

Для начала я попытаюсь воспроизвести опыт, поставленный Магнусом¹ в 1852 году. Его цель – показать, что на вращающееся тело, движущееся относительно неподвижного воздуха, действует сила в направлении движения «носа» мяча относительно его центра; следовательно, сила направлена под прямым углом как к направлению, в котором движется центр тела, так и к оси вращения. С этой целью цилиндр А (рис.3) укреплен на опорах так, что он может быстро вращаться вокруг вертикальной оси; цилиндр прикреплен к одному концу стержня, на другом конце которого находится

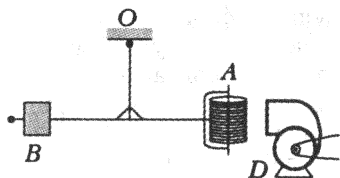


Рис. 3

¹ Генрих Густав Магнус (1802–1870) – немецкий физик и химик. Занимался исследованиями в области механики, гидродинамики, оптики. Открыл явление возникновения поперечной силы, действующей на тело, вращающееся в набегающем на него потоке жидкости или газа (эффект Магнуса). (Прим. ред.)

груз B , выбранный так, что, когда стержень подвешивают на проволоке, он принимает горизонтальное положение. Стержень чутко реагирует на любую горизонтально направленную силу, так что, когда на цилиндр будет действовать такая сила, она будет легко обнаружена по движению стержня.

Перед цилиндром расположена труба D , по которой вентилятор гонит поток воздуха. Я устанавливаю стержень и ось цилиндра так, чтобы поток воздуха попадал на цилиндр симметрично. В этом случае, если цилиндр не вращается, действие на него потока воздуха не вызывает никакого движения стержня. Теперь я привожу цилиндр во вращение; вы видите, что при попадании на него потока воздуха стержень отклоняется. Он отклоняется в одну сторону при одном направлении вращения и в противоположную при обратном. Как видите, стержень отклоняется в том же направлении, в каком вращается цилиндр (рис.4), т.е. как

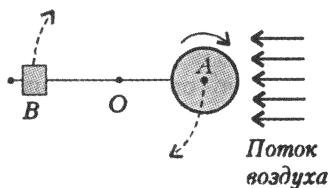


Рис. 4

если бы на цилиндр действовала сила в направлении движения его «носа». Если я прекращу подачу воздуха, то стержень не будет двигаться, хотя я вращаю цилиндр. Он также не движется, если подавать воздух на невращающийся цилиндр. Таким образом, для появления силы, действующей на цилиндр, требуется как его вращение, так и поступательное движение (или, что то же, обдувание его потоком воздуха).

Рассмотрим теперь, как появляется эта сила. Она возникает потому, что при движении вращающегося тела давление воздуха с одной стороны тела не равно давлению с другой стороны, и, следовательно, на тело действует сила с той стороны, где давление больше. Например, когда мяч движется в воздухе так, как показано на рисунке 1, a , давление снизу, где линейная скорость вращения совпадает по направлению со скоростью поступательного движения, больше давления сверху, где скорость вращения противоположна по направлению скорости поступательного движения мяча в воздухе.

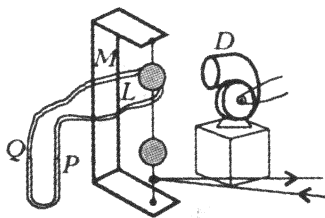


Рис. 5

В приборе, показанном на рисунке 5, два мяча для гольфа

— гладкий и с рифленой поверхностью — закреплены на оси и могут быть приведены в быстрое вращение электромотором. Поток воздуха, подаваемый от вентилятора по трубе D , может быть направлен на один из мячей; ось, несущую мячи, можно поднять или опустить, соответственно помещая в поток воздуха то гладкий, то рифленый мяч. Давление при этом измеряется с помощью манометра PQ , к которому присоединены специальные трубки L и M , прилегающие к противоположным сторонам мяча для гольфа; если давление воздуха со стороны M больше, чем со стороны L , уровень жидкости в трубке Q манометра понизится; если, наоборот, давление воздуха со стороны L больше, чем со стороны M , понизится уровень жидкости в трубке P манометра.

Сначала я покажу, что, когда поток воздуха направлен на мячи, но они не вращаются, давления с разных сторон одинаковы; вы видите, что жидкость в приборе не движется. Затем я выключаю вентилятор и привожу мячи во вращение. Результат тот же — в приборе вновь нет движения жидкости. Но когда мячи вращаются в направлении, показанном на рисунке 5, и я подаю на них поток воздуха, уровень жидкости в трубке Q опускается и поднимается уровень в трубке P . Давление в этом случае со стороны M , где скорость точек на поверхности вращающегося мяча противоположна скорости воздуха, выше, чем со стороны L , где вращение стремится вынести мяч из потока воздуха. (Если изменить направление вращения мяча на обратное, то вы увидите, что разница давлений тоже изменится.) Случай, когда мяч неподвижен, а воздух движется справа налево, с точки зрения динамики ничем не отличается от случая, когда мяч летит в неподвижном воздухе слева направо. Итак, мы видим, что давление больше с той стороны, где вращение делает скорость движения поверхности относительно воздуха больше, чем она была бы без вращения.

Чтобы показать разницу между гладким и рифленым мячами, поместим гладкий мяч в поток воздуха и отметим разницу уровней жидкости в левом и правом коленах прибора. Если теперь заменить гладкий мяч на рифленый, то разница уровней увеличится более чем в два раза; это говорит о том, что при той же скорости вращения и той же скорости потока воздуха разница давлений по разные стороны рифленого мяча более чем в два раза выше, чем у гладкого.

Вернемся все же к обсуждению причин, по которым давления с противоположных сторон вращающегося мяча

различны. Объяснение этому было дано Ньютоном почти 250 лет назад. В письме Ольденбургу в 1671 году он пишет: «Я часто видел, как теннисный мяч при ударе наклонной ракеткой описывает кривую. Когда такой удар вызывает и поступательное и вращательное движение, части мяча с той стороны, где движения совпадают, должны давить на прилегающий воздух сильнее и возбуждать пропорционально большее сопротивление и противодействие воздуха». Это письмо имеет не только научную ценность – оно показывает, что Ньютон, интересуясь спортивными играми, создал прекрасный прецедент для последующих поколений физиков и математиков.

Такое же объяснение было дано Магнусом, а математическая теория эффекта представлена лордом Рэлеем в статье «О неправильном полете теннисного мяча», опубликованной в 1877 году. Лорд Рэлей показывает, что сила, действующая на мяч и являющаяся результатом разницы давлений, направлена под прямым углом к направлению движения мяча и к оси его собственного вращения, а величина этой силы пропорциональна скорости мяча, умноженной на угловую скорость вращения и на синус угла между направлением движения мяча и осью вращения. Поскольку я боюсь, что не все мои слушатели – хорошие математики, попытаюсь дать общее представление о том, как устанавливается эта разница давлений, не используя формул.

Рассмотрим мяч для гольфа, вращающийся в движущемся потоке воздуха (рис.6). Движение воздуха с нижней стороны мяча будет задерживаться его вращением, и, следовательно, оно будет вблизи мяча медленнее, чем если бы мяча не было или если бы мяч не вращался. Иными словами, в потоке воздуха, движущемся по каналу PQ , скорость около мяча в точке Q должна быть меньше, чем в точке P ; следовательно, должно возникнуть давление, действующее против движения воз-

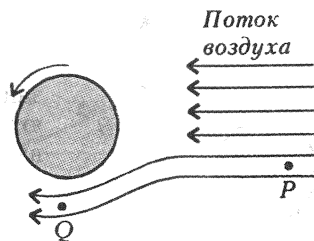


Рис. 6

духа, т.е. давление воздуха в точке Q должно быть больше, чем в точке, находящейся, подобно P , на некотором расстоянии от мяча. Посмотрим теперь, что происходит с другой стороны мяча. Здесь вращение стремится переместить мяч в направлении движения потока воздуха; если скорость поверхности мяча здесь больше скорости потока, то мяч увлекает за

собой воздух, увеличивая скорость потока; в противном случае мяч, хотя и уменьшит скорость потока воздуха, но не до такой степени, как с противоположной стороны, и увеличение давления воздуха на верхнюю часть мяча (по сравнению с давлением воздуха в точке P) будет меньше, чем увеличение давления на нижнюю его часть. Таким образом, возле нижней части мяча давление воздуха будет больше, чем возле верхней, и на мяч будет действовать сила, заставляющая его подниматься вверх.

Здесь мы предполагали, что мяч для гольфа покоится, а воздух стремительно движется вдоль него справа налево; силы при этом будут те же самые, как если бы воздух покоился, а мяч для гольфа летел слева направо. Летящий мяч, вращающийся в направлении, показанном на рисунке 6, будет подниматься вверх, следуя за своим «носом».

Разница давлений с двух сторон мяча для гольфа пропорциональна скорости мяча, умноженной на угловую скорость его вращения. Так как вращение, приданное мячу клюшкой при ударе вертикально вверх («свечкой»), пропорционально скорости, с которой мяч отрывается от клюшки, разность давлений в момент отрыва пропорциональна квадрату его начальной скорости. Чтобы создать подъемную силу, большую, чем сила тяжести, разность средних давлений с противоположных сторон мяча должна составлять около 0,2% от атмосферного давления. Мяч же при хорошем ударе отрывается от клюшки со скоростью, достаточной для создания

гораздо большей разности давлений. Как следствие, когда мяч вылетает из лунки, вращаясь в направлении, показанном на рисунке 7 (это часто называют закручиванием снизу), сила, вызванная вращением и направленная вверх, больше силы тяжести, так что равнодействующая сила направлена вверх — и мяч взмывает над полем, вместо того чтобы притягиваться к земле.

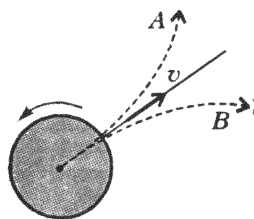


Рис. 7

Траектория мяча выгибается вверх, по кривой A , а не вниз, по кривой B , как если бы мяч не вращался. Фактически вращающийся мяч для гольфа является очень эффективным летательным аппаратом тяжелее воздуха; подъемная сила может превосходить силу тяжести мяча во много раз.

При изменении скорости вращения траектория мяча может принимать множество очень интересных форм. Мы можем

проследить за всеми этими изменениями на установке, которую можно назвать «электрический игровой трек». Посредством этого устройства я могу подвергнуть небольшие частицы действию сил точно того же типа, что и силы, действующие на вращающийся мяч для гольфа. Частицы вылетают из катода – раскаленного докрасна куска платины с нанесенным на него пятном оксида бария, это устройство можно назвать лункой. Платина соединена с электрической батареей, которая заставляет отрицательно заряженные частицы, вылетевшие из катода, лететь по стеклянной трубке, из которой удален почти весь воздух. Эти частицы светятся, и их траекторию очень легко видеть невооруженным глазом. Итак, наши частицы-мячи вылетают из лунки-катода, и мы должны теперь ввести вертикальную силу, действующую на частицы-мячи, подобно силе тяжести. Это легко сделать при помощи горизонтальных пластин, которые заряжены от электрической батареи, причем верхняя пластина заряжена отрицательно; когда отрицательно заряженная частица пролетает между пластинами, на нее действует сила, направленная, подобно силе тяжести, вниз.

Вы видите, что, когда частицы пролетают между пластинами, их траектория имеет форму, показанную на рисунке 8, а; это – траектория мяча, летящего без вращения. Я могу имитировать эффект вращения, подвергнув частицы-мячи действию магнитных сил. Когда заряженная частица находится в магнитном поле, на нее действует сила, направленная под прямым углом к направлению движения частицы и к направлению магнитного поля и пропорциональная произведению скорости частицы на величину магнитного поля и на синус угла между скоростью и полем.

А сила, действующая на обыкновенный мяч для гольфа, направлена под прямым углом к направлению его полета и к оси вращения и пропорциональна произведению скорости мяча на угловую скорость мяча и на синус угла между осью вращения и вектором скорости. Сравнивая две эти зависимости, вы видите, что сила, действующая на заряженную

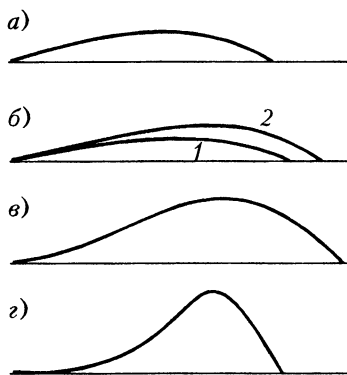


Рис. 8

частицу в магнитном поле, подобна силе, действующей на мяч для гольфа. Если считать, что направление магнитного поля соответствует направлению оси вращения, а его величина пропорциональна угловой скорости, то, наблюдая за поведением заряженных частиц в магнитном поле, мы получим представление о поведении вращающегося мяча для гольфа.

Давайте вначале рассмотрим воздействие «нижней закрутки» на полет мяча; в этом случае мяч вращается, как на рисунке 1,а, вокруг горизонтальной оси, расположенной под прямым углом к направлению полета. Для имитации этого вращения приложим горизонтальное магнитное поле под прямым углом к направлению полета частиц. Сделать это я могу с помощью электромагнита. Начнем с небольшой величины поля, моделирующей слабое вращение. Вы видите, как отличается траектория в этом случае (кривая 1 на рисунке 8,б) от траектории без магнитного поля; в начале полета траектория более плоская, хотя и остается несколько выпуклой, и длина пролета больше, чем раньше. Теперь я увеличу магнитное поле, и вы увидите, что длина пролета еще более увеличивается (рис.8,б, кривая 2). Если я еще более «закручу» наши частицы-мячи, увеличив магнитное поле, то начало траектории становится вогнутым, а не выпуклым, и длина пролета еще более возрастает (рис.8,в). Увеличим поле еще больше, и мы видим, что частица взмывает на большую высоту, а потом резко падает (рис.8,г); длина пролета при этом меньше, чем в предыдущем случае. Это – тоже знакомый тип траектории мяча для гольфа.

Но увеличивая еще больше магнитное поле, мы получаем тип полета, который, насколько мне известно, еще не наблюдался на игровых площадках для гольфа и который можно было бы получить, если бы мячу придали большее вращение, чем способны игроки в настоящее время. Вы видите, что на кривой на рисунке 9,а есть загиб, т.е. в части

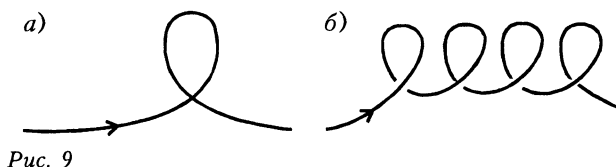


Рис. 9

траектории частица фактически движется назад. Увеличивая дальше поле, я получаю больше подобных завитушек на траектории (рис.9,б). Мы смоделировали тип удара, кото-

рый предоставляем осуществить будущим поколениям игроков в гольф.

До сих пор нами рассматривалась лишь закрутка мяча сверху или снизу. Давайте теперь проиллюстрируем боковую закрутку, при которой мяч вращается вокруг вертикальной оси. Следовательно, я должен расположить электромагнит так, чтобы он давал вертикально направленное магнитное поле. Я направляю поле вниз, и вы видите, что частицы отклоняются вправо — ведут себя, как мяч, закрученный справа налево (как на рисунке 2,б). Меняя направление поля на противоположное, мы увидим, что, подобно мячу с левой закруткой, частицы отклоняются влево. Увеличивая магнитное поле, мы можем получить значительно более сильную закрутку мяча, чем самые сильные из тех, что мы творим на игровых полях.

Хотя петли, изображенные на рисунке 9,а, насколько мне известно, не наблюдались, их можно получить, используя очень легкие мячи. Здесь у меня есть мяч, сделанный из очень тонкой резины — типа той, которая используется для детских воздушных шаров, — и заполненный воздухом. Весит такой мяч чуть больше того воздуха, который он вытесняет. Если ударить по нему рукой так, чтобы подкрутить его вверх, вы увидите, что он опишет петлю, как на рисунке 10. Если ударить по мячу так, чтобы придать ему вращение вокруг вертикальной оси, вы увидите, что он будет двигаться со страшно увеличенной закруткой вправо, если «нос» мяча движется вправо, и со столь же увеличенной левой закруткой, если «нос» мяча движется влево.

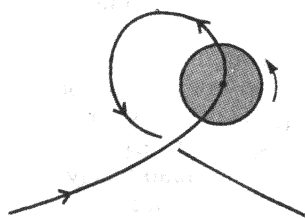


Рис. 10

Хорошо известным свойством ударов с боковой закруткой является то, что вызванный таким вращением изгиб траектории становится значительно более выраженным при уменьшении скорости мяча по сравнению с начальной. Это можно легко понять, если рассмотреть, как сказывается на движении в сторону уменьшение скорости в два раза. Предположим, что закрученный мяч вылетает из точки А в направлении на точку В. Закрутка вызовет смещение мяча, и он

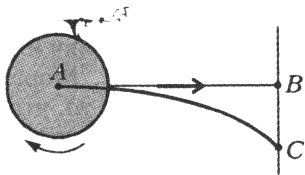


Рис. 11

попадет не в точку B , а в точку C (рис. 11). Как мы уже знаем, действующая в направлении BC сила пропорциональна произведению скорости мяча на угловую скорость его вращения. Пусть при разных начальных скоростях угловая скорость вращения одна и та же. Тогда, уменьшая в два раза скорость, мы уменьшаем в два раза действующую в сторону силу; следовательно, за то же время, что и раньше, мяч пролетит в два раза меньшее расстояние, и время, необходимое мячу для прохождения пути от A до B , удвоится. Перемещение, происходящее под действием постоянной силы, пропорционально квадрату времени; следовательно, если бы сила оставалась неизменной, отклонение в сторону (BC) возросло бы в четыре раза, но так как уменьшение скорости наполовину в два раза уменьшает силу, то смещение в сторону возрастает лишь вдвое.

Если бы угловая скорость уменьшалась столь же быстро, как и скорость перемещения, изгиб траектории при уменьшении скорости не увеличился бы. Но так как сопротивление воздуха оказывает большее воздействие на скорость мяча, чем на его вращение, быстрее уменьшается именно линейная скорость.

Влияние ветра на движение вращающегося мяча можно легко понять из общих принципов, которые мы обсудили в предыдущей части лекции. Рассмотрим сначала случай со встречным ветром, при котором увеличивается скорость мяча относительно воздуха. Так как сила, вызванная вращением, пропорциональна скорости, встречный ветер увеличивает эту силу, и эффекты вращения более выражены при встречном ветре, чем в спокойный день. Несомненно, игроки в гольф имели возможность это заметить.

Рассмотрим теперь влияние поперечного ветра. Для определенности предположим, что ветер дует слева направо. Тогда, если мяч закручен влево, давление на переднюю сторону мяча будет больше, чем на заднюю, и, таким образом, мяч будет тормозиться. Однако, если бы вращение было как при правой закрутке, давление на заднюю половину мяча было бы больше, чем на переднюю, и разность давлений подталкивала бы мяч и заставляла его пролететь дальше, чем в первом случае. Мораль заключается в следующем: если ветер дует слева, то, чтобы послать мяч дальше, мы должны использовать правую закрутку; если же ветер дует справа, мы должны закрутить мяч слева.

Времени, которое у меня осталось, хватит лишь на не-

сколько слов о том, как мяч получает вращение от клюшки. Если вы усвоили, что взаимодействие биты и мяча зависит только от их относительного движения и что оно остается тем же, независимо от того, закреплен ли мяч и движется клюшка или клюшка неподвижна и мяч летит на нее, основные моменты очень легко понять.

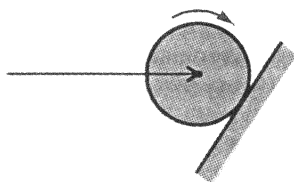


Рис. 12

Представим, что наклоненная плоскость на рисунке 12 – это часть головки поднятой для удара клюшки,двигающейся горизонтально справа налево. Удар будет таким же, как если бы клюшка покоилась, а мяч летел на нее горизонтально слева направо. Очевидно, что в этом случае мяч будет вкатываться вверх по поверхности, получая при этом вращение вокруг горизонтальной оси в направлении, показанном на рисунке; это – верхняя закрутка, увеличивающая дальность полета мяча. Предположим теперь, что поверхность клюшки движется при ударе вдоль направления PQ (рис.13). Удар будет

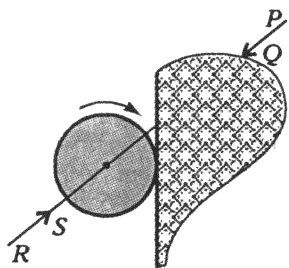


Рис. 13

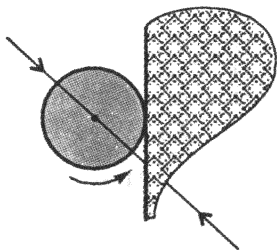


Рис. 14

таким же, как если бы клюшка покоилась, а мяч летел вдоль RS : мяч приобретает вращение вокруг вертикальной оси в направлении, показанном на рисунке. Это – правая закрутка. Если бы движение и положение клюшки были такими, как на рисунке 14, мяч был бы закручен влево.

ПРИГЛАШЕНИЕ В ПАРНУЮ (ИЛИ ФИЗИКА В БАНЕ)

И.И.Мазин

«Дивное видел я в Славянской земле на пути своем. Видел бани деревянные, и разожгут их докрасна, и разденутся, и будут наги, и обольются квасом, и возьмут прутья молодые, и бьют себя сами, и того добьются, что вылезут еле живы, и обольются водой студеной, и так оживут». Так описывается баня в русских летописях XI века. И по сей день любители бани с азартом «мучают» сами себя. Зачем? Говорят, что польза банных процедур связана с кратковременным воздействием на кожу высоких температур – горячего воздуха. Однако во влажном воздухе высокую температуру трудно выдерживать даже недолго. Так что в хорошей бане должно быть не только жарко, но и сухо.

Не так-то просто построить хорошую баню, да и «приготовить» пар, т.е., говоря научным языком, создать оптимальный микроклимат, тоже надо уметь. Наши предки умели это делать еще в XI веке, а вот объяснить, почему в бане нужно поступать так, а не иначе, они бы, пожалуй, не смогли. Но сегодняшний школьник знает достаточно, чтобы ответить на вопросы, которые задает любителям физики обычная парная. Начнем мы с того, что посмотрим как бы со стороны на банный «сеанс» и будем по ходу дела задавать себе вопросы. А потом попытаемся на них ответить.

Итак, в баню! А чтобы лучше ориентироваться, будем пользоваться рисунком 1.

Вот мы уже в парной. Ну и жара... Что ж, постоим немного внизу – здесь попрохладнее. Привыкли – можно и наверх. Горячо? Ничего, сегодня еще не очень жарко, бывает и так, что на горячий деревянный пол босой ногой не встанешь, да и на скамье не посидишь. А если скамья сколочена железными гвоздями, то на нее не стоит садиться и в не очень жаркой бане: прикоснешься голым телом к шляпке гвоздя – заработаешь ожог.

Вопрос 1. Почему в парной внизу холоднее, чем на полке?

Вопрос 2. Почему при той температуре, при которой еще можно сесть на нагретое дерево, садиться на железо уже нельзя – обожжешься?

Постепенно мы привыкаем к парной. Воздух уже не кажется таким горячим. Однако чувствуется, что он сырой – на скамейке, на полу мокрые пятна. Это можно исправить. Нужно, как говорят, «поддать пару»: взять кипятка и маленькими порциями, ковшиком, бросать его в печь на раскаленные камни. Сразу горячая волна пахнет из печи наверх, жарче станет на полке, жарче и суше; исчезнут мокрые пятна, высохнут пол и скамьи.

Вопрос 3. Почему, когда подбрасывают воду на горячие камни печи, в парной становится суше?



Рис. 1

Вопрос 4. Почему нужно подбрасывать воду понемногу, а не вылить в каменку сразу шайку воды?

Вопрос 5. Почему нужно бросать именно кипяток, а не холодную воду?

Но вот прошло больше часа. В парной побывало много народу, воздух уже не такой свежий, сырость, на полу листья от веников. Пора «чистить» парную. Это делается так. Все выходят минут на десять. За это время нужно подмести пол, окатить его водой из шланга; затем открыть настежь дверь в парную, снаружи около двери плеснуть на пол несколько шаек холодной воды; а потом начать поддавать пар. Свежий пар вытеснит старый, застоявшийся воздух парной. Теперь все готово, можно заходить и начинать все сначала.

Вопрос 6. Зачем нужна лужа холодной воды у входа в парную?

Вопрос 7. Почему свежий пар вытесняет старый воздух парной?

Итак, с правилами бани мы познакомились. Давайте отвечать на возникшие вопросы.

Первый вопрос был настолько прост, что на него, наверное, сразу ответил любой читатель. Так что начнем со второго вопроса.

Что происходит, когда человек наступает или садится на горячую скамью? Температура тела человека не больше 40 °С, в то время как температура воздуха, а следовательно, и скамеек в хорошей парной от 80 до 120 °С. При контакте начинается процесс передачи тепла от горячего тела (скамьи) к холодному (человеку). Как быстро идет процесс? Это определяется, в частности, теплопроводностью горячего тела. Чем больше теплопроводность материала, тем быстрее передается тепло от его более нагретых участков к менее нагретым. У железа, как и у других металлов, теплопроводность значительно больше, чем у дерева, – примерно в 300 раз. Когда мы соприкасаемся с горячей деревянной скамьей, остывает та ее часть, которая находится вблизи зоны контакта, и нам передается тепло, отнятое у малого объема скамьи. Иное дело, если в зоне контакта окажется гвоздь: тепло будет быстро «подтягиваться» к точкам соприкосновения со всей длины гвоздя. Кроме того, объемная теплоемкость (т.е. теплоемкость, рассчитанная на единицу объема) у железа примерно в 40 раз больше, чем у дерева, так что при одинаковых условиях остывания мы от куска железа получим в десятки раз больше тепла, чем от куска дерева того же объема.

Теперь, я думаю, вы сможете сами четко сформулировать ответ на вопрос 2. (Заметьте: мы ничего не говорили о теплопроводности и теплоемкости человеческого тела. Подумайте сами, какую роль играют эти характеристики в рассмотренном нами процессе.)

Чтобы ответить на следующие вопросы, давайте вспомним некоторые сведения из молекулярной физики, в частности — о водяном паре.

Вода, как известно, может находиться в трех агрегатных состояниях: твердом — лед, жидком — собственно то, что мы и называем водой, и газообразном — пар. Что касается льда, то он прямого отношения к бане не имеет, а вот про воду и пар поговорим.

Вода может превращаться в пар — это испарение, а пар может превращаться в воду — это конденсация. При испарении воды поглощается тепло, а при конденсации той же массы пара выделяется такое же количество теплоты. В атмосфере всегда имеется некоторое количество водяного пара. Например, в жилой комнате в 1 м^3 воздуха обычно содержится около 10 г пара. Плотность водяного пара в воздухе называют абсолютной влажностью.

Поставим в комнате блюдо с водой. Вода будет испаряться, и со временем вся превратится в пар. При этом абсолютная влажность в комнате повысится, но не намного — объем комнаты обычно несколько десятков кубических метров, и если в блюде было 10 г воды, то влажность увеличилась не более чем на 1 г/м^3 . А если такое же блюдо поместить в сосуд объемом 1 л (т.е. 10^{-3} м^3) и закрыть его? Количество воды в блюде будет уменьшаться до тех пор, пока пар в сосуде не станет насыщенным. А это произойдет тогда, когда число молекул, вылетающих из воды за единицу времени, и число молекул, переходящих за единицу времени из пара в воду, сравняются. И с этого времени абсолютная влажность воздуха в сосуде не будет изменяться. (Разумеется, мы имеем в виду, что температура сосуда все время остается постоянной.) Таким образом, при каждой температуре существует максимальная абсолютная влажность воздуха, равная плотности насыщенного водяного пара при этой температуре. Чем выше температура, тем больше значение плотности насыщенного пара.

Понятно, что чем меньше абсолютная влажность воздуха по отношению к максимально возможной при данной темпе-

ратуре, тем интенсивнее идет испарение воды. Отношение абсолютной влажности к плотности насыщенного пара при данной температуре называют относительной влажностью, ее обычно измеряют в процентах. Поскольку давление пара пропорционально его плотности, относительную влажность можно определить по-другому: это есть выраженное в процентах отношение парциального давления водяного пара к давлению насыщенного пара при данной температуре.

Давление насыщенного пара, как и его плотность, тем больше, чем выше температура. График на рисунке 2 демонстрирует эту зависимость. Очевидно, что повышение абсолют-

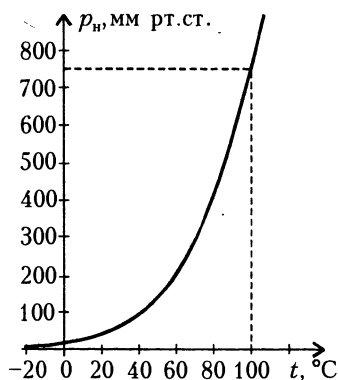


Рис. 2

ной влажности при постоянной температуре воздуха ведет к увеличению относительной влажности. Если же при неизменной абсолютной влажности температура воздуха понижается, то относительная влажность будет расти. При некоторой температуре она достигнет 100% — пар в воздухе станет насыщенным, начнется его конденсация (появится туман, выпадет роса). Температуру, при которой это происходит, называют точкой росы. А если увеличивается абсолютная влаж-

ность и растет температура? Тогда изменение относительной влажности будет зависеть от того, что растет быстрее: плотность пара в воздухе или давление насыщенных паров.

Ну, а теперь вернемся к нашим вопросам.

Мы выяснили, что скорость испарения определяется не абсолютной влажностью, а относительной. Если при подбрасывании кипятка в каменку в парной становится суше, значит, относительная влажность уменьшается (а абсолютная, конечно, увеличивается). Почему это происходит? Когда небольшое количество воды с силой бросают в печку, она разбрызгивается в маленькие капельки. Попадая на камни, разогретые до температуры в сотни градусов, капельки мгновенно испаряются, превращаясь в пар, температура которого сравнима с температурой самих камней. Раскаленный пар вырывается из печки, общая температура воздуха в парной повышается. Более высокой температуре соответствует более вы-

сокая плотность насыщенного пара, и, значит, даже с учетом увеличения абсолютной влажности, относительная влажность может уменьшаться. Это и происходит на самом деле.

Понятно, почему нужно бросать воду именно маленькими порциями. Большая порция упадет на камни сравнительно большой «каплей». Такая «капля» не сможет испариться так быстро, как маленькая, а просто начнет кипеть, образуя пар с температурой 100°C или, может быть, немного выше. Но нас это не устроит. Весь секрет – в быстротечности процесса! По этой же причине нельзя бросать холодную воду. Ведь у камня довольно низкая теплопроводность, поэтому даже маленькая капля, пока будет нагреваться до 100°C , успеет несколько охладить ту часть камня, с которой соприкасается, а значит, температура образующегося пара упадет.

Итак, на вопросы 3, 4 и 5 мы ответили. Вопрос 6 для нас теперь несложен. Вблизи лужи температура ниже, чем точка росы. Поэтому выходящий из парилки «отработанный» пар начинает быстро конденсироваться, или, как говорят, «сидиться» на луже. В хорошей парилке дверь и печь расположены в разных концах: горячий пар, образующийся у каменки, пройдя всю парилку, охлаждается и конденсируется на выходе.

И наконец, последний вопрос: почему свежий пар вытесняет старый воздух парной?

Вспомним, что при «чистке» парной в печь набросали несколько шаек кипятка, т.е. не меньше десяти килограммов воды. Температура образовавшегося из этой воды пара – около 300°C . При такой температуре и при давлении в 1 атмосферу 10 кг водяного пара занял бы объем более 25 м^3 . Можно сказать, что мы в течение небольшого времени ввели в помещение такое количество пара, которое само занимает примерно $1/3$ объема этого помещения. Пар этот горячий, поэтому он поднимается вверх и вытесняет старый воздух вниз.

Ну, вот, а теперь, когда с физикой все стало ясно, можно приступать к практическим занятиям. Легкого пара, дорогой читатель!

ИГРУШКИ ПО ФИЗИКЕ

С.С.Кротов, А.И.Черноуцан

Предлагаем вашему вниманию статью, в которой описываются небольшие опыты, демонстрации, физические сюрпризы. Иногда (но не всегда) предлагаемую «установку» легко изготовить самостоятельно, и тогда можно экспериментировать, размышлять и совершенствовать «игрушку». Вот — несколько примеров.

Бутылка, кольцо и ... импульс. Начнем с очень простого опыта-демонстрации. Для него нужны всего три предмета: бутылка, желательно невысокая (например, из-под кетчупа); кольцо из плотного картона диаметром 10—15 см и шириной 8—10 мм, так чтобы его можно было поставить вертикально на горлышко бутылки; небольшая палочка длиной 4—5 см (например, из стекла, дерева и т.д.), которая должна устойчиво стоять в вертикальном положении и свободно проходить в горлышко бутылки. Вместо палочки можно попробовать взять маленький кубик или шарик со спиленной (для устойчивости) площадкой.

Поставим кольцо на бутылку, а палочку — на кольцо (рис. 1). Если теперь ловко и правильно выбить кольцо из-под палочки, то она со звоном упадет в бутылку.

Эта незамысловатая игрушка наглядно иллюстрирует тот факт, что за время удара импульс горизонтальной силы трения, действующей на палочку, не успевает сообщить ей сколько-нибудь заметный импульс в горизонтальном направлении — палочка падает практически вертикально. Возможно, этот опыт напомнит вам известную демонстрацию, в которой ударом палки выбивают спичечный коробок из-под стакана с водой, а стакан остается почти на месте. Однако в нашем случае есть одна хитрость, которую вы сможете обнаружить, если ваша

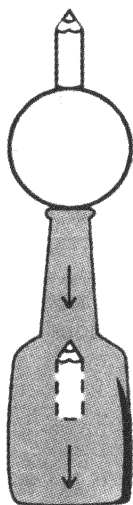


Рис. 1

палочка будет упорно отказываться попадать в бутылку. Скорее всего, вы наносите удар «неправильно». В чем ваша ошибка? Как надо правильно ударить по кольцу?

[Оказывается, удар надо наносить по внутренней стороне кольца — тогда кольцо деформируется так, что его верхняя точка смещается вниз и взаимодействия кольца с палочкой практически не происходит. Если же ударить по внешней стороне кольца, то палочку подбросит вверх, и ей вряд ли удастся попасть в бутылку.]

Поплавок в бутылке. Для создания новой игрушки вам понадобятся всего два предмета — поплавок на нитке и бутылка, лучше пластиковая с герметично закручивающейся пробкой. Налейте в бутылку воды, опустите туда поплавок и, оставив снаружи «хвостик» нитки, закрутите пробку. Осталось перевернуть бутылку горлышком вниз — и «прибор» готов. Проверьте, чтобы поплавок находился целиком под водой и натягивал закрепленную внизу нитку, а длина нитки составляла 10 — 15 см. (Впрочем, все наши советы носят чисто рекомендательный характер — возможно, вы подберете более удобную конструкцию, например возьмете широкую банку и сможете закрепить конец нитки в середине крышки.)

Теперь — за эксперименты.

Удерживая бутылку строго вертикально, начните двигать ее поступательно с горизонтальным ускорением. Что произойдет с поплавком? Куда он отклонится при разгоне и при торможении? Чтобы время разгона (и торможения) было не слишком маленьким, лучше не стоять на месте (работать только руками), а активно передвигаться по комнате. А можно ли угадать заранее, до экспериментов, каким должно быть отклонение поплавка? («Наводящий» вопрос: будет ли оно таким же, как у грузика на нити, если его разгонять, держа за конец нити?)

Проделайте еще один опыт — с вращательным движением. Удерживая бутылку с поплавком на расстоянии вытянутой руки (для увеличения радиуса), начните по возможности быстро поворачиваться вокруг своей оси. А еще лучше — закрепите бутылку в штативе, а штатив поставьте на вращающуюся платформу. Куда отклонится поплавок — внутрь, т.е. к оси вращения, или наружу? Опять попробуйте заранее угадать ответ. («Наводящая» подсказка: вспомните аттракцион «чертова карусель».)

Проделав эксперименты, вы, будем надеяться, убедились, что поплавок всякий раз отклоняется по ускорению, а не

против, как это наблюдается в случае грузика на нити или на «чертовой карусели». (Теперь вам понятно, почему слова «наводящий» и «наводящая» были взяты в кавычки?) Попробуем разобраться, в чем тут дело.

Начнем с грузика на нити. На ускоряющийся грузик действуют две силы — сила тяжести и сила натяжения нити (рис. 2). Горизонтальное ускорение грузику сообщает горизонтальная составляющая силы натяжения, из чего ясно, что нить отклоняется против ускорения (чтобы эта составляющая была направлена по ускорению). Запишем второй закон Ньютона в проекциях на горизонтальное и вертикальное направления:

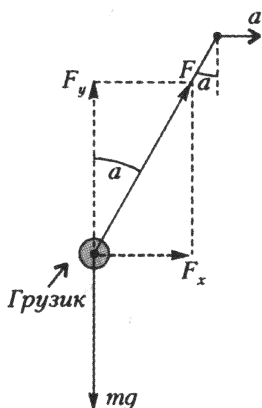


Рис. 2

$$F_x = ma, F_y - mg = 0,$$

откуда найдем угол отклонения нити:

$$\alpha = \operatorname{arctg} \frac{F_x}{F_y} = \frac{a}{g}.$$

Вернемся к поплавку. На него, кроме силы тяжести и силы натяжения нитки, действует еще сила Архимеда со стороны воды. Читателю, который раньше не сталкивался с подобными ситуациями, может показаться, что эта сила не должна влиять на направление отклонения поплавка. «Действительно, — рассуждает он, — ведь известно, что выталкивающая сила выталкивает, т.е. действует вверх, и горизонтальное ускорение опять создается только натяжением нити; значит, поплавок тоже должен отклоняться против ускорения». Ошибка заключается в том, что читатель привык применять закон Архимеда к телам, находящимся в покоящейся жидкости. Если же жидкость (или газ) с погруженным в нее телом сама движется с ускорением, то закон Архимеда видоизменяется. Чтобы выяснить, как именно, воспользуемся известным методом «подмены».

Мысленно заменим погруженное тело жидкостью. На выделенный элемент жидкости (в объеме тела) действуют только две силы — сила тяжести и сила Архимеда (рис.3,а). Под действием этих сил он вместе со всей жидкостью движется с ускорением \vec{a} ; следовательно, сила Архимеда, кроме вертикальной составляющей $F_{Ay} = m_{ж}g$, должна иметь и

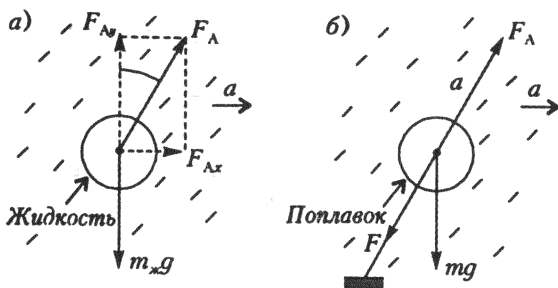


Рис. 3

горизонтальную составляющую $F_{Ax} = m_{\text{ж}} a$. Но сила Архимеда, действующая на выделенный объем, не зависит от того, что именно находится в этом объеме — жидкость или погруженное тело. Значит, в жидкости, движущейся с ускорением, изменяется как величина, так и направление силы Архимеда. И происходит это потому, что распределение давлений в объеме жидкости устанавливается таким, чтобы обеспечить ускоренное движение всех элементов жидкости.

Теперь мы можем записать второй закон Ньютона для поплавка (рис.3,б) в проекциях на горизонтальное и вертикальное направления:

$$m_{\text{ж}} a - F_x = m a, \quad m_{\text{ж}} g - F_y - m g = 0.$$

Отсюда получаем

$$\alpha = \arctg \frac{F_x}{F_y} = \frac{(m_{\text{ж}} - m) a}{(m_{\text{ж}} - m) g} = \frac{a}{g},$$

т.е. угол отклонения нити оказался таким же по величине, как в случае грузика на нити.

Чтобы сделать этот результат более наглядным, запишем закон Ньютона для грузика, жидкости и поплавка в векторном виде:

$$m \vec{g} + \vec{F} = m \vec{a}, \quad \text{или} \quad \vec{F} = -m(\vec{g} - \vec{a}),$$

$$\vec{F}_A + m_{\text{ж}} \vec{g} = m_{\text{ж}} \vec{a}, \quad \text{или} \quad \vec{F}_A = -m_{\text{ж}}(\vec{g} - \vec{a}),$$

$$m \vec{g} + \vec{F} + \vec{F}_A = m \vec{a}, \quad \text{или} \quad \vec{F} = (m_{\text{ж}} - m)(\vec{g} - \vec{a}).$$

Видно, что все формулы выглядят так, как будто мы поместили покоящийся сосуд с жидкостью в поле тяжести с

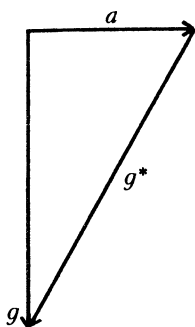


Рис. 4

ускорением свободного падения, равным (рис.4)

$$\vec{g}^* = \vec{g} - \vec{a}.$$

Оказывается, это свойство является общим: переход в неинерциальную систему отсчета, движущуюся поступательно с ускорением \vec{a} , сводится к переопределению силы тяжести.

Отметим, что такой же результат верен и для вращающейся системы отсчета, но только для тел, которые в этой системе покоятся. В этом случае под ускорением \vec{a} надо понимать центростремительное ускорение той точки, где находится тело (т.е. ускорение самого тела относительно неподвижного наблюдателя).

В заключение (чтобы проверить, все ли вы поняли и насколько хорошо) попробуйте ответить на следующие вопросы:

- Куда отклонится воздушный шарик над вашей головой, если вы, не выпуская из руки нить, начнете двигаться с ускорением?

[Против ускорения.]

- Куда отклоняется воздушный шарик, если вы находитесь в салоне самолета, быстро набирающего скорость перед взлетом?

[По ускорению.]

- Куда отклонится пламя свечи, если вы закроете ее колпаком и начнете перемещать с ускорением? А если просто пойдете со свечой в руке, не накрывая ее?

[Под колпаком – по ускорению, без колпака – против ускорения.]

- Под каким углом наклонена поверхность жидкости в сосуде, движущемся горизонтально с ускорением a ?

[Под углом $\alpha = \arctg(a/g)$ к горизонту.]

- Поплавок плавает на поверхности воды. Изменится ли глубина его погружения, если сосуд перемещать вверх или вниз с ускорением?

[Не изменится.]

- Чему равен период колебаний математического маятника, подвешенного к потолку лифта, поднимающегося с ускорением a ; к потолку вагона, ускорение которого равно a ?

Длина нити маятника l .

$$[T_1 = 2\pi\sqrt{l/(g+a)}; T_2 = 2\pi\sqrt{l/\sqrt{g^2 + a^2}}.]$$

И опять поплавок в бутылке. Налейте в бутылку воду (не до самого верха), поместите туда маленькое тело, которое плавает на поверхности («поплавок»), а бутылку наглухо закройте. Можно ли теперь, не открывая бутылку, заставить поплавок опуститься на дно?

Оказывается, можно. Только для этого нужны, во-первых, специальная бутылка и, во-вторых, специальный поплавок. С бутылкой все просто – возьмите не стеклянную, а мягкую пластиковую бутылку. Сжимая такую бутылку руками, можно увеличивать давление воздуха в бутылке, не нагревая ее и не накачивая в нее воздух насосом. Однако увеличение давления не приведет ни к каким видимым глазом эффектам, если поплавок будет представлять собой обычное сплошное тело, например – деревянный шарик. Мало того, на первый взгляд увеличение давления может даже привести к обратному эффекту – небольшому уменьшению глубины погружения поплавка. В самом деле, сила тяжести поплавка уравновешивается выталкивающей силой не только со стороны воды, но и со стороны воздуха. Сжимая бутылку, мы увеличиваем вес вытесненного поплавком воздуха, значит, должен немного уменьшиться вес вытесненной воды. Как же пересилить этот эффект и заставить поплавок, наоборот, сильнее погрузиться?

Этого можно добиться, создав поплавок, объем которого заметно уменьшается при увеличении внешнего давления. Тогда он будет погружаться сильнее и может даже утонуть. Но из чего же сделать такой поплавок? Где взять материал, обладающий такой сильной сжимаемостью? Оказывается, поплавок надо сделать... из воздуха.

Представьте себе полое тело с отверстием, плавающее отверстием вниз. При увеличении давления в бутылке воздух сжимается, вода заходит внутрь поплавка, и его «объем» уменьшается. Если подобрать вес поплавка так, чтобы в обычном состоянии над водой выступала его малая часть, то при соответствующем увеличении давления поплавок утонет. Уменьшим давление рук на бутылку – и поплавок послушно всплывет.

В качестве такого поплавка проще всего взять обычную медицинскую пипетку. Начальную глубину погружения плавающей пипетки легко отрегулировать, набрав в нее немного

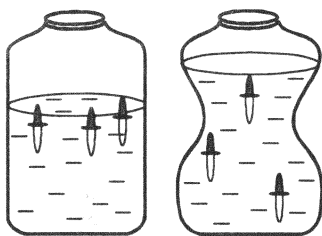


Рис. 5

воды (надо, чтобы верх пипетки выступал на 2–3 мм). Сжимая бутылку все сильнее, наблюдайте за уровнем воды в пипетке — хорошо видно, как он поднимается. А еще лучше — поместите в бутылку несколько пипеток, покрасив их в разные цвета и отрегулировав их на разные давления (рис. 5). Сжимаете

бутылку — пипетки тонут одна за другой, отпускаете — они всплывают в обратном порядке.

Напоследок отметим, что «тонущие поплавки» придуманы очень давно, авторство приписывают Декарту (Картезию) и поэтому называют их «картезианскими водолазиками».

Механический «стробоскоп». Новая игрушка для любознательных физиков выглядит весьма просто (рис.6). Это

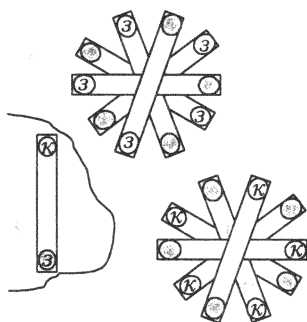


Рис. 6

легкая пластмассовая трубочка длиной (l) приблизительно 80 мм и диаметром (d) 16 мм с толщиной стенок около 1 мм (так что трубочка достаточно жесткая). Трубочка светлая, на одном ее конце яркой краской нанесено красное пятнышко размером примерно 3 мм, на другом — такое же зеленое пятнышко.

Признаемся честно, эту игрушку мы получили в подарок — один из наших авторов приобрел ее в специализированном амери-

канском магазине «физических штучек». Но думаем, что читателям будет нетрудно изготовить такую игрушку самостоятельно или даже отыскать готовый аналог среди окружающих предметов.

Внешне трубочка ничего особенного из себя не представляет. Чудеса начинаются, когда мы кладем трубочку на гладкий стол и приводим в движение, надавив пальцем на один из ее концов. Выскакивая из-под пальца, трубочка начинает быстро вращаться. Присмотревшись, мы видим на равных расстояниях друг от друга 5 почти неподвижных точек, причем, что самое удивительное, все эти точки... одного цвета! Каждый раз видимым оказывается то пятно, которое находилось возле

нашего пальца, когда мы приводили трубочку в движение. Если надавить на «красный» конец, то увидим пять красных точек, если на «зеленый» — то пять зеленых. Пятно другого цвета при этом как бы исчезает

Что происходит? Почему мы видим именно пять точек? Почему эти точки кажутся неподвижными? Куда подевалось пятнышко другого цвета и почему мы его не видим? В чем здесь аналогия (конечно, весьма условная) со стробоскопом?

Объяснение наблюдаемому явлению будет состоять из двух частей. Первая призвана описать, как движется трубочка, точнее — как она должна двигаться, чтобы мы видели именно то, что видим. Вторая часть должна объяснить, почему трубочка движется именно так. Но — все по порядку.

Выскакивая из-под пальца, трубочка приобретает сразу три движения: одно поступательное (трубочка некоторое время движется по столу, удаляясь от руки) и два вращательных — вокруг вертикальной оси, проходящей через центр трубочки, и вокруг оси трубочки. Спустя некоторое время, поступательное движение прекращается, и трубочка только вращается на месте. К этому моменту устанавливается вполне определенное соотношение между угловыми скоростями двух вращательных движений: $\omega_2 \approx 5\omega_1$, которое напрямую связано с отношением длины трубочки к ее диаметру (которое в данном случае равно пяти): $l \approx 5d$. Почему это происходит — вопрос довольно сложный, если рассматривать его в рамках динамики, где решающую роль играют силы трения. Мы примем это утверждение без дополнительных обсуждений как установленный экспериментальный факт, с помощью которого постараемся объяснить, почему мы видим 5 неподвижных точек одного цвета.

За время одного оборота вокруг вертикальной оси трубочка успевает пять раз повернуться вокруг своей центральной оси. Значит, за это время та сторона трубочки, на которую нанесены цветные точки, пять раз окажется наверху. Так как при каждом последующем обороте эти пять положений будут находиться практически в тех же самых местах, то, благодаря инертности зрения, цветные пятнышки, которые мы видим в этих положениях, будут сливаться в пять неподвижных точек. (Именно такой эффект достигается при стробоскопическом освещении вращающегося круга: если светлый круг с нанесенной на его краю темной меткой в темноте привести во вращение и освещать короткими вспышками с частотой, кратной частоте вращения, то из-за инертности зрения мы

увидим светлый круг с несколькими неподвижными метками.)

Но почему же мы видим точки только одного цвета, ведь сверху одновременно оказываются оба пятнышка? Объяснение кроется также в инертности зрения. В тот момент, когда оба пятна оказываются наверху, скорость одного из них равна разности скоростей v_1 и v_2 , которые оно имеет за счет участия в двух вращательных движениях, а скорость другого — сумме этих скоростей. Благодаря соотношению между угловыми скоростями, v_1 и v_2 почти равны друг другу: $v_1 = \omega_1 l/2$, $v_2 = \omega_2 d/2$. В результате одно из пятен (то, которое в момент «запуска» находилось под пальцем) оказывается практически неподвижным, а другое движется с приличной скоростью. Благодаря инертности зрения, мы видим только неподвижное пятно, а другое пятно как бы не успеваем заметить.

Итак, мы установили, как должна двигаться трубочка, чтобы были видны пять неподвижных точек одного цвета. Главное — в течение заметного времени должно поддерживаться вполне определенное отношение угловых скоростей. Имеющееся у нас объяснение этого факта кажется нам слишком громоздким и сложным, и мы решили не приводить его здесь. Вместо этого мы призываем читателей попытаться найти свое объяснение тому, как устанавливается необходимое соотношение между угловыми скоростями и как оно поддерживается. (Один совет: не пытайтесь рассуждать чисто теоретически, умозрительно, а обязательно изготовьте хотя бы одну действующую модель трубочки и наблюдайте за ее движением.)

Фокус с шариком. В предыдущих случаях мы играли в игрушки, которые иллюстрировали действие законов механики. Теперь перейдем к изучению молекулярной физики и термодинамики.

Начнем с очень простой игрушки, посвященной газовым законам. Для ее изготовления вам понадобятся всего три предмета: воздушный шарик (лучше круглый) и два легких пластиковых стаканчика. Собственно, изготавливать ничего и не надо — просто начните надувать воздушный шарик. Когда шарик уже примет круглую форму, но еще не будет накачан достаточно сильно, прижмите к нему с двух противоположных сторон пластиковые стаканчики. Продолжайте надувать шарик, и через некоторое время отпустите стаканчики. Если вы сделали все правильно, то увидите, что стаканчики не падают, а держатся — как будто чем-то приклеенные.

Вы уже готовы объяснить, какой же «клей» удерживает стаканчики?

[Когда мы прижали стаканчики к слабо надутому шарiku, воздух в стаканчиках оказался запертым резиновой пленкой. По мере надувания шарика кривизна его поверхности уменьшалась, а объем воздуха в стаканчиках увеличивался, что и привело к уменьшению давления в стаканчиках по сравнению с атмосферным.]

Холодное кипение. Как известно, чтобы довести воду до кипения, ее надо нагревать. А можно ли вскипятить воду... охлаждением? На первый взгляд, это невозможно. Но не торопитесь с выводами. Прodelайте описанный ниже простой эксперимент и поразмышляйте над его объяснением.

Для опыта вам понадобится химическая пробирка объемом 30—40 мл, плотно закрываемая пробкой, газовая горелка, держатель для пробирки (можно использовать, например, деревянную прищепку). Приготовьте также бутылку с холодной водой (при комнатной температуре) и бутылку с ледяной водой (заранее поставьте пластиковую бутылку с водой в морозильник, но не дайте воде полностью замерзнуть).

Налейте в пробирку воду, немного больше половины объема пробирки, и начните нагревать воду над горелкой. Важный момент: держите пробирку наклонно и старайтесь нагревать верхнюю часть водяного столба, возле самой поверхности (если нагревать воду в нижней части, то при закипании расширяющиеся пары могут резко выбросить воду из пробирки). Дождитесь, пока установится интенсивное и устойчивое кипение верхней части воды, после чего быстро и плотно закройте пробирку, одновременно отодвинув ее от огня. Как и следовало ожидать, кипение немедленно прекратится. Теперь переверните пробирку пробкой вниз и полейте верхнюю (пустую) часть пробирки холодной водой. Как вы думаете, что произойдет? Вода в пробирке начнет кипеть! Через некоторое время кипение, разумеется, прекратится, но возобновится после повторного орошения пробирки холодной водой. Когда холодный «душ» перестанет действовать (к этому времени остывшую пробирку можно будет держать рукой), полейте пустую часть пробирки ледяной водой — и вода в прохладной пробирке послушно закипит еще раз!

Описанный эксперимент наглядно иллюстрирует физическую сущность процесса кипения: кипение начинается тогда, когда давление насыщенного пара при температуре жидкости сравнивается с давлением в жидкости. В этом случае образу-

ющиеся внутри жидкости пузырьки, наполненные паром, перестают схлопываться, растут, всплывают к поверхности и там лопаются. Для поддержания заметного кипения необходим приток энергии, компенсирующий потери на интенсивное парообразование.

Возле открытой поверхности воды в нашей пробирке кипение начинается примерно при $100\text{ }^{\circ}\text{C}$, когда давление насыщенных паров воды равно давлению окружающего воздуха, т.е. примерно 100 кПа . Интенсивный поток пара вытесняет из пробирки почти весь воздух, и после закрывания пробирки в ее свободной части остается практически только насыщенный пар. При обливании пробирки холодной водой температура и давление пара падают, соответственно уменьшается и давление на воду, а температура ее измениться не успевает. Значит, давление воды становится ниже давления насыщенного пара при температуре воды, и ... начинается кипение. Энергия, необходимая для поддержания кипения, берется у остывающей воды. Поэтому через некоторое время температура воды понизится (а давление в пробирке повысится), и кипение прекратится.

При последовательных поливаниях пробирки сначала холодной, а затем и ледяной водой температура воды и насыщенного пара постепенно уменьшается, и в конце опыта давление в пробирке оказывается совсем маленьким (так, при $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ давление насыщенного пара почти в 17 раз меньше атмосферного). Чтобы проверить это, достаточно вынуть пробку — вы услышите хлопок воздуха, входящего в пробирку. Есть еще один, очень красивый, способ убедиться в том, что над водой находится «почти пустота». Попробуйте установить пробирку вертикально и резко встряхнуть ее в вертикальном направлении — вы услышите необычный звук, как будто в пробирке находится не вода, а нечто жесткое. Причина как раз и состоит в отсутствии над водой воздуха, препятствующего ее свободному резкому движению.

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие	3
ФИЗИКА И ФИЛОСОФИЯ	
Апология физики. <i>М.И.Каганов</i>	5
Что есть мысль? <i>В.В. Мещеряков</i>	13
ФИЗИКА И БИОЛОГИЯ	
Самая главная молекула. <i>М.Д.Франк-Каменецкий</i>	24
«Зеленая, зеленая трава...». <i>И.Э.Лалаянц, Л.С.Милованова</i>	33
Хищник и жертва. <i>К.Ю.Богданов</i>	39
Большие и маленькие на прогулке. <i>К.Ю.Богданов</i>	50
Фауна и Флора. <i>А.Б.Минеев</i>	57
От мыши до слона. <i>А.Б.Минеев</i>	65
Как мы дышим? <i>К.Ю.Богданов</i>	73
Волны в сердце. <i>А.С.Михайлов</i>	80
Ультразвук в медицине. <i>Р.Морин, Р.Хобби</i>	89
Об интерференции, дельфинах и летучих мышах. <i>А.Н.Духовнер,</i> <i>А.Л.Решетов, Л.А.Решетов</i>	93
С какой скоростью растет зеленый лист? <i>А.А.Веденов, О.П.Иванов</i>	99
О высоких деревьях. <i>А.Б.Минеев</i>	112
ФИЗИКА И ХИМИЯ	
Физика химического взаимодействия. <i>О.Н.Карпунин</i>	126
ФИЗИКА И КРИМИНАЛИСТИКА	
Нейтроны ищут убийцу. <i>А.С.Штейнберг</i>	135
Физика против мошенников. <i>И.Э.Лалаянц, Л.С.Милованова</i>	140
ФИЗИКА И МЕТЕОРОЛОГИЯ	
Поговорим немного о погоде. <i>Б.М.Бубнов</i>	149
ФИЗИКА И СПОРТ	
Бег, ходьба и физика. <i>И.А.Урусовский</i>	157
Физика на горной реке. <i>И.Ф.Гинзбург</i>	166
Нужна ли альпинисту физика? <i>А.Б.Геллер</i>	178
Размышления физика-альпиниста. <i>Дж.Вайли</i>	185
О чем не думает горнолыжник. <i>А.А.Абрикосов (мл.)</i>	194
О динамике мяча для игры в гольф. <i>Дж.Дж.Томсон</i>	208
Приглашение в парную (или Физика в бане). <i>И.И.Мазин</i>	220
ФИЗИКА И ИГРУШКИ	
Игрушки по физике. <i>С.С.Кротов, А.И.Черноуцан</i>	226

ФИЗИКА И ...

Библиотечка «Квант»

Выпуск 87

Научный редактор *А.И.Черноуцан*

Редактор *В.А.Тихомирова*

Оформление художника *А. Е.Пацхверия*

Технический редактор *Е.В.Морозова*

Компьютерная группа *Е.А.Митченко, Л.В.Калиничева*

ИБ № 53

Формат 84×108 1/32. Бум. офс. нейтр. Гарнитура кудряшевская

Печать офсетная. Объем 15 печ. л. Тираж 2500 экз. Заказ 168.

117296 Москва, Ленинский пр., 64-А, «Квант»

Отпечатано на Ордена Трудового Красного Знамени ГУП Чеховский полиграфический комбинат Министерства Российской Федерации по делам печати, телерадиовещания и средств массовых коммуникаций

142300, г.Чехов Московской области

Тел. (272) 71-336. Факс (272) 62-536

ВЫШЛИ ИЗ ПЕЧАТИ В СЕРИИ «БИБЛИОТЕЧКА «КВАНТ»

1. *М.П.Бронштейн*. Атомы и электроны
2. *М.Фарадей*. История свечи
3. *О.Оре*. Приглашение в теорию чисел
4. Опыты в домашней лаборатории
5. *И.Ш.Слободецкий, Л.Г.Асламазов*. Задачи по физике
6. *Л.П.Мочалов*. Головоломки
7. *П.С.Александров*. Введение в теорию групп
8. *В.Г.Штейнгауз*. Математический калейдоскоп
9. Замечательные ученые
10. *В.М.Глушков, В.Я.Валах*. Что такое ОГАС?
11. *Г.И.Копылов*. Всего лишь кинематика
12. *Я.А.Сморodinский*. Температура
13. *А.Е.Карпов, Е.Я.Гук*. Шахматный калейдоскоп
14. *С.Г.Гиндикин*. Рассказы о физиках и математиках
15. *А.А.Боровой*. Как регистрируют частицы
16. *М.И.Каганов, В.М.Цукерник*. Природа магнетизма
17. *И.Ф.Шарыгин*. Задачи по геометрии: планиметрия
18. *Л.В.Тарасов, А.Н.Тарасова*. Беседы о преломлении света
19. *А.Л.Эфрос*. Физика и геометрия беспорядка
20. *С.А.Пикин, Л.М.Блинов*. Жидкие кристаллы
21. *В.Г.Болтянский, В.А.Ефремович*. Наглядная топология
22. *М.И.Башмаков, Б.М.Беккер, В.М.Гольховой*. Задачи по математике: алгебра и анализ
23. *А.Н.Колмогоров, И.Г.Журбенко, А.В.Прохоров*. Введение в теорию вероятностей
24. *Е.Я.Гук*. Шахматы и математика
25. *М.Д.Франк-Каменецкий*. Самая главная молекула
26. *В.С.Эдельман*. Вблизи абсолютного нуля
27. *С.Р.Филонович*. Самая большая скорость
28. *Б.С.Бокштейн*. Атомы блуждают по кристаллу
29. *А.В.Бялко*. Наша планета – Земля
30. *М.Н.Аршинов, Л.Е.Садовский*. Коды и математика
31. *И.Ф.Шарыгин*. Задачи по геометрии: стереометрия
32. *В.А.Займовский, Т.Л.Колупаева*. Необычные свойства обычных металлов
33. *М.Е.Левинштейн, Г.С.Симин*. Знакомство с полупроводниками
34. *В.Н.Дубровский, Я.А.Сморodinский, Е.Л.Сурков*. Релятивистский мир
35. *А.А.Михайлов*. Земля и ее вращение
36. *А.П.Пурмаль, Е.М.Слободецкая, С.О.Травин*. Как превращаются вещества
37. *Г.С.Воронов*. Штурм термоядерной крепости
38. *А.Д.Чернин*. Звезды и физика
39. *В.Б.Брагинский, А.Г.Полнарев*. Удивительная гравитация
40. *С.С.Хилькевич*. Физика вокруг нас
41. *Г.А.Звенигородский*. Первые уроки программирования

42. Л.В.Тарасов. Лазеры: действительность и надежды
43. О.Ф.Кабардин, В.А.Орлов. Международные физические олимпиады школьников
44. Л.Е.Садовский, А.Л.Садовский. Математика и спорт
45. Л.Б.Окунь. $\alpha \beta \gamma \dots Z$: элементарное введение в физику элементарных частиц
46. Я.Е.Гегузин. Пузыри
47. Л.С.Малочник. Свидание с кометой
48. А.Т.Филиппов. Многоликий солитон
49. К.Ю.Богданов. Физик в гостях у биолога
50. Занимательно о физике и математике
51. Х.Рачлис. Физика в ванне
52. В.М.Липунов. В мире двойных звезд
53. И.К.Кикоин. Рассказы о физике и физиках
54. Л.С.Питрягин. Обобщения чисел
55. И.Д.Данилов. Секреты программируемого микрокалькулятора
56. В.М.Тихомиров. Рассказы о максимумах и минимумах
57. А.А.Силин. Трение и мы
58. Л.А.Ашкинази. Вакуум для науки и техники
59. А.Д.Чернин. Физика времени
60. Задачи московских физических олимпиад
61. М.Б.Балк, В.Г.Болтянский. Геометрия масс
62. Р.Фейнман. Характер физических законов
63. Л.Г.Алмазов, А.А.Варламов. Удивительная физика
64. А.Н.Колмогоров. Математика – наука и профессия
65. М.Е.Левинштейн, Г.С.Симин. Барьеры: от кристалла до интегральной схемы
66. Р.Фейнман. КЭД – странная теория света и вещества
67. Я.Б.Зельдович, М.Ю.Хлопов. Драма идей в познании природы
68. И.Д.Новиков. Как взорвалась Вселенная
69. М.Б.Беркинблит, Е.Г.Глазалева. Электричество в живых организмах
70. А.Л.Стасеко. Физика полета
71. А.С.Штейнберг. Репортаж из мира сплавов
72. В.Р.Полищук. Как исследуют вещества
73. Л.Кэрролл. Логическая игра
74. А.Ю.Гросберг, А.Р.Хохлов. Физика в мире полимеров
75. А.Б.Мигдал. Квантовая физика для больших и маленьких
76. В.С.Гетман. Внуки Солнца
77. Г.А.Гальперин, А.Н.Земляков. Математические бильярд
78. В.Е.Белонучкин. Кеплер, Ньютон и все-все-все...
79. С.Р.Филонович. Судьба классического закона
80. М.П.Бронштейн. Солнечное вещество
81. А.И.Буздин, А.Р.Зильберман, С.С.Кротов. Раз задача, два задача...
82. Я.И.Перельман. Знаете ли вы физику?
83. Р.Хонсбергер. Математические изюминки
84. Ю.Р.Носов. Дебют оптоэлектроники
85. Г.Галов. Приключения мистера Томпкинса
86. И.Ш.Слободецкий, Л.Г.Асламазов. Задачи по физике (2-е изд.)



Библиотечка КВАНТ



ВЫПУСК

87