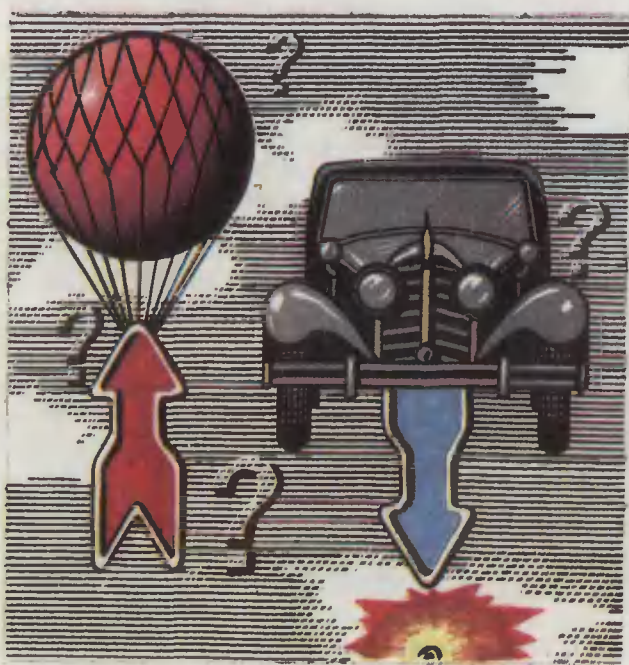




БИБЛИОТЕЧКА • КВАНТ •  
выпуск 82

Я. И. ПЕРЕЛЬМАН

# ЗНАЕТЕ ЛИ ВЫ ФИЗИКУ?



### Единицы длины

$$1 \text{ ангстрем } (\text{\AA}) = 10^{-10} \text{ м}$$

$$1 \text{ астрономическая единица (а.е.)} = 1,49 \cdot 10^{11} \text{ м}$$

$$1 \text{ дюйм} = 2,54 \cdot 10^{-2} \text{ м}$$

$$1 \text{ микрон} = 1 \text{ микрометр} = 10^{-6} \text{ м}$$

$$1 \text{ парсек (пк)} = 3,09 \cdot 10^{16} \text{ м}$$

$$1 \text{ фут} = 0,305 \text{ м}$$

### Единицы площади

$$1 \text{ ар (а)} = 10^2 \text{ м}^2$$

$$1 \text{ гектар (га)} = 10^4 \text{ м}^2$$

$$1 \text{ барн (б)} = 10^{-28} \text{ м}^2$$

### Единицы объема

$$1 \text{ литр (л)} = 10^{-3} \text{ м}^3$$

### Единицы массы

$$1 \text{ атомная единица массы (а.е.м.)} = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$$

$$1 \text{ грамм (г)} = 10^{-3} \text{ кг}$$

$$1 \text{ техническая единица массы (т.е.м.)} = 9,81 \text{ кг}$$

$$1 \text{ тонна (т)} = 10^3 \text{ кг}$$

$$1 \text{ фунт} = 0,454 \text{ кг}$$

$$1 \text{ центнер} = 10^2 \text{ кг}$$

### Единицы времени

$$1 \text{ год (г)} = 3,16 \cdot 10^7 \text{ с}$$

$$1 \text{ минута (мин)} = 60 \text{ с}$$

$$1 \text{ сутки (сут)} = 86\,400 \text{ с}$$

$$1 \text{ час (ч)} = 3600 \text{ с}$$

### Единицы силы

$$1 \text{ дина (д)} = 10^{-5} \text{ Н}$$

$$1 \text{ килограмм-сила (кгс)} = 9,81 \text{ Н}$$

$$1 \text{ тонна-сила (тс)} = 9,81 \cdot 10^3 \text{ Н}$$

### Единицы скорости

$$1 \text{ километр в час (км/ч)} = 0,278 \text{ м/с}$$



**БИБЛИОТЕЧКА • КВАНТ •**  
**выпуск 82**

---

**Я. И. ПЕРЕЛЬМАН**

# **ЗНАЕТЕ ЛИ ВЫ ФИЗИКУ?**

Издание третье,  
переработанное и дополненное



МОСКВА «НАУКА»  
ГЛАВНАЯ РЕДАКЦИЯ  
ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ЛИТЕРАТУРЫ  
1992

ББК 22.3  
П27  
УДК 53 (023)

Серия „Библиотечка «Квант»”  
основана в 1980 г.

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

Академик Ю. А. Осипьян (председатель), доктор физико-математических наук А. И. Буздин (ученый секретарь), академик А. А. Абрикосов, академик А. С. Боровик-Романов, академик Б. К. Вайнштейн, заслуженный учитель РСФСР Б. В. Воздвиженский, академик В. Л. Гинзбург, академик Ю. В. Гуляев, профессор С. П. Капица, академик А. Б. Мигдал, академик С. П. Новиков, академик АПН СССР В. Г. Разумовский, академик Р. З. Сагдеев, профессор Я. А. Смородинский

Ответственные редакторы выпуска:  
Ю. А. Данилов и Е. Л. Сурков

Рисунки художника Ю. Д. Скалдина

**Перельман Я. И.**

**П27** Знаете ли Вы физику? — 3-е изд., перераб. и доп. — М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1992. — 272 с. — (Б-чка «Квант». Вып. 82.)  
ISBN 5-02-014446-0

Своеобразная физическая викторина, составленная известным отечественным популяризатором науки. Более 240 задач из различных областей физики позволяют читателю по-новому взглянуть на привычные, казалось бы, явления, проверить свои познания, сообразительность, наблюдательность.

1-е изд. — 1934 г., 2-е изд. — 1935 г.

Для школьников шестых — десятых классов, участников физических кружков, учителей.

П 1604010000—093  
053(02)-92 152-92

ББК 22.3

ISBN 5-02-014446-0

© «Наука». Физматлит, 1992

Кому из преподавателей или родителей не знакомы терзания школьника, пытающегося решить задачу по физике: и с ответом вроде бы сходится, да вот не все данные использованы—наверное, где-то вкралась ошибка! Школьник так же, как и взрослые, по собственному опыту знает, что «хорошая» задача (а других в школьных задачниках не бывает) допускает единственное решение и что это решение непременно должно содержать все величины, упомянутые в условиях задачи.

К сожалению, в большинстве задачников по физике, как отечественных, так и зарубежных, дело обстоит именно так. Более того, единственно верная комбинация исходных величин, как правило, легко может быть найдена с помощью анализа размерности! Физика в таких задачах по существу сводится к табулированию значений соответствующих величин при заданных условиями задачи значениях других величин. Живая и полнокровная наука подменяется бесплотной тенью, умение анализировать явление (разумеется, на уровне, доступном пониманию учащегося) вытесняется схемой, учебник физики низводится до уровня поваренной книги средней руки, не оставляющей простора для творчества и имеющей на все готовые рецепты.

В книге, которую Вы, дорогой читатель, держите сейчас в руках, собраны задачи совсем иного рода. Собственно говоря, это даже не задачи, а интересные и иногда совсем неожиданные вопросы. О том большом мире, который нас окружает, о происходящих в этом мире явлениях, о многом, чему мы все неоднократно бывали свидетелями, но не придавали особого значения, не вникали, не доискивались, почему это происходит. Придумал эти вопросы Яков Исидорович Перельман.

Объяснять тому, кто питает хотя бы какой-то интерес к точным наукам, кто такой Я. И. Перельман, вряд ли необходимо. В детстве мы с увлечением зачитывались его «Занимательной физикой» задолго до того, как физика стала

для нас учебным предметом. В более зрелом возрасте мы не переставали восхищаться Я. И. Перельманом, его увлеченностью и присущей ему редкой у взрослого человека чисто детской способностью открывать окружающий мир каждый день заново, видеть привычное и обыденное в неожиданном ракурсе. Вдохновенный популяризатор науки Яков Исидорович Перельман создал в научно-популярной литературе целое направление, эпоху, жанр. И хотя книги его неизбежно несут на себе отпечаток времени, все же они не стареют. Новые поколения читателей, внуки и правнуки тех, кто некогда с восхищением ходил по залам Дома занимательной науки, созданного Я. И. Перельманом и его единомышленниками (который просуществовал до войны), читают книги Я. И. Перельмана с интересом, не меньшим, чем читали их дедушки и бабушки.

«Книги имеют свою судьбу»,— говаривали древние римляне. Предлагаемой вниманию читателя книге Я. И. Перельмана «Знаете ли Вы физику?» выпала менее завидная судьба, чем некоторым другим его книгам (например, «Занимательной физике»). Она только теперь возвращается к читателю после более чем полувекового незаслуженного забвения. Сознывая значение перельмановского шедевра, редакторы неохотно, лишь в случае крайней необходимости шли на микрохирургические операции, стремясь нанести минимальный урон живой ткани авторского текста. Наиболее многочисленные (хотя и наименее существенные) изменения касаются физических единиц.

Дело в том, что для нового поколения читателей привычна и знакома система единиц СИ, а используемые в книге Я. И. Перельмана старые единицы обретают реальность (становятся «ощутимыми») только после перевода в СИ. Чтобы преодолеть неизбежное и нежелательное отчуждение текста задачи от ее физического смысла, редакторы во многих случаях взяли на себя вспомогательную работу по переводу всех единиц в СИ. В тех же случаях, когда такой перевод по тем или иным причинам был сочтен нецелесообразным, читателю предоставлена возможность воспользоваться таблицей переводных коэффициентов (в двух частях), помещенной на обратных сторонах обложки в начале и конце книги.

Подверглись замене и некоторые физические понятия. Так, вместо веса как меры количества вещества введена масса, вместо удельного веса—плотность, вместо давления—сила давления, вместо теплотворной способности—теплота сгорания и т. п.

Разумеется, окончательная доводка книги возможна лишь в живом общении с читателем, при наличии обратной связи.

В условиях задач и решениях Я. И. Перельман неоднократно ссылается на книжные и журнальные издания, указывая, как правило, только автора и название работы. Многие из этих публикаций стали библиографической редкостью и найти их можно только в больших книгохранилищах или у коллекционеров — собирателей книг. Полный перечень современных библиографических описаний таких изданий помещен в конце книги. [Следует иметь в виду, что фамилии авторов даны в таком виде, как они значатся на обложках книг (например, Брегг вместо принятого ныне варианта — Брэгг), иначе найти издание было бы невозможно.]

При жизни Я. И. Перельмана физическая викторина «Знаете ли Вы физику?» выдержала два издания (первое — в 1934 г., второе — в 1935 г.). Различия между изданиями незначительные. Все замечания, исправления и дополнения, сделанные Я. И. Перельманом во втором издании, учтены нами в новом, третьем издании. В частности, под номерами 242—250 в новое издание включены задачи, которые добавлены Я. И. Перельманом во втором издании.

В новом издании воспроизведены иллюстрации художника Ю. Д. Скалдина, украшавшие многие книги Я. И. Перельмана.

Сергею Владимировичу Обручеву (не путать с Владимиром Афанасьевичем Обручевым, подарившим нам, помимо чисто научных достижений, романы «Плутония» и «Земля Санникова», и повесть «В дебрях Центральной Азии») принадлежат замечательные слова:

«На днях я поспорил с одним критиком о пользе вдохновения для составителей популярных книг по естествознанию и технике. Он утверждал, что популяризатор должен быть точным и аккуратным человеком, внимательно излагающим научные факты; функция популяризатора — это только разжевать неудобоваримую пищу и вложить ее в жадно раскрытые клювы птенцов. Но я стоял на другой точке зрения: я полагал, что популяризатору, кроме того, необходимо вдохновение, на крыльях которого он должен улететь со своими читателями в чудесные страны научной фантазии»<sup>\*)</sup>.

Вдохновение в полной мере было присуще творчеству Якова Исидоровича Перельмана, которое все еще ждет своего исследователя. О широте и мощи перельмановских крыльев убедительно свидетельствует приведенный в конце книги (заведомо неполный) список его собственных публикаций, а также публикаций, посвященных самому

---

<sup>\*)</sup> Обручев С. В. О пользе вдохновения для популяризаторов // Печать и революция. — Книга первая. — Январь 1928. — С. 90.

Перельману, и небольшой перечень задачникoв для того читателя, который войдет во вкус и захочет порешать и другие задачи.

При подготовке нового издания книги «Знаете ли Вы физику?» Я. И. Перельмана нам помогали друзья и коллеги, которым мы очень признательны. Особую благодарность хочется выразить писателю Г. И. Мишкевичу, сотрудникам журнала «Квант» Л. В. Кардасевич и В. А. Тихомировой и сотруднику издательства «Советская энциклопедия» О. Д. Грикуловой, оказавшим нам неоценимую помощь при поиске труднодоступных публикаций о Я. И. Перельмане.

*Ю. Данилов  
Е. Сурков*



Настоящая книга, почти не выступающая из рамок элементарной физики, предназначена для читателя, который прошел физику в средней школе и полагает поэтому, что начала этой науки ему известны и переизвестны.

Долголетний опыт убедил меня, что подлинное знание элементарной физики встречается весьма не часто. Внимание большинства интересующихся физикой привлекают, главным образом, новейшие ее успехи; в ту же сторону направляют интерес читателей и научно-популярные журналы. О пополнении пробелов первоначальной подготовки заботятся мало. Возвращаться к элементарной физике не принято, и она обычно закрепляется памятью в том виде, в каком воспринята была незрелым умом школьника-подростка.

В итоге элементы физической науки, фундамент всего естествознания и всей техники — оказываются заложенными довольно шатко. Сила рутины здесь так велика, что некоторые физические предрассудки случается обнаруживать иной раз даже у специалистов-физиков.

Предлагаемая книга представляет собою как бы пространную физическую «викторину», которая должна помочь читателю установить, насколько в действительности овладел он основами физики. Однако — это никак не вопросник для экзамена; большая часть вопросов принадлежит к таким, которые едва ли когда-нибудь предлагались на экзаменах. Напротив, книга рассматривает материал, обычно проскальзывающий мимо сетей опроса на экзаменах, хотя вопросы нашей «викторины» тесно связаны с элементарным курсом физики. При кажущейся простоте, вопросы кроют в себе,

зачастую, неожиданность для читателя. Иные представляются до того простыми, что у каждого готов на них ответ, который оказывается, однако, ошибочным.

Конечная цель книги — убедить читателя, что область элементарной физики гораздо богаче содержанием, чем многие думают, а попутно — обратить внимание на ошибочность ряда ходячих физических представлений. То и другое должно побудить читателя критически пересмотреть и тщательно проветрить багаж своих физических знаний \*).

*Я. Перельман*

---

\*) Подбирая материал для этой книги, я избегал повторения того, что рассмотрено в других моих сочинениях. Читатель, не знакомый с моими «Занимательной физикой» (две части) и «Занимательной механикой», а также с «Физикой на каждом шагу», найдет и там ряд страниц, отвечающих целям настоящей книги.

# I. МЕХАНИКА

---

## ВОПРОСЫ

**1. Мельчайшая мера длины.** Назовите самую маленькую меру длины.

**2. Наибольшая мера длины.** Назовите самую большую меру длины.

**3. Легкие металлы.** Металлы легче воды. Существуют ли металлы легче воды? Назовите самый легкий металл.

**4. Вещество наибольшей плотности.** Как велика плотность самого плотного вещества в мире?

**5. На необитаемом острове.** Вот один из вопросов знаменитой Эдисоновой викторины\*):

«Если бы Вас высадили на один из тропических островов Тихого океана без всяких орудий, как сдвинули бы Вы там с места трехтонный груз — скалу, имеющую 100 футов в горизонтальном протяжении и 15 футов в вертикальном?»

**6. Модель Эйфелевой башни.** Железная Эйфелева башня высотой 300 м (1 000 футов) весит 9 000 т. Сколько должна весить точная железная модель этой башни (рис. 1) высотой 30 см (один фут)?

**7. Тысяча атмосфер под пальцем.** Можете ли Вы одним пальцем произвести давление в 1 000 ат?

---

\*) За два года до смерти американский изобретатель пожелал поощрить стипендией наиболее сметливого юношу Соединенных Штатов Америки. С разных концов страны были направлены к нему одареннейшие школьники, по одному от каждого штата, и Эдисон, во главе особой учрежденной им комиссии, подверг молодых людей испытанию, предложив ответить письменно на 57 вопросов из физики, химии, математики и — общего характера. Победителем в состязании оказался шестнадцатилетний Вильбур Хастон из Детройта. Будущее покажет, правилен ли был выбор комиссии и делается ли этот юноша выдающимся изобретателем.

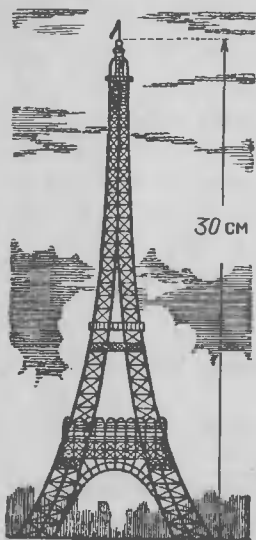


Рис. 1. Сколько весит такая модель Эйфелевой башни (в. 6)?

**8. Сто тысяч атмосфер силою насекомого.** Может ли насекомое производить давление в 100 000 ат?

**9. Гребец на реке.** По реке плывет весельная лодка и рядом с ней — щепка. Что легче для гребца: перегнуть щепку на 10 м или на столько же отстать от нее?

**10. Флаги аэростата.** Аэростат несетя ветром в северном направлении. В какую сторону протягиваются при этом флаги на его гондоле?

**11. Круги на воде.** Камень, брошенный в стоячую воду, порождает волны, разбегающиеся кругами (рис. 2). Какой формы получаются волны от камня, брошенного в текущую воду реки?

**12. Закон инерции и живые существа.** Подчиняются ли живые существа закону инерции?

**13. Движение и внутренние силы.** Может ли тело прийти в движение под действием одних только внутренних сил?

**14. Трение как сила.** Почему трение всегда называют силой несмотря на то, что оно само по себе не может продлить движение (поскольку всегда направлено против движения)?

**15. Трение и движение животных.** Какую роль играет трение в процессе движения живых существ?

**16. Без трения.** Вообразите, что Вы находитесь на горизонтальной, идеально гладкой поверхности. Каким



Рис. 2. Какой формы волны от брошенного тела в текущей воде (в. 11)?

способом могли бы Вы переместить свое тело в желаемом направлении?

**17. Натяжение веревки.** Следующая задача взята из учебника механики А. В. Цингера:

«Чтобы разорвать веревку, человек тянет ее руками за концы в разные стороны, причем каждая рука тянет с силою 10 кг (100 Н). Не разорвав таким образом веревки, человек привязывает один ее конец к гвоздю, вбитому в стену, а за другой тянет обеими руками с силою 20 кг (200 Н).

Сильнее ли натягивается веревка во втором случае?»

**18. Магдебургские полушария.** В своих знаменитых опытах с «магдебургскими полушариями» Отто Герике впрягал с каждой стороны по 8 лошадей.

Не лучше ли было прикрепить одно полушарие к стене, а к другому припрячь 16 лошадей? Получилась ли бы в этом случае более сильная тяга?

**19. Безмен.** Взрослый может вытянуть на безмене 10 кг (100 Н), ребенок — 3 кг (30 Н). Сколько покажет указатель безмена, если оба станут растягивать его одновременно в противоположные стороны?

**20. Движение лодки.** В немецком научно-популярном журнале указаны два способа использования энергии газовой струи для движения лодки, схематически изображенные на рис. 3. Какой способ действеннее?

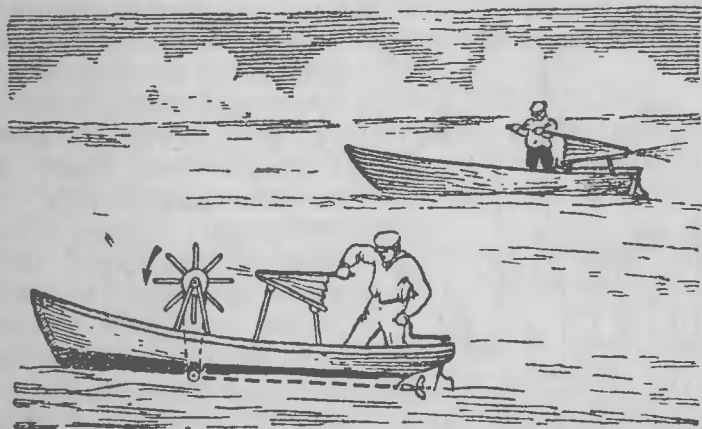


Рис. 3. Какой из этих способов двигать лодку действеннее (в. 20)?

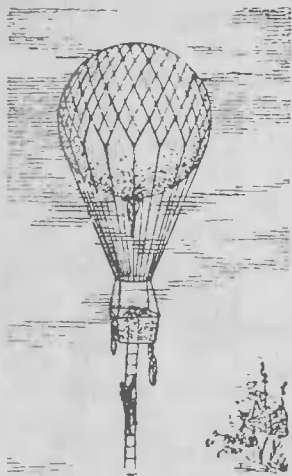


Рис. 4. Куда подвинется аэростат (в. 21)?

популярность на Западе, особенно в Америке, приобрела занимательная игрушка, называемая там «йо-йо». Это — катушка, которая спускается на разматывающейся ленте и сама затем поднимается. Игрушка — не новость: ею развлекались еще солдаты наполеоновских армий и даже, по словам сведущих людей, герои Гомера.

С точки зрения механики, «йо-йо» есть не что иное, как видоизменение общеизвестного маятника Максвелла (рис. 6): небольшой маховичок падает, разматывая навитые на его ось нити, и приобретает

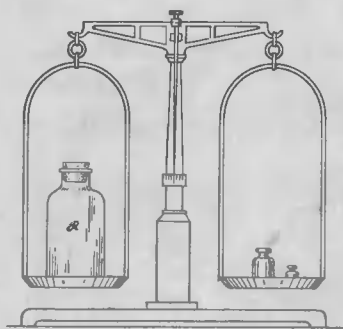


Рис. 5. Задача о мухе, летающей в банке (в. 22).

**21. На воздушном шаре.** С воздушного шара, неподвижно держащегося в воздухе, свободно свешивается лестница (рис. 4). По ней начал взбираться человек. Куда при этом подвинется шар: вверх или вниз?

**22. Муха в банке.** На внутренней стенке закрытой банки, уравновешенной на чувствительных весах, сидит муха (рис. 5). Что произойдет с весами, если, покинув свое место, муха станет летать внутри банки?

**23. Маятник Максвелла.**

В последнее время большую популярность на Западе, особенно в Америке, приобрела занимательная игрушка, называемая там «йо-йо». Это — катушка, которая спускается на разматывающейся ленте и сама затем поднимается. Игрушка — не новость: ею развлекались еще солдаты наполеоновских армий и даже, по словам сведущих людей, герои Гомера.

С точки зрения механики, «йо-йо» есть не что иное, как видоизменение общеизвестного маятника Максвелла (рис. 6): небольшой маховичок падает, разматывая навитые на его ось нити, и приобретает постепенно столь значительную энергию вращения, что, развернув нити до конца, продолжает вращаться, вновь наматывая их и, следовательно, поднимаясь вверх. При подъеме, вследствие превращения кинетической энергии в потенциальную, маховик замедляет вращение, наконец останавливается и вновь начинает падение с вращением. Опу-

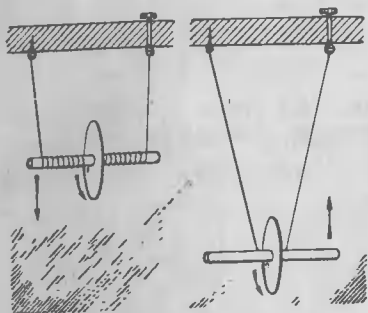


Рис. 6. Маятник Максвелла (в. 23).

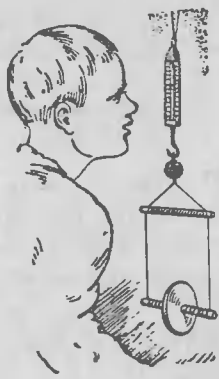


Рис. 7. Что показывает пружинный безмен (в. 23)?

скание и подъем маховичка повторяются много раз, пока первоначальный запас энергии не рассеется в виде теплоты, возникающей при трении.

Прибор Максвелла описан здесь для того, чтобы предложить следующие вопросы.

Нити маятника Максвелла прикреплены к пружинному безмену (рис. 7). Что должно происходить с указателем безмена в то время, когда маховичок исполняет своей танец вверх и вниз? Останется ли указатель в покое? Если будет двигаться, то в какую сторону?

**24. Плотничный уровень в вагоне.** Можно ли в движущемся поезде пользоваться плотничьим уровнем (с пузырьком) для определения наклона пути?

**25. Отклонение пламени свечи.**

а) Переноса в комнате с места на место горящую свечу, мы замечаем, что пламя в начале движения отклоняется назад. Куда отклонится оно, если переносить свечу в закрытом фонаре?

б) Куда отклонится пламя свечи в фонаре, если равномерно кружить фонарь вокруг себя вытянутой рукой?

**26. Согнутый стержень.** Однородный стержень уравновешен, подпертый в середине (рис. 8). Какая часть стержня перегнет, если правую его половину согнуть вдвое (рис. 9)?



Рис. 8. Стержень уравновешен (в. 26).



Рис. 9. Сохранится ли равновесие (в. 26)?

**27. Два безмена.** Который из двух изображенных на рис. 10 пружинных безменов, поддерживающих стержень  $CD$  в наклонном положении, показывает большую нагрузку?

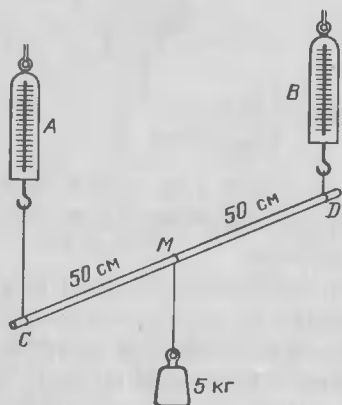


Рис. 10. Какой из безменов нагружен сильнее (в. 27)?



Рис. 11. Задача о кривом рычаге (в. 28). (См. чертеж внизу справа.)

**28. Рычаг.** Невесомый рычаг изогнут, как показано на рис. 11. Точка его опоры в  $B$ . Желательно поднять груз  $A$  наименьшей силой. В каком направлении нужно приложить ее к концу  $C$  рычага?

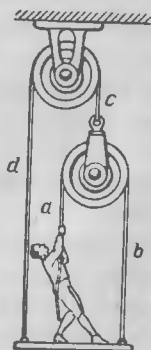


Рис. 12. С какой силой надо тянуть, чтобы удержать платформу от падения (в. 29)?



**29. На платформе.** Человек весом  $60\text{ кг}$  ( $600\text{ Н}$ ) стоит на платформе, вес которой  $30\text{ кг}$  ( $300\text{ Н}$ ). Платформа подвешена на веревках, перекинутых через блоки, как показано на рис. 12. С какой силой должен человек тянуть за конец веревки *a*, чтобы удержать платформу от падения?

**30. Провисающая веревка.** С какой силой надо натягивать веревку, чтобы она не провисала (рис. 13)?

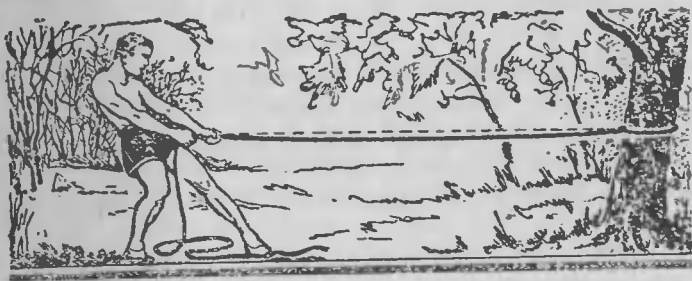


Рис. 13. Как следует натягивать веревку, чтобы она не провисала (в. 30)?

**31. Увязший автомобиль.** Чтобы вытащить увязший в выбоине автомобиль, прибегают к следующему приему. Привязывают его длинной прочной веревкой крепко к дереву или пню близ дороги так, чтобы веревка была натянута возможно туже. Затем тянут за веревку под прямым углом к ее направлению (см. рис. 43). Благодаря этому усилию автомобиль сдвигается с места.

На чем основан описанный прием?

**32. Трение и смазка.** Известно, что смазка ослабляет трение. Во сколько приблизительно раз?

**33. По воздуху и по льду.** Каким способом можно закинуть льдинку дальше, бросив в воздух или пустив скользить по льду (рис. 14)?

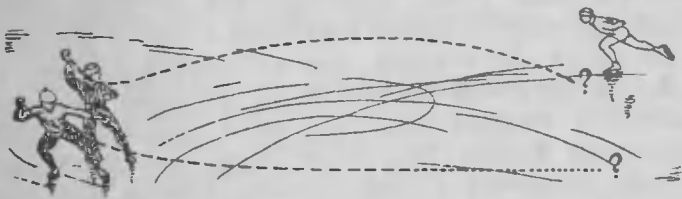


Рис. 14. Задача о льдинках (в. 33).

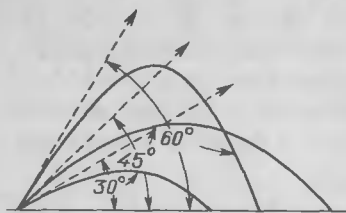


Рис. 15. Правильн ли чертеж (в. 38)?

**34. Фальшивые кости.** Недобросовестные игроки в кости, чтобы обеспечить выпадение желаемого числа очков, наливают кости свинцом.

На чем основана эта уловка?

**35. Падение тела.** На-

сколько приблизительно успе-  
вает опуститься свободно падающее тело, пока звучит  
один «тик-так» карманных часов?

**36. Куда бросить бутылку?** В какую сторону надо  
из движущегося вагона выбросить бутылку, чтобы  
опасность разбить ее при ударе о землю была наи-  
меньшая?

**37. Из вагона.** В каком случае выброшенная из  
вагона вещь долетит до земли раньше: когда вагон  
в покое или когда он движется?

**38. Три снаряда.** Три снаряда пущены из одной  
точки под различными углами к горизонту: в  $30^\circ$ ,  $45^\circ$   
и  $60^\circ$ . Пути их (в несопротивляющейся среде) показаны  
на рис. 15. Правильн ли чертеж?

**39. Путь брошенного тела.** Какую кривую описывает  
тело, брошенное под углом к горизонту при отсутствии  
сопротивления воздуха?

**40. Наибольшая скорость артиллерийского снаряда.**  
Артиллеристы утверждают, что пушечный снаряд приоб-  
ретае наибольшую свою скорость не в стволе орудия,  
а вне его, покинув жерло. Возможно ли это? Почему?

**41. Прыжки в воду.** В чем главная причина того,  
что прыжки в воду с большой высоты опасны для  
здоровья (рис. 16)?

**42. На краю стола.** Шар положен на край стола,  
плоскость которого перпендикулярна к отвесу (рис. 17).  
Останется ли он в покое при отсутствии трения?

**43. На наклонной плоскости.** Брусok (рис. 18) в по-  
ложении *В* скользит по наклонной плоскости *MN*,  
преодолевая трение. Можно ли быть уверенным, что  
он будет скользить и в положении *А* (если при этом  
не опрокидывается)?

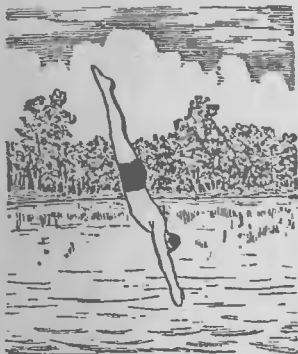


Рис. 16. В чем главная опасность (в. 41)?

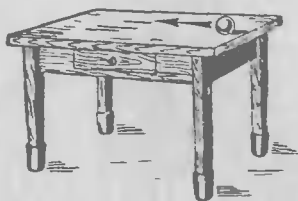


Рис. 17. Останется ли шар в покое (в. 42)?

**44. Два шара.** Из точки  $A$  (рис. 19), находящейся на высоте  $h$  над горизонтальной плоскостью, движутся два шара: один скатывается по наклону  $AC$ , другой падает свободно по отвесной линии  $AB$ .

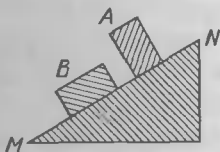


Рис. 18. Задача о бруске (в. 43).

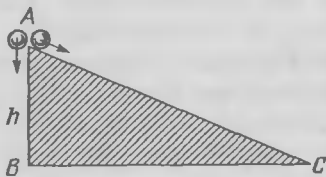


Рис. 19. Задача о шарах (в. 44).

Который из шаров в конце пути будет обладать большей поступательной скоростью?

**45. Два цилиндра.** Два цилиндра совершенно одинаковы по массе и внешнему виду. Один — сплошной алюминиевый. Другой — пробковый со свинцовой оболочкой. Цилиндры оклеены бумагой, которую надо оставить неповрежденной. Укажите способ распознать, какой цилиндр однородный алюминиевый и какой составной.

**46. Песочные часы на весах.** Песочные часы с 5-минутным «заводом» поставлены в бездействующем состоянии на чашку чувствительных весов и уравновешены гирями (рис. 20).

Часы перевернули. Что произойдет с весами в течение ближайших пяти минут?

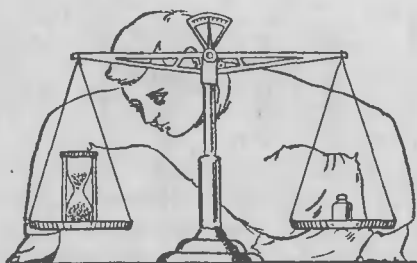


Рис. 20. Песочные часы на весах (в. 46).



Рис. 21. Английские министры взбираются вверх, а фунт идет вниз (в. 47).

**47. Механика в карикатуре.** Карикатура (рис. 21), здесь воспроизведенная, имеет механическую основу. Удачно ли использованы в ней законы механики?

**48. Грузы на блоке.** Через блок перекинута веревка с грузами на концах в 1 кг и 2 кг. Блок подвешен к безмену (рис. 22). Какую нагрузку показывает безмен?

**49. Центр тяжести конуса.** Сплошной железный усеченный конус опирается на свое большее основание (рис. 23). Если конус перевернуть, куда переместится его центр масс—к большему или меньшему основанию?

**50. В падающей кабине.** Вы стоите на платформе весов в кабине лифта (рис. 24). Внезапно тросы оборвались, и кабина начала опускаться с ускорением свободно падающего тела.

а) Что покажут весы во время этого падения?

б) Выльется ли во время падения вода из открытого перевернутого кувшина?

**51. Чаинки в воде.** Помешав ложечкой в чашке чая, выньте ее—чаинки на дне, разбежавшиеся к краям, соберутся к середине. Почему?

**52. На качелях.** Верно ли, что, стоя на качелях, можно определенными движениями своего тела увеличить размах качаний (рис. 25)?

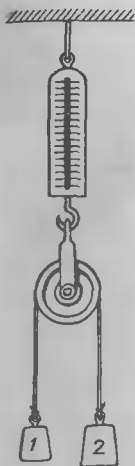


Рис. 22. Что показывает безмен (в. 48)?



Рис. 23. Задача о конусе (в. 49).

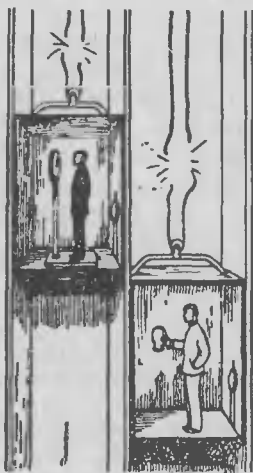


Рис. 24. Физика внутри сорвавшегося подъемника (в. 50).

**53. Притяжение земных предметов и небесных тел.** Небесные тела по массе во много раз больше земных. Но их взаимное удаление превышает расстояние между земными предметами также в огромное число раз. А так как притяжение прямо пропорционально первой степени произведения масс, но обратно пропорционально квадрату расстояния, то странно, почему мы не

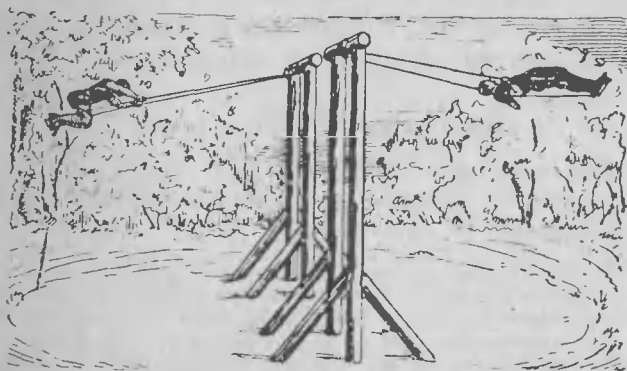


Рис. 25. Механика на качелях (в. 52).

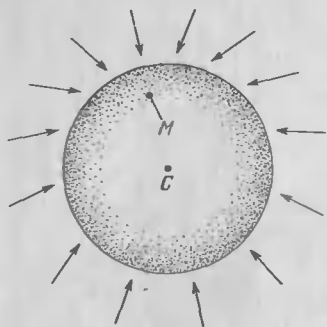


Рис. 26. К какой точке должны падать земные тела (в. 54)?

однако, что земные тела притягиваются не только Землей, но и Луной. Поэтому тела должны бы, казалось, падать по направлению не к центру Земли, а к общему центру масс Земли и Луны. Этот общий центр масс далеко не совпадает с геометрическим центром земного шара, а отстоит от него, как легко вычислить, на 4800 км.

Действительно, Луна обладает массой в 80 раз меньшей, чем Земля; следовательно, общий центр их масс в 80 раз ближе к центру Земли, чем к центру Луны. Расстояние между центрами обоих тел 60 земных радиусов; поэтому общий центр масс отстоит от центра Земли на три четверти земного радиуса.

Если так, то направление отвесов на земном шаре должно значительно отличаться от направления к центру Земли (рис. 26). Почему же подобные отклонения нигде в действительности не наблюдаются?

## ОТВЕТЫ НА ВОПРОСЫ 1—54

**1.** Тысячная доля миллиметра, микрометр (мкм) — далеко не является самой маленькой мерой длины, употребляемой в современной науке\*). Ее давно уже

\*) Микрометр становится уже довольно крупной единицей длины и для современной техники: массовое производство сложных машин, возможное лишь при полной взаимозаменяемости частей, ввело в производственную практику употребление измерительных приборов, улавливающих десятые доли микрометра (см. далее о «плитках Иогансона», задача 214).

замечаем притяжения между земными предметами и почему оно так явно господствует во Вселенной.

Объясните это.

### 54. Направление отвеса.

Принято считать, что все отвесы близ земной поверхности направлены к центру Земли (если пренебречь незначительным отклонением, обусловленным вращением земного шара). Известно,

превзошли в малости сначала миллионная доля миллиметра — нанометр (нм), затем десятиллионная доля миллиметра — так называемый ангстрем (Å). Столь малые меры длины употребляются, например, для измерения длин световых волн. В природе, впрочем, существуют тела, для которых даже такие меры слишком крупные. Таковы электрон\*<sup>1</sup> и протон, диаметр которого, вероятно, еще раз в 1000 меньше.

**2.** Еще не так давно наибольшей мерой длины, с какой имеет дело наука, считался световой год — годичный путь светового луча в пустоте. В нем 9,5 биллиона километров ( $9,5 \cdot 10^{12}$  км). В научных сочинениях эта мера постепенно вытеснилась другой, в три с лишним раза более крупной — парсек (пк). Парсек (сокращение от слов «параллакс» и «секунда») равен 31 биллиону километров ( $31 \cdot 10^{12}$  км). Но и эта исполинская мера оказалась чересчур мелкой для промеров глубин мироздания. Астрономам пришлось ввести сначала килопарсек, заключающий в себе 1000 парсеков, а затем и мегапарсек — 1 000 000 парсеков, побивающий в настоящее время рекорд среди мер длины. Мегапарсеками измеряются расстояния до спиральных туманностей.

**3.** Когда заходит речь о легком металле, называют обычно алюминий. Однако он занимает далеко не первое место в ряду легких металлов: существуют несколько металлов, которые значительно легче его. Для сравнения на рис. 27 изображены призмы равных масс из разных легких металлов. Далее приведен перечень легких металлов с указанием плотности (г/см<sup>3</sup>) каждого:

Алюминий .....	2,7	} легче воды
Бериллий .....	1,9	
Магний .....	1,7	
Натрий .....	0,97	
Калий .....	0,86	
Литий .....	0,53	

\*<sup>1</sup> Строго говоря, о диаметре электрона можно говорить лишь условно. «Если сделать предположение, — пишет проф. Дж. П. Томсон, — что электрон подчиняется тем же самым законам, каким следует в лаборатории заряженный металлический шар, то можно подсчитать и «диаметр» электрона: для него получится значение  $3,7 \cdot 10^{-13}$  см. Но этот результат не удалось еще проверить никаким опытом».



Рис. 27. Призмы равного веса из легких металлов (в. 3).

Рекорд легкости побивает, как видим, литий — металл, который легче многих пород дерева и плавает в керосине, погружаясь до половины. Он в сорок раз легче самого тяжелого металла — осмия.

Из сплавов, применяемых в современной промышленности, выделяются своей легкостью следующие.

1) Дюралюминий и кольчугалюминий — сплавы алюминия с небольшим количеством меди и магния; при плотности  $2,6 \text{ г/см}^3$  они вдвое легче железа, будучи прочнее его в полтора раза.

2) Дюрбериллий — сплав с медью и никелем; он легче дюралюминия на 25% и прочнее его на 40%.

3) Электрон (не путать с элементарным количеством отрицательного электричества) — сплав магния, алюминия и др.; почти не уступая в прочности дюралюминию, электрон легче его на 30% (его плотность —  $1,84 \text{ г/см}^3$ ).

**4.** Осмий, иридий, платина — вещества, которые принято считать самыми плотными, оказываются ничтожно плотными по сравнению с веществом некоторых звезд. Так, например, в одном кубическом сантиметре звезды ван-Манена, принадлежащей зодиакальному созвездию Рыб, заключается в среднем около 400 кг массы. Следовательно, вещество это в 400 000 раз плотнее воды и приблизительно в 20 000 раз плотнее платины. Мельчайшая частичка из такого вещества (дробь № 12, диаметр — 1,25 мм) имела бы массу 400 г, а кусочек в четверть спичечного коробка мог бы уравновесить десятка три взрослых людей (рис. 28).



5. «Растут ли хоть деревья на этом тропическом острове?» — спрашивает автор немецкой книжки, посвященной разбору Эдисоновой викторины. Вопрос праздный, потому что для опрокидывания скалы никаких деревьев не понадобится: это можно сделать буквально голыми руками. Рассчитаем, какова толщина скалы, подозрительно не упомянутая в задаче, и дело сразу разъяснится. При общем весе скалы 30 000 Н и при плотности гранита  $3\,000\text{ кг/см}^3$  объем скалы равен  $1\text{ м}^3$ . А так как длина скалы 30 м (100 футов), высота около 5 м (15 футов), то толщина ее

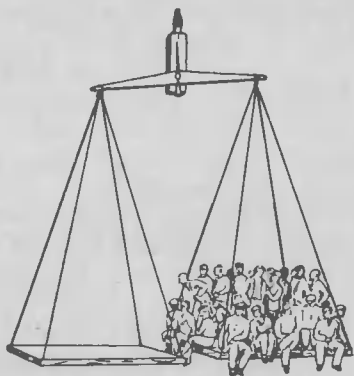


Рис. 28. Кусочек вещества звезды ван-Манена объемом в четверть спичечного коробка мог бы уравновесить три десятка взрослых людей (в. 4)

$$1 : (30 \cdot 5) = 0,007\text{ м},$$

т. е. 7 мм. На острове возвышалась тонкая стена, всего в 7 мм толщины.

Чтобы подобную стену опрокинуть (если только она не врылась глубоко в почву), достаточно упереться в нее руками или плечом. Вычислим необходимую для этого силу. Обозначим ее через  $X$ ; на рис. 29 она изображена вектором  $\vec{AX}$ . Точка  $A$  приложения этой силы находится на высоте плеч человека (1,5 м). Сила стремится повернуть стену вокруг оси  $O$ . Момент этой силы равен

$$\text{Мом. } X = 1,5X.$$

Опрокидывающему усилию противодействует вес скалы  $P = 30\,000\text{ Н}$ , приложенный в ее центре масс  $C$  и стремящийся отвести поворачиваемую стену назад в прежнее положение. Момент веса относительно той же оси  $O$  равен

$$\text{Мом. } P = Pm = 30\,000 \cdot 0,0035 = 105.$$

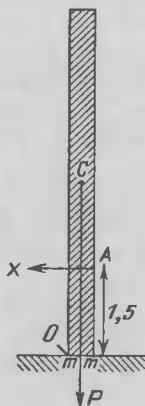


Рис. 29. Опрокидывание Эдисоновой скалы (в. 5).

Тогда сила  $X$  определяется из уравнения

$$1,5X = 105,$$

откуда

$$X \approx 70 \text{ Н.}$$

Значит, напирая на стену с силой всего 70 Н, человек опрокинет скалу.

Невероятно, чтобы подобная каменная стена вообще могла удержаться в отвесном положении: самый слабый, неощутимый для нас ветерок должен был бы ее опрокинуть. Легко рассчитать указанным сейчас приемом, что для опрокидывания этой стены ветром (который можно рассматривать как силу, приложенную на половине высоты стены) достаточно общего давления ветра всего в 15 Н. Между тем, даже так называемый легкий ветер, с силой давления  $10 \text{ Н/м}^2$ , оказывал бы на стену давление свыше 10 000 Н.

**6.** Задача эта — скорее геометрическая, чем физическая — представляет интерес главным образом для физики, так как в физике приходится нередко сопоставлять массы геометрически подобных тел. В данном случае вопрос сводится к определению отношения (масс) двух подобных тел, линейные размеры одного из которых в 1000 раз меньше, чем другого. Грубой ошибкой было бы думать, что уменьшенная в такой пропорции модель Эйфелевой башни имеет массу не 9000 т, а 9 т, т. е. всего в тысячу раз меньше. Объемы, а следовательно, и массы геометрически подобных тел относятся как кубы их линейных размеров. Значит, модель башни должна иметь массу меньше массы натуре в  $1000^3$ , т. е. в миллиард раз:

$$9\,000\,000\,000 : 1\,000\,000\,000 = 9 \text{ г.}$$

Масса — крайне ничтожная для железного изделия высотой 30 см. Это будет казаться, однако, не столь странным, если сообразим, какой толщины оказались бы брусья нашей модели — в тысячу раз тоньше натуре, они должны быть тонки, как нитки: модель окажется словно сотканной из тончайшей проволоки\*), так что удивляться ее незначительной массе не приходится.

---

\*) 70-тонные брусья Эйфелевой башни заменились бы в модели проволочками массой 0,07 г.

**7.** Для многих будет, вероятно, полной неожиданностью утверждение, что, втыкая пальцем острую иглу или булавку в ткань, мы производим давление порядка 1000 ат. В этом нетрудно, однако, убедиться. Измерив (например, с помощью весов для писем) силу, с какой палец давит на втыкаемую булавку, получим около 3 Н. Диаметр кружка, на который давление это распространяется (острие булавки), примерно 0,1 мм или 0,01 см; площадь такого кружка равна

$$3 \cdot 0,01^2 = 0,0003 \text{ см}^2.$$

Отсюда сила давления на 1 см<sup>2</sup> составляет

$$3 : 0,0003 = 10\,000 \text{ Н}.$$

Так как техническая атмосфера равна давлению 10 Н на 1 см<sup>2</sup>, то втыкая булавку, мы производим давление в 1000 технических атмосфер. Рабочее давление пара в цилиндре паровой машины в сотню раз меньше.

Портной, работая иглой, поминутно пользуется давлением в сотни атмосфер, сам не подозревая, что развивает пальцами руки такое чудовищное давление. Не задумывается над этим и парикмахер, срезая волосы острой бритвой. Бритва давит на волос с силою, правда, всего нескольких десятых долей ньютона, но острие ее имеет толщину не более 0,0001 см, диаметр же волоса менее 0,01 см; площадь, на которую распространяется давление бритвы, равна в данном случае

$$0,0001 \cdot 0,01 = 0,000001 \text{ см}^2.$$

Удельное давление силы в 0,01 Н на такую ничтожную площадь составляет

$$0,01 : 0,000001 = 10\,000 \text{ Н/см}^2,$$

т. е. опять-таки 1000 ат. Так как рука давит на бритву с силою, большею 0,01 Н, то давление бритвы на волос достигает десятков тысяч атмосфер.

**8.** Сила насекомых так мала по абсолютной величине, что возможность для них производить давление в сто тысяч атмосфер представляется невероятной. Между тем существуют насекомые, способные производить даже еще большие давления. Оса вонзает жало в тело жертвы с силою всего  $10^{-4}$  Н или около того. Но острота осинога жала превосходит все, что может быть достигнуто средствами нашей изошренной



Рис. 30. Острые иглы при чрезвычайно сильном увеличении походило бы на горную вершину (в. 8).

техники; даже микрохирургические инструменты гораздо тупее осинового жала. Микроскоп при самом сильном увеличении не обнаруживает на острие осинового жала никакого уплощения. Взглянув же в такой микроскоп на кончик иглы, мы увидели бы картину наподобие горной вершины (рис. 30), а лезвие острого ножа было бы похоже скорее на пилу или, если угодно, на горную цепь (рис. 31).

Жало осы, пожалуй, самая острая вещь в природе — радиус закругления ее острия не превышает  $0,00001$  мм, в то время как у хорошо отточенной бритвы он не менее  $0,0001$  мм и достигает  $0,001$  мм.

Вычислим площадь, по какой распределяется сила давления жала осы  $0,0001$  Н, т. е. площадь кружка радиусом  $0,00001$  мм. Принимая, ради простоты,  $\pi = 3$ ,

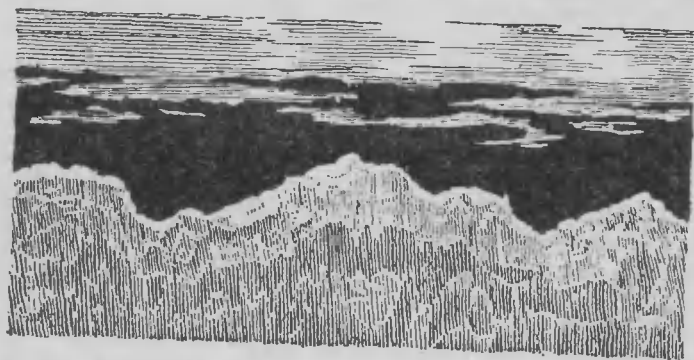


Рис. 31. Лезвие острого ножа при сильном увеличении походило бы на горную цепь (в. 8).

имеем, что площадь этого кружка в квадратных сантиметрах равна

$$3 \cdot 0,000001^2 \text{ см}^2 = 0,000000000003 \text{ см}^2.$$

Сила, действующая на эту площадь, равна 0,0001 Н. Давление получается равным

$$\frac{0,0001}{0,000000000003} = 330\,000 \text{ ат} = 3,3 \cdot 10^{10} \text{ Па}.$$

При столь чудовищном давлении оса могла бы проколоть крепчайшую стальную броню, если бы само жало обладало достаточной прочностью.

**9.** Даже люди, занимающиеся водным спортом, дают часто неправильный ответ на поставленный в задаче вопрос: им кажется, что грести против течения труднее, чем по течению; следовательно, перегнать щепку, по их мнению, легче, чем отстать от нее.

Безусловно верно, что пристать к какому-нибудь пункту берега, гребя против течения, труднее, чем гребя по течению. Но если пункт, которого Вы желаете достигнуть, плывет вместе с Вами, как щепка на реке,—дело существенно меняется. Надо иметь в виду, что лодка, движимая течением, находится по отношению к несущей ее воде в покое. Сидя в такой лодке, гребец работает веслами совершенно так же, как в неподвижной воде озера. На озере одинаково легко грести в любом направлении; то же самое будет и в текущей воде при наших условиях.

Итак, от гребца потребуются одинаковая затрата работы, безразлично—стремится ли он обогнать плывущую щепку или отстать от нее на такое же расстояние\*).

**10.** Если аэростат несется течением воздуха, то скорость обоих одинакова: аэростат и окружающий его воздух находятся в покое один относительно другого. Значит, флаги должны свисать отвесно, как в неподвижном воздухе в безветренную погоду. Люди в гондоле такого аэростата не ощущают ни малейшего ветра, хотя бы их мчал ураган.

Изложенные сейчас соображения, при всей своей простоте, представляются многим почему-то парадок-

---

\*) См. также задачу 78. (Примеч. ред.)

сальными; следствия из них не сразу воспринимаются. Одного автора ряда книг по авиации и воздухоплаванию мне удалось убедить в их правильности только после продолжительной беседы.

**11.** Если не найти сразу правильного подхода к этой задаче, то легко запутаться в рассуждениях и прийти к выводу, что в текущей воде волны должны вытянуться в форме не то эллипса, не то овала, притупленного навстречу течению. Между тем, внимательно наблюдая за волнами, разбегающимися от брошенного в реку камня, мы не заметим никакого отступления от круговой формы, как бы быстро ни было течение.

Здесь нет ничего неожиданного. Простое рассуждение приведет нас к выводу, что волны от брошенного камня должны быть круговые и в стоячей, и в текущей воде. Будем рассматривать движение частиц волнующейся воды как составное из двух движений: радиального — от центра колебаний и переносного, направленного по течению реки. Тело, участвующее в нескольких движениях, в конечном счете перемещается туда, где очутилось бы оно, если бы совершало все составляющие движения последовательно, одно за другим. Поэтому допустим сначала, что камень брошен в неподвижную воду. В таком случае волны, конечно, получатся круговые.

Представим себе теперь, что вода движется — безразлично, с какой скоростью, равномерно или неравномерно, лишь бы движение это было поступательное. Что произойдет с круговыми волнами? Они передвинутся параллельным перемещением, не претерпевая никакого искажения формы, т. е. останутся круговыми.

**12.** Повод к сомнению в том, подчиняются ли живые существа закону инерции, дает следующее обстоятельство. Живые существа — рассуждают многие — могут сниматься с места без участия внешней силы; а по закону инерции: «Тело, предоставленное самому себе, остается в покое или продолжает двигаться равномерно и прямолинейно, пока какая-нибудь внешняя причина (т. е. сила) не изменит этого состояния тела» (проф. А. А. Эйхенвальд, «Теоретическая физика»).

Однако слово «внешняя» в формулировке закона инерции вовсе не необходимо; оно в сущности лишнее. У Ньютона в «Математических началах натуральной философии» (т. е. физики) этого слова нет. Вот дословный перевод Ньютонова определения:

«Всякое тело продолжает удерживаться в своем состоянии покоя или равномерного и прямолинейного движения, пока и поскольку оно не понуждается приложенными силами изменить это состояние»<sup>\*)</sup>.

Как видите, у Ньютона нет никакого указания на то, что причина, выводящая тело из покоя или движения по инерции, должна быть непременно внешняя. При такой формулировке не остается места никаким сомнениям в том, что закон инерции простирается и на живые существа.

Что касается способности живых существ двигаться без участия внешних сил, то относящиеся сюда соображения читатель найдет в последующих задачах.

**13.** Распространено убеждение, что одними внутренними силами тело не может привести себя в движение. Это — не более чем предрассудок. Достаточно указать на ракету, которая движется исключительно за счет внутренних сил. Все ракетное летание, развивающееся на наших глазах, имеет в своей основе эту мнимую невозможность.

Верно то, что вся масса тела не может быть внутренними силами приведена в одинаковое движение. Но силы эти вполне могут сообщить части тела одно движение, например, вперед, а остальной части — противоположное, назад. Такой случай мы имеем в движении ракеты.

**14.** Безусловно правильно, что трение не может быть непосредственной причиной движения, а, напротив — является лишь помехой движению. Но именно потому его с полным основанием и называют силой. Что такое сила? Ньютон определяет так:

«Сила есть действие, производимое над телом, чтобы изменить его состояние покоя или равномерного прямолинейного движения».

---

<sup>\*)</sup> Ньютон И. Математические начала натуральной философии: Пер. с лат. акад. А. Н. Крылова. — М.: Наука, 1989. — С. 39. (Примеч. ред.)

Трение изменяет равномерное движение тел, превращая его в неравномерное (замедленное). Следовательно, трение есть сила.

Чтобы такие недвижущие силы, как трение, выделить среди других сил, способных породить движение, первые называют пассивными, вторые — активными. Трение есть сила пассивная.

**15.** Рассмотрим конкретный пример — ходьбу человека. Принято думать, что при ходьбе движущей силой является трение как единственная участвующая здесь внешняя сила. Так часто пишут в учебных руководствах и популярных книгах. Подобный взгляд больше затемняет вопрос, чем разъясняет его. Может ли трение быть причиной движения, раз оно способно только замедлять движение, а никак не порождать его?

На роль трения в ходьбе человека и животных надо смотреть следующим образом. При ходьбе должно происходить в сущности то же самое, что и при движении ракеты. Человек может вынести ногу вперед только при том условии, что прочая часть его тела продвинется назад. На скользкой поверхности мы это и наблюдаем. Но где имеется достаточно сильное трение, там отступление тела назад не происходит, и центр масс всего тела оказывается перенесенным вперед: шаг сделан.

Какие же силы перемещают здесь центр масс тела вперед? Сокращение мускулов, т. е. сила внутренняя. Роль трения в этом случае сводится лишь к тому, что оно уравнивает одну из двух равных внутренних сил, возникающих при ходьбе, и тем самым дает перевес другой.

Совершенно такую же роль играет трение и при всяком ином перемещении живых существ, а также и при движении паровоза. Все эти тела движутся поступательно под действием не трения, а одной из двух внутренних сил, получающей преобладание благодаря трению.

**16.** В условиях отсутствия трения ходьба была бы невозможна — таково одно из неудобств этой обстановки. Тем не менее перемещаться на идеально гладкой поверхности было бы возможно. Для этого Вы должны бросить какой-нибудь предмет в направлении, противоположном тому, в каком желаете дви-



гагся. Тогда, по закону противодействия, тело Ваше получит толчок и двинется в желаемую сторону. Если Вам нечего бросить, снимите какую-нибудь часть одежды и отбросьте ее.

Подобным же приемом можете Вы остановить свое приведенное в движение тело, если Вам не за что ухватиться.

В столь необычайных условиях окажется будущий межпланетный путешественник, когда, надев на себя специальный костюм, он пожелает во время перелета совершить прогулку за борт ракетного корабля. Вне корабля он будет продолжать нестись вместе с ним по инерции. Чтобы по произволу приближаться или удаляться от корабля, удобнее всего пользоваться пистолетом: отдача при выстреле будет увлекать стреляющего в противоположную сторону. Тот же пистолет пригодится и для остановки движения.

**17.** Может показаться, что натяжение веревки получится одинаковое, будем ли мы растягивать ее с силой  $100\text{ Н}$  за каждый конец или же тянуть с силой  $200\text{ Н}$  за один конец, прикрепив другой—к стене. В первом случае две силы в  $100\text{ Н}$ , приложенные к концам веревки, дают растягивающее усилие в  $200\text{ Н}$ ; во втором случае то же натяжение порождается силой в  $200\text{ Н}$ , приложенной к незакрепленному концу.

Это—грубое заблуждение. Натяжение веревки в рассматриваемых случаях вовсе не одинаково. В первом случае веревка растягивается двумя силами в  $100\text{ Н}$ , приложенными к ее концам, во втором—двумя силами в  $200\text{ Н}$ , также приложенными к концам, потому что сила рук вызывает равную противодействующую силу со стороны стены. Следовательно, натяжение веревки во втором случае вдвое больше, чем в первом.

Легко впасть в новую ошибку, определяя самую величину натяжения веревки. Вообразим, что растягиваемая веревка разрезана и освободившиеся концы ее привязаны к пружинному безмену: один—к кольцу, другой—к крючку. Сколько покажет в каждом случае безмен?

Не следует думать, что в первом случае показание безмена будет  $200\text{ Н}$ , во втором— $400\text{ Н}$ . Две противоположные силы по  $100\text{ Н}$ , приложенные к концам веревки, дают растяжение не в  $200\text{ Н}$ , а всего в  $100\text{ Н}$ .

Две силы по 100 Н, растягивающие веревку в противоположные стороны, есть не что иное, как то, что мы называем «силою в 100 Н». Других сил в 100 Н не бывает: всякая сила имеет два конца. Если и кажется иной раз, что перед нами сила одинарная, а не парная, то происходит это потому лишь, что другой конец наблюдаемой силы находится весьма далеко и ускользает от нашего внимания. Когда, например, тело падает, на него действует сила притяжения Земли, это — один конец силы, другой — притяжение телом Земли — приложен в центре земного шара.

Итак, веревка, которую тянут в разные стороны силами в 100 Н, растягивается силой в 100 Н, а натягиваемая в одну сторону силой в 200 Н (и в обратную сторону такой же силой противодействия) — подвержена натяжению в 200 Н.

**18.** После разъяснений предыдущей задачи ясно, что в упряжке при полушариях Герики восемь лошадей были совершенно лишними. Их вполне можно было бы заменить сопротивлением какой-нибудь стены или крепкого древесного ствола (рис. 32 и 33). По закону действия и противодействия сила противодействия стены равнялась бы тяге восьми лошадей. Чтобы увеличить тягу, целесообразно было бы эту восьмерку освободившихся лошадей припрячь в помощь остальным восьми. (Не следует думать, однако, что тяга при этом удвоилась бы: вследствие неполной согласованности усилий двойное число лошадей порождает не двойную тягу, а менее чем двойную, хотя и /бóльшую, чем одинарная.)

**19.** На вопрос этой задачи ошибочно отвечать, что раз взрослый тянет к себе кольцо безмена с силой 100 Н, а ребенок тянет за крюк в свою сторону

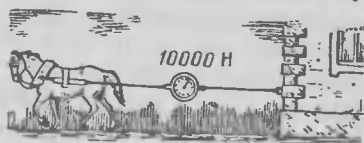
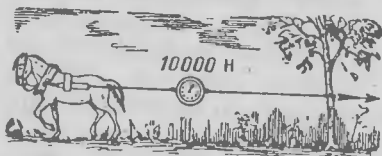


Рис. 32. Динамометр показывает силу тяги лошади или деревца, но никак не сумму обоих усилий (в. 18).

Рис. 33. В этом случае противодействие стены играет роль тяги согнутого деревца (в. 17 и 18).

с силой 30 Н, то указатель должен остановиться у 130 Н.

Это неверно потому, что нельзя тянуть тело с силой 100 Н, если нет равного противодействия. В данном случае противодействующая сила есть сила ребенка, которая не превышает 30 Н; поэтому взрослый может тянуть безмен с силой не более 30 Н. Указатель безмена остановится, следовательно, у деления 30 Н.



Рис. 34. Анекдотический способ приводить в движение парусные суда (в. 20).

Кому это представляется неправдоподобным, пусть рассмотрит случай, когда ребенок, держа безмен, вовсе не тянет его к себе: сможет ли взрослый вытянуть на таком безмене хоть один грамм?

**20.** Из двух предложенных способов действен только первый—при условии, конечно, что мех—достаточных размеров и струя вытекает с большой скоростью. Действие мехов в данном случае сходно с действием ракет, поставленных на кузов автомобиля: при вытекании воздушной струи в одну сторону, мехи, а следовательно, и вся лодка, будут увлекаться в противоположную сторону.

Второй способ—действие воздушной струи на лопатки колеса, вращающего винт за кормой лодки,—не может привести лодку в движение. Причина ясна: вытекание струи воздуха вперед должно увлекать лодку назад, вращение же ветряного двигателя будет тянуть лодку вперед; оба движения, направленные в противоположные стороны, дадут в итоге состояние покоя. По существу способ этот (в том виде, как он представлен на рис. 3) ничем не отличается от анекдотического способа двигать суда, надувая паруса мехами (рис. 34).

**21.** Шар в покое не останется. Пока человек взбирается по лестнице, азростат будет опускаться. Здесь происходит то же, что наблюдается, когда Вы идете по приставшей к берегу легкой лодке, чтобы

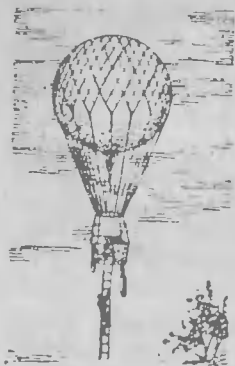


Рис. 35. К ответу на вопрос 21.

выбраться на сушу: лодка отступает под Вашими ногами назад. Точно так же и лестница, отталкиваемая вниз ногами взбирающегося по ней человека, будет увлекать аэростат к земле (рис. 35).

Переходя к решению этой задачи с точки зрения законов механики, мы должны рассуждать так. Шар с лестницей и человеком на ней представляют собой изолированную систему, центр масс которой не может быть перемещен действием внутренних сил. Он сохранит неизменным свое положение при подъеме человека по лестнице только тогда, когда сам шар опустится вниз, — иначе центр масс поднялся бы.

Что касается перемещения шара, то оно во столько же раз меньше перемещения человека, во сколько раз шар тяжелее человека.

**22.** Когда предложенный вопрос был поставлен в немецком научном журнале «Umschau», он сделался предметом оживленного обсуждения, в котором участвовало полдюжины инженеров. Выдвигались самые разнообразные доводы, привлекались многочисленные формулы, но решения давались неодинаковые: спор не привел к единообразному ответу.

Разобраться в задаче можно, однако, и не обращаясь к уравнениям. Покинув стенку банки и держась в воздухе на неизменном уровне, муха давит крылышками на воздух с силою, равною весу насекомого; давление это передается дну банки. Следовательно, весы должны оставаться в том же положении, в каком были, когда муха сидела на стенке.

Так будет до тех пор, пока муха держится на одном уровне. Если же, летая в банке, муха поднимается вверх или опускается вниз, то чувствительные весы должны покачнуться. Чтобы предусмотреть, в какую сторону подастся чашка с банкой, представим себе сначала, что банка с мухой уединена где-нибудь в мировом пространстве. Что тогда произойдет с банкой при движении мухи? Подобно тому, как это было в задаче 21 с воздушным шаром, мы имеем здесь изолированную систему. Если какая-нибудь внутренняя

сила передвинет муху вверх, то центр масс системы сохранит неизменное положение лишь в том случае, когда банка сдвинется немного вниз. И наоборот, если муха усилиями крыльев опустится, банка должна подняться вверх, чтобы центр масс системы банка — муха оставался на прежнем месте.

Возвратимся теперь к реальным условиям, от которых мы отвлеклись. Банка с мухой находится не в мировом пространстве, а стоит на чашке весов. Ясно, что при полете мухи вверх чашка опустится, а полет вниз вызовет подъем чашки.

К сказанному необходимо прибавить, что полет мухи вверх или вниз предполагается ускоренным. Равномерное движение, т. е. движение по инерции, а следовательно, без участия силы, не вызывает никакого изменения в величине давления банки на чашку.

**23.** После рассмотрения предшествовавших задач не потребуется долгих объяснений, чтобы прийти к следующему ответу на поставленный вопрос. Когда маховик идет ускоренно вниз, чашка, к которой прикреплены нити, должна подниматься, так как освобождаемые нити не увлекают ее вниз с прежней силою. Когда же маховик поднимается замедленно вверх, то он натягивает наматывающиеся на его ось нитки, и они увлекают чашку вниз. Короче говоря, чашка и привязанный к ней маховик движутся навстречу друг к другу.

**24.** Пузырек уровня при движении вагона отходит от середины его то в одну, то в другую сторону,—но судить по этому признаку о наклоне пути нужно очень осмотрительно, так как движения пузырька не во всех случаях бывают обусловлены наклоном пути. При отходе от станции, когда поезд разгоняется, и при торможении, когда движение замедляется, пузырек уровня отплывает в сторону даже и на строго горизонтальном участке. И только когда поезд движется равномерно, без ускорения, уровень показывает нормально подъемы и уклоны пути.

Чтобы понять это, обратимся к рисункам. Пусть (рис. 36, а)  $AB$  — уровень,  $P$  — его вес в неподвижном поезде. Поезд трогается на горизонтальном пути в направлении, указанном стрелкой  $MN$ , т. е. идет

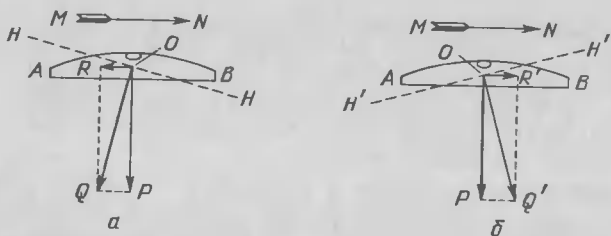


Рис. 36. Отклонение пузырька плотничьего уровня в движущемся вагоне (в. 24).

с ускорением. Опора под уровнем стремится выскользнуть вперед; следовательно, уровень стремится скользнуть по полу назад. Сила, увлекающая уровень назад в горизонтальном направлении, изображена на рисунке вектором  $OR$ . Равнодействующая  $Q$  сил  $P$  и  $R$  прижимает уровень к опорной плоскости, действуя на жидкость в нем как вес. Для уровня отвесная линия как бы направлена по  $OQ$ , и, следовательно, горизонтальная плоскость временно перемещается в  $HN$ . Ясно, что пузырек отвеса отойдет к концу  $B$ , приподнятому по отношению к новой горизонтальной плоскости. Это должно происходить на строго горизонтальном пути. На уклоне уровень может ложно показать горизонтальность пути или даже подъем, в зависимости от величины уклона и ускорения поезда.

Когда поезд начинает тормозить, расположение сил меняется. Теперь (рис. 36, б) опорная плоскость стремится отстать от уровня; на последний начинает действовать сила  $R'$ , увлекающая уровень вперед; при отсутствии трения она заставила бы уровень скользить к передней стенке вагона. Равнодействующая  $Q'$  сил  $P$  и  $R'$  направлена теперь вперед; временная горизонтальная плоскость перемещается в  $H'N'$ , и пузырек отходит к концу  $A$ , хотя бы поезд шел по горизонтальному пути.

Короче говоря, при наличии ускорения пузырек уровня отходит от центрального положения. Уровень показывает на горизонтальном пути подъем, когда поезд движется ускоренно, и уклон, когда поезд идет с замедлением. И только при отсутствии ускорения (положительного или отрицательного) уровень дает нормальные показания.

Нельзя также полагаться на уровень в движущемся поезде при суждении о поперечном наклоне пути: центробежный эффект, складываясь с силой тяжести, может на закруглениях пути обусловить обманчивые показания уровня\*).

**25.** а) Тот, кто думает, что пламя свечи, переносимой в закрытом фонаре, вовсе не будет отклоняться при движении фонаря, ошибается. Сделайте опыт с горящей спичкой; вы убедитесь, что если двинуть ее, защитив рукой, то пламя отклонится и притом, сверх ожиданий, не назад, а вперед. Причина отклонения вперед та, что пламя обладает меньшею плотностью, чем окружающий ее воздух. Одна и та же сила телу с меньшей массой сообщает большее ускорение, чем телу с большей массой. Поэтому пламя, двигаясь быстрее воздуха в фонаре, отклоняется вперед.

б) Та же причина — меньшая плотность пламени, нежели окружающего воздуха — объясняет и неожиданное поведение пламени при круговом движении фонаря: оно отклоняется внутрь, а не наружу, как можно было, пожалуй, ожидать. Явление станет понятно, если вспомним, как располагаются ртуть и вода в шаре, вращаемом на центробежной машине: ртуть располагается дальше от оси вращения, чем вода; последняя словно всплывает в ртуть, если считать «низом» направление от оси вращения (т. е. направление, в котором «падают» тела под действием центробежного эффекта). Более легкое, чем окружающий воздух, пламя свечи при круговом движении фонаря «всплывает» в воздухе «вверх», т. е. по направлению к оси вращения.

**26.** Читатель, подозревающий в вопросе подвох и готовый ответить, что стержень после сгибания останется в равновесии, — заблуждается. С первого взгляда может, пожалуй, показаться, что обе половины прута, как имеющие одинаковый вес, должны уравновешиваться. Но разве одинаковые грузы на рычаге всегда уравновешивают друг друга?

Для равновесия грузов на рычаге необходимо, чтобы отношение их величин было обратно отношению плеч. Пока стержень не был согнут, плечи были равны, так

---

\*1) Подробности об этом читатель найдет в книге: *Перельман Я. И. Занимательная физика.*—М.: Наука, 1991. (Примеч. ред.)

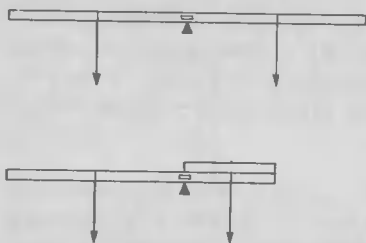


Рис. 37. Прямой стержень в равновесии, согнутый — нет (в. 26).

теперь не уравнивают друг друга: перетягивает левая часть, потому что вес ее приложен к точке, удаленной от точки опоры вдвое больше, чем в правой части (рис. 37, б). Итак, несогнутая часть стержня перетянет согнутую.

как вес каждой половины приложен был в ее середине (рис. 37, а); тогда равные веса их уравнивались. Но после сгибания правой половины стержня правое плечо рычага стало вдвое короче левого. И именно потому, что веса половин стержня равны, они те-

**27.** Оба безмена покажут одинаковую нагрузку — 25 Н. В этом легко убедиться, разложив (рис. 38) вес  $R$  гири на две силы,  $P$  и  $Q$ , приложенные в точках  $C$  и  $D$ . Так как  $MC = MD$ , то  $P = Q$ . Наклонное положение стержня не нарушает равенства этих сил.

**28.** Сила  $F$  (рис. 39) должна быть направлена под прямым углом к линии  $BC$ : тогда плечо этой силы будет наибольшим и, следовательно, для получения требуемого статического момента понадобится наименьшая сила.

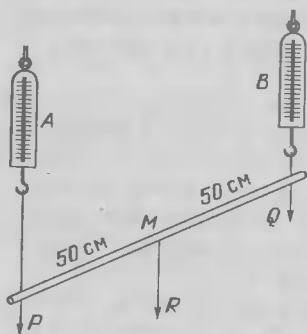


Рис. 38. Оба безмена растягиваются одинаково, так

$$\text{как } P = Q = \frac{1}{2}R \text{ (в. 27).}$$

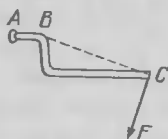


Рис. 39. Решение задачи о кривом рычаге (в. 28).

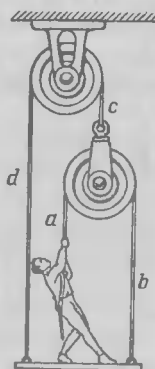


Рис. 40. К ответу на вопрос 29.



**29.** Определить величину искомого усилия можно путем следующих рассуждений (рис. 40). Пусть человек тянет за веревку  $a$  с силой  $x$  ньютонов. Натяжение веревки  $a$ , а также  $b$  (составляющей ее продолжение) будет, очевидно,  $x$ .

Как велико натяжение веревки  $c$ ? Оно уравнивает совокупное действие двух параллельных сил  $x$  и  $x$ ; следовательно, оно равно  $2x$ . Таково же должно быть и натяжение веревки  $d$ , составляющей продолжение  $c$ .

Платформа висит на двух веревках  $b$  и  $d$ . (Веревка  $a$  не прикреплена к платформе, а потому не подтягивает ее.) Натяжение  $b$  равно  $x$  ньютонов, натяжение  $d$  равно  $2x$  ньютонов. Совокупное действие этих параллельных сил, равное  $3x$  ньютонов, должно уравнивать груз в  $600 + 300 = 900$  Н (вес человека + вес платформы). Значит,  $3x = 900$  Н, откуда:

$$x = 300 \text{ Н.}$$

**30.** Как бы сильно веревка ни была натянута, она неизбежно будет провисать. Сила тяжести, вызывающая провисание, направлена отвесно, натяжение же веревки не имеет вертикального направления. Такие две силы ни при каких условиях не могут уравниваться, т. е. их равнодействующая не может равняться нулю. Эта-то равнодействующая и вызывает провисание веревки.

Никаким усилием, как бы велико оно ни было, нельзя натянуть веревку строго прямолинейно (кроме случая, когда она направлена отвесно). Провисание неизбежно: можно уменьшить его до желаемого значения, но нельзя свести его к нулю. Итак, всякая неотвесно натянутая веревка, всякий передаточный ремень должны провисать (рис. 41).

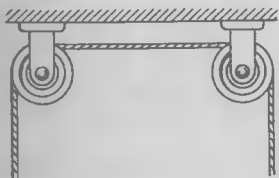


Рис. 41. Нельзя натянуть веревку так, чтобы она между блоками не провисала (в. 30).



Рис. 42. Гамак невозможно натянуть горизонтально (в. 30).

По той же причине невозможно, между прочим, натянуть и гамак так, чтобы веревки его были горизонтальные. Туго натянутая проволочная сетка кровати прогибается под грузом лежащего на ней человека. Гамак же, натяжение веревок которого гораздо слабее, при лежании на нем человека превращается в свешивающийся мешок (рис. 42).

**31.** Силы одного человека часто оказывается достаточно, чтобы извлечь тяжелую машину тем примитивным способом, который описан в задаче. Веревка, при любой ее натянутости, должна уступить действию даже умеренной силы, приложенной под углом к ее направлению. Причина — та же, какая заставляет провисать всякую натянутую веревку.

Возникающие при этом силы показаны на рис. 43. Сила  $CF$  тяги человека разлагается на две:  $CQ$  и  $CP$ , направленные вдоль веревки. Сила  $CQ$  тянет пень и,

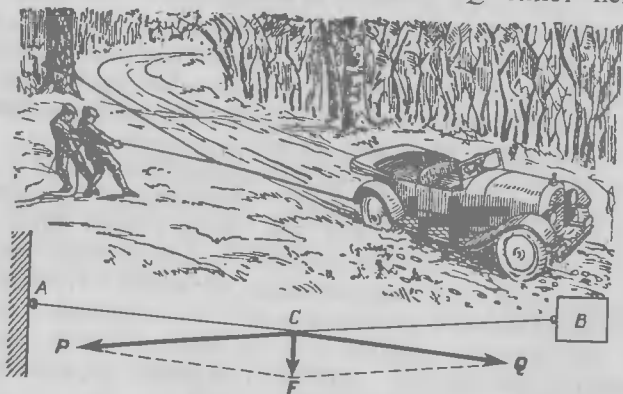


Рис. 43. Как вытащить автомобиль из выбоины (в. 31).

если он достаточно крепок, уничтожается его сопротивлением. Сила же  $CP$  увлекает автомобиль, и так как она значительно больше, чем  $CF$ , то может извлечь машину из выбоины. Выигрыш силы тем больше, чем больше угол  $PCQ$ , т. е. чем сильнее натянута веревка.

**32.** Смазка ослабляет трение средним числом раз в 10.

**33.** Можно думать, что так как сопротивление воздуха слабее, чем трение о лед, то тело, летящее

в воздухе, долетает дальше, чем скользящее по льду. Заключение это неправильно: оно не учитывает того, что сила тяжести пригибает вниз путь брошенного тела, которое вследствие этого и не может быть далеко закинуто.

Сделаем расчет, причем ради упрощения выкладок будем считать сопротивление воздуха равным нулю. Оно, впрочем, и действительно весьма мало для тех скоростей, какие можно сообщить телу рукой человека. Для тел, брошенных в пустоте под углом к горизонту, наибольшая дальность достигается тогда, когда угол равен  $45^\circ$ . При этом, как выводится в курсах механики, дальность бросания определяется формулой

$$L = v^2/g,$$

где  $v$  — начальная скорость,  $g$  — ускорение тяжести. Если же тело скользит по поверхности другого тела (в данном случае лед — по льду), то сообщенная ему кинетическая энергия  $mv^2/2$  расходуется на преодоление работы силы трения  $f$ , равной  $\mu mg$ , где  $\mu$  — коэффициент трения, а  $mg$  (произведение массы тела на ускорение тяжести) — вес тела. Работа силы трения на пути  $L'$  равна  $\mu mgL'$ . Из уравнения

$$mv^2/2 = \mu mgL'$$

находим величину  $L'$  пробега льдинки:

$$L' = \frac{v^2}{2\mu g}.$$

Принимая коэффициент трения льда о лед равным 0,02, имеем

$$L' = \frac{25v^2}{g}.$$

Между тем, дальность бросания в воздухе равна всего  $v^2/g$ , т. е. в 25 раз меньше.

Итак, заставив льдинку скользить по льду, мы можем закинуть ее раз в 25 дальше, чем бросив в воздух.

**34.** Игроки, наливающие кости свинцом, полагают, вероятно, что если одну часть игральной кости сделать тяжелее, то кубик будет падать преимущественно на эту сторону. Они ошибаются.

При падении костей с небольшой высоты сопротивление воздуха не оказывает заметного влияния на скорость движения, а в несопротивляющейся среде все тела падают с равным ускорением. Поэтому тяжелая часть кубика не станет поворачиваться в воздухе. Уловка недобросовестных игроков оказывается, следовательно, покушением с негодными средствами.

Могут спросить, почему же тело, вращающееся около оси, поворачивается тяжелой частью вниз? В этом случае нет свободного падения тела, здесь имеют место совсем другие условия действия сил, и оттого результат получается иной.

Заблуждение фальсификаторов игральные кости — весьма распространенная ошибка обыденных механических представлений. Мне вспоминается курьезная теория одного незнакомого посетителя, явившегося ко мне, чтобы поделиться своим «открытием». Открыл он «причину вращения земного шара»: все испарения дневной половины Земли собираются на ночную; темное полушарие становится от этого тяжелее, притягиваемое Солнцем сильнее, нежели дневное; это более массивное полушарие переваливается к Солнцу, обуславливая непрерывное вращение планеты. Убедить автора «теории» в ее нелепости мне не удалось.

**35.** «Тик-так» карманных часов длится не одну секунду, как часто думают, а только 0,4 секунды. Поэтому путь, проходимый падающим телом в этот промежуток времени, равен

$$\frac{9,8 \cdot 0,4^2}{2} = 0,784 \text{ (м)},$$

т. е. около 80 см.

**36.** Так как прыгать из движущегося вагона безопасно вперед, по направлению движения, то может казаться, что бутылка ударится о землю слабее, если ее кинуть вперед. Это неверно: вещи надо бросать назад, против движения поезда. Тогда скорость, сообщенная бутылке бросанием, будет отниматься от той, какую бутылка имеет вследствие инерции: в итоге бутылка встретит землю с меньшей скоростью. При бросании вперед произошло бы обратное: скорости сложились бы и удар получился бы сильнее.

То, что для человека безопаснее все же прыгать вперед, а не назад, объясняется совсем другими причинами: падая вперед, мы меньше расшибаемся, чем при падении назад\*).

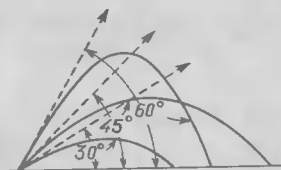


Рис. 44. К ответу на вопрос 38.

**37.** Тело, брошенное с некоторой начальной скоростью,—безразлично, в каком направлении,—подвержено той же силе тяжести, какая увлекает и тело, уроненное без начальной скорости. Ускорение падения для обоих тел одинаково, поэтому оба достигнут земли одновременно. Значит, вещь, брошенная из движущегося вагона, достигает земли в такой же промежуток времени, как и брошенная из вагона неподвижного.

**38.** Чертеж ошибочен. Дальность полета снарядов, брошенных под углами в  $90^\circ$  и  $60^\circ$ , должна быть одинакова (как и вообще для всяких углов, дополняющих друг друга до  $90^\circ$ ). На чертеже это не соблюдено (рис. 44).

Что касается снаряда, брошенного под углом в  $45^\circ$ , то на чертеже правильно показано, что дальность его наибольшая. Эта максимальная дальность должна вчетверо превышать подъем самой высокой точки траектории, что на чертеже также соблюдено (приблизительно).

**39.** В большинстве учебных книг утверждается без оговорок, что тело, брошенное в пустоте под углом к горизонту, движется по параболе. Весьма редко делается при этом замечание, что дуга параболы является только приближенным изображением истинной траектории тела; оно верно лишь при небольших начальных скоростях брошенного тела, т. е. пока тело не слишком удаляется от земной поверхности и, следовательно, можно пренебречь уменьшением силы тяжести.

Если бы брошенное тело двигалось в пространстве, где сила тяжести постоянна, путь его был бы строго

\*). См. Перельман Я. И. Занимательная физика.— М.: Наука, 1991. (Примеч. ред.)

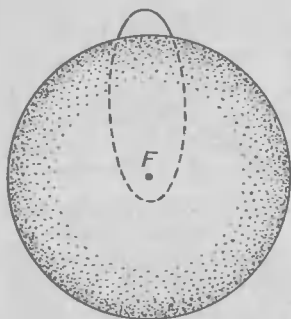


Рис. 45. Тело, брошенное наклонно к горизонту, должно в пустоте двигаться по дуге эллипса, фокус которого  $F$  находится в центре планеты (в. 39).

параболическим. В реальных же условиях, когда сила притяжения убывает с расстоянием по закону обратных квадратов, брошенное тело должно подчиняться законам Кеплера и, следовательно, двигаться по эллипсу, фокус которого находится в центре Земли (рис. 45).

Поэтому, строго говоря, каждое тело, брошенное на земной поверхности под углом к горизонту, должно в пустоте двигаться не по дуге параболы, а по дуге эллипса. При современных артиллерийских скоростях различие между обеими траекториями весьма незначительно. Но в будущем, когда технике придется иметь дело со скоростями крупных жидкостных ракет, нельзя будет даже приближенно принимать путь ракеты выше пределов атмосферы за параболический.

**40.** Скорость артиллерийского снаряда должна возрастать все время, пока давление на него пороховых газов сзади превосходит сопротивление воздуха спереди. Давление же пороховых газов не прекращается в момент выхода снаряда из канала орудия: газы продолжают давить на снаряд и вне орудия с силой, которая в первые мгновения превосходит сопротивление воздуха; следовательно, скорость снаряда должна еще в течение некоторого времени расти.

Только тогда, когда расширение газов в свободном пространстве уменьшит их давление до того, что оно станет слабее сопротивления воздуха, снаряд будет подвержен спереди большему напору, чем сзади, и скорость его станет уменьшаться. Итак, максимальной своей скорости снаряд действительно должен достигать не внутри орудия, а вне его, на некотором расстоянии

от жерла, т. е. спустя короткий промежуток после того, как он уже покинул ствол орудия.

**41.** Опасность прыжка в воду со значительной высоты состоит главным образом в том, что накопленная при падении скорость сводится к нулю на слишком коротком пути. Пусть, например, пловец бросается с высоты 10 м и погружается в воду на глубину одного метра. Скорость, накопленная на пути 10 м свободного падения, уничтожается на участке в 1 м. Отрицательное ускорение при погружении в воду должно быть в 10 раз больше ускорения свободно падающего тела. При погружении в воду пловец испытывает поэтому давление снизу, вдесятеро превосходящее обычное давление, порождаемое весом. Иными словами, тело пловца становится словно в 10 раз тяжелее—вместо 700 Н весит 7000 Н. Такой непомерный груз, действуя даже короткое время (пока длится погружение), может вызвать в организме серьезное расстройство.

Отсюда следует, между прочим, что вредные последствия прыжка смягчаются при возможно более глубококом погружении в воду; накопленная при падении скорость поглощается тогда на более длинном пути и ускорение (отрицательное) становится меньше.

**42.** Если плоскость стола перпендикулярна к отвесной линии, проходящей через ее середину (рис. 47), то края стола расположены, очевидно, выше, чем середина. При отсутствии трения шар должен поэтому скатиться с края стола к его середине (рис. 46, 47). Здесь, однако, он не может остановиться—накопленная кинетическая энергия увлечет его далее до

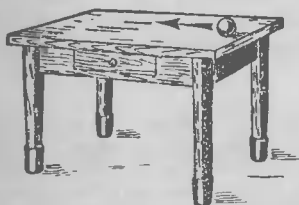


Рис. 46. Не кажется ли Вам при взгляде на такой рисунок, что шар должен скатиться к середине стола (в. 42)?

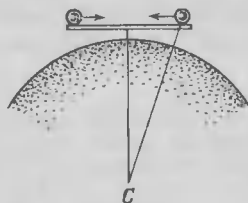


Рис. 47. Из этого чертежа ясно, что шар (при отсутствии трения) не может оставаться в покое (в. 42).

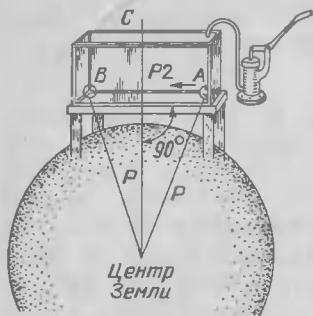


Рис. 48. Один из проектов «вечного движения» (в. 42).

ципе вечное движение. Проект его, изображенный на рис. 48, по идее совершенно правилен и осуществил бы вечное движение, если бы возможно было избавиться от трения. Впрочем, то же самое можно осуществить и проще—с помощью груза, качающегося на нити: при отсутствии трения в точке подвеса (и сопротивления воздуха) такой груз должен качаться вечно\*). Производить работу подобные приспособления, однако, не способны.

**43.** Не следует думать, что в положении *A* брусок, оказывая на опорную плоскость большее удельное давление, испытывает и большее трение. Величина трения не зависит от размеров трущихся поверхностей. Поэтому, если брусок скользил, преодолевая трение, в положении *B*, то он будет скользить и в положении *A* (рис. 49).

**44.** При решении этой задачи нередко делают существенную ошибку: не принимают во внимание, что отвесно падающий шар движется только поступательно, между тем как шар, скатывающийся

точки, находящейся на одном уровне с начальной, т. е. до противоположного края. Оттуда шар снова откатится в первоначальное положение и т. д. Короче говоря, при отсутствии трения о плоскость стола и сопротивления воздуха, шар, положенный на край идеально плоского стола, пришел бы в нескончаемое движение.

Один американец предлагал устроить на этом прин-

\*) В Парижской обсерватории был произведен (Борда) опыт с маятником, качающимся в безвоздушном пространстве при минимально уменьшенном трении в точке подвеса: маятник качался 30 часов. Интересно, как затухают постепенно колебания 98-метрового маятника, подвешенного в здании Исаакиевского собора. Первоначально 12-метровые размахи спустя 3 часа уменьшаются в 10 раз. Через 6 часов от начала наблюдений размахи сокращаются до 6 см, через 9 часов—до 6 мм. Спустя 12 часов от начала наблюдений, размахи делаются незаметными для невооруженного глаза.



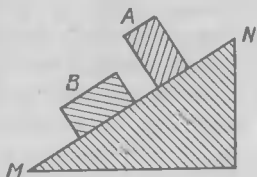


Рис. 49. К ответу на вопрос 43.

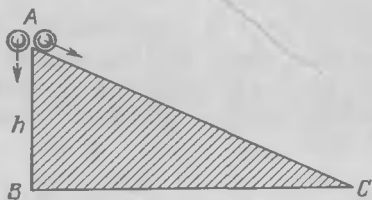


Рис. 50. К ответу на вопрос 44.

по плоскости, совершает кроме поступательного движения также и вращательное (рис. 50).

Какое влияние оказывает отмеченное обстоятельство на скорость скатывающегося тела, видно из следующего вычисления.

Потенциальная энергия шара, обусловленная его положением вверху наклонной плоскости, превращается при отвесном падении целиком в энергию поступательного движения, и из уравнения

$$mgh = \frac{mv^2}{2}$$

легко получается скорость  $v$  такого шара в конце пути:

$$v = \sqrt{2gh},$$

где  $h$  — высота наклонной плоскости.

Иначе обстоит дело с шаром, скатывающимся по наклонной плоскости. В этом случае та же потенциальная энергия  $mgh$  преобразуется в сумму двух кинетических энергий — в энергию поступательного движения со скоростью  $v_1$  и вращательного движения с угловой скоростью  $\omega$ . Величина первой энергии равна

$$\frac{mv_1^2}{2}.$$

Вторая равна полупроизведению момента инерции  $J$  шара на квадрат его угловой скорости  $\omega$ :

$$\frac{J\omega^2}{2}.$$

Имеем, следовательно, уравнение

$$mgh = \frac{mv_1^2}{2} + \frac{J\omega^2}{2}.$$

Из курса механики известно, что момент инерции  $J$  однородного шара массы  $m$  и радиуса  $R$  отно-

сительно оси, проходящей через центр, равен  $\frac{2}{5}mR^2$ . Далее, легко сообразить, что угловая скорость  $\omega$  этого шара, катящегося с поступательной скоростью  $v_1$ , равна  $v_1/R$ . Поэтому энергия вращательного движения

$$\frac{J\omega^2}{2} = \frac{1}{2} \cdot \frac{2}{5}mR^2 \cdot \frac{v_1^2}{R^2} = \frac{mv_1^2}{5}.$$

А сумма двух энергий будет равна

$$mgh = \frac{mv_1^2}{2} + \frac{mv_1^2}{5} = \frac{7}{10}mv_1^2.$$

Отсюда скорость поступательного движения

$$v_1 = \sqrt{2gh} \cdot \sqrt{5/7} \approx 0,84 \sqrt{2gh}.$$

Сопоставляя эту скорость со скоростью в конце отвесного падения ( $v = \sqrt{2gh}$ ), видим, что они заметно различаются: скатившийся шар в конце пути движется вперед со скоростью, на 16% меньшей, чем шар, свободно упавший с той же высоты.

Кто знаком с историей физики, тому известно, что Галилей установил законы падения тел, производя опыты с шарами, которые он пускал по наклонному желобу (длина — 12 локтей, возвышение одного конца — 1—2 локтя). После сказанного выше может возникнуть сомнение в правильности пути, избранного Галилеем. Сомнение, однако, отпадает, если вспомним, что скатывающийся шар, в своем поступательном перемещении, движется равноускоренно, так как в каждой точке наклонного желоба скорость его составляет одну и ту же долю (0,84) скорости падающего шара на том же уровне. Форма зависимости между пройденным путем и временем остается та же, что и для тела, свободно падающего. Поэтому Галилей и мог правильно установить законы падения тел в результате своих опытов с наклонным желобом.

«Пустив шар,— писал он,— по длине, равной четверти длины желоба, я нашел, что время пробега в точности равнялось половине времени, какое употреблялось для прохождения целого желоба... Из опытов, сто раз повторенных, я всегда находил, что проходимые пути относятся между собою, как квадраты времен».

**45.** Способ решения этой задачи подсказывается разбором предыдущей. Нетрудно догадаться, что для различения цилиндров всего проще воспользоваться неодинаковостью их моментов инерции; однородный алюминиевый цилиндр имеет иной момент инерции, чем составной, у которого бо́льшая часть массы сосредоточена на периферии. Соответственно этому должны быть различны и скорости их поступательного движения при скатывании с наклонной плоскости.

Момент инерции  $J$  однородного цилиндра относительно его продольной оси равен, как учит механика,

$$J = \frac{mR^2}{2}.$$

Для второго, неоднородного цилиндра, расчет сложнее. Прежде всего определим радиус и массу его пробковой цилиндрической части. Обозначив искомый радиус через  $x$ , радиус всего цилиндра по-прежнему через  $R$ , высоту цилиндров через  $h$  и имея в виду, что плотности (в г/см<sup>3</sup>) их материалов равны, соответственно, пробки—0,2; свинца—11,3; алюминия—2,7; можем записать следующее равенство:

$$0,2\pi x^2 h + 11,3(\pi R^2 h - \pi x^2 h) = 2,7\pi R^2 h.$$

Равенство означает, что сумма масс пробковой части цилиндра и его свинцовой оболочки равна массе алюминиевого цилиндра. Сделав упрощения, приводим наше уравнение к виду

$$11,1x^2 = 8,6R^2,$$

откуда

$$x^2 = 0,77R^2.$$

В дальнейшем нам понадобится значение именно  $x^2$ , поэтому корня не извлекаем.

Масса пробковой части составного цилиндра равна

$$0,2\pi x^2 h = 0,2\pi \cdot 0,77R^2 h = 0,154\pi R^2 h.$$

Масса свинцовой оболочки равна

$$2,7\pi R^2 h - 0,154\pi R^2 h = 2,55\pi R^2 h.$$

В процентах к общей массе это составляет: для пробковой части—6%, для свинцовой части—94%.

Вычислим теперь момент инерции  $J_1$  составного цилиндра; он равен сумме моментов его

составных частей — пробкового цилиндра и свинцовой оболочки.

Момент инерции пробкового цилиндра при радиусе  $x$  и массе  $0,06m$  (где  $m$  — масса алюминиевого цилиндра) равен

$$\frac{1}{2} M x^2 = \frac{1}{2} \cdot 0,06m \cdot 0,77R^2 = 0,0231mR^2.$$

Момент инерции свинцовой цилиндрической оболочки с радиусами  $x$  и  $R$  и массой  $0,94m$  равен

$$M \frac{x^2 + R^2}{2} = 0,94m \frac{0,77R^2 + R^2}{2} = 0,832mR^2.$$

Момент инерции  $J_1$  составного цилиндра равен поэтому

$$J_1 = 0,0231mR^2 + 0,832mR^2 \approx 0,86mR^2.$$

Скорости поступательного движения скатывающихся цилиндров найдем так же, как нашли мы их в предыдущей задаче для шаров. В случае однородного цилиндра имеем уравнение

$$mgh = \frac{mv_1^2}{2} + \frac{mv_1^2}{4},$$

или

$$gh = \frac{3}{4} v_1^2,$$

откуда

$$v_1 = 0,8 \sqrt{2gh}.$$

Для неоднородного цилиндра имеем

$$mgh = \frac{mv_2^2}{2} + \frac{0,86mR^2 v_2^2}{2R^2},$$

или

$$gh = 0,5 v_2^2 + 0,43 v_2^2 = 0,93 v_2^2,$$

откуда

$$v_2 = 0,73 \sqrt{2gh}.$$

Сравнивая обе скорости,

$$v_1 = 0,8 \sqrt{2gh}, \quad v_2 = 0,73 \sqrt{2gh},$$

видим, что скорость поступательного движения составного цилиндра на 9% меньше, чем однородного. По этому признаку и можно распознать алюминиевый цилиндр: он докатится до конца плоскости раньше составного.

Предоставим читателю самостоятельно рассмотреть видоизменение этой задачи, а именно — тот случай, когда в составном цилиндре свинец сосредоточен у оси, а пробка облегает свинцовый стержень снаружи. Какой цилиндр докатится тогда раньше до конца плоскости?

**46.** Песчинки, не касаясь во время падения дна сосуда, не оказывают на него давления. Можно думать поэтому, что в течение тех пяти минут, пока длится пересыпание песка, чашка с часами должна стать легче и подняться вверх. Опыт покажет, однако, другое. Чашка с часами качнется вверх только в первое мгновение, но затем в течение пяти минут весы будут сохранять равновесие до последнего момента, когда чашка с часами качнется вниз и весы придут снова в равновесие.

Почему же весы останутся пять минут в равновесии несмотря на то, что часть песка, падая, не оказывает на дно сосуда никакого давления? Прежде всего отметим, что в течение каждой секунды столько же песчинок покидает шейку часов, сколько их достигает дна. (Если допустить, что дна достигает больше песчинок, чем покидает шейку, то откуда берутся эти избыточные песчинки? При обратном же допущении — куда деваются недостающие песчинки?) Значит, каждую секунду становятся «невесомыми» столько же песчинок, сколько ударяются о дно сосуда. Каждой песчинке, становящейся невесомой, отвечает удар песчинки о дно.

Теперь произведем расчет. Пусть высота, с какой падает песчинка, равна  $h$ . Из уравнения

$$h = \frac{gt^2}{2},$$

где  $g$  — ускорение свободного падения, а  $t$  — продолжительность падения, имеем

$$t = \sqrt{\frac{2h}{g}}.$$

В течение такого промежутка времени песчинка не оказывает давления на чашку весов. Уменьшение веса этой чашки на вес песчинки в течение  $t$  секунд равносильно тому, что на чашку весов в течение  $t$  секунд действует направленная вверх сила, равная весу  $p$  песчинки.

Действие этой силы измеряется ее импульсом:

$$j = pt = mg \sqrt{\frac{2h}{g}} = m \sqrt{2gh}.$$

В течение такого же промежутка времени ударится в дно сосуда одна песчинка со скоростью  $v = \sqrt{2gh}$ . Импульс  $j_1$  такого удара равен количеству движения  $mv$  песчинки:

$$j_1 = mv = m \sqrt{2gh}.$$

Мы видим, что  $j = j_1$ , оба импульса равны. Чашка, подверженная равным, но противоположно направленным действиям, останется в равновесии.

Только в первый и в последний моменты пятиминутного промежутка времени равновесие весов (если они достаточно чувствительны) нарушится. В первый момент — потому, что некоторые песчинки уже покинут верхний сосуд часов, сделаются невесомыми, но ни одна не успеет еще удариться в дно нижнего сосуда; чашка с часами качнется вверх. К концу пятиминутного промежутка равновесие снова нарушится на мгновение: все песчинки уже покинули верхний сосуд, новых невесомых песчинок нет, а удары о дно нижнего сосуда еще происходят: чашка с часами качнется вниз. Затем снова наступит равновесие, на этот раз окончательное.

**47.** Наша задача представляет собой видоизменение знаменитой «обезьяньей» задачи Льюиса Кэрролла (оксфордского преподавателя математики, автора известной книжки «Алиса в стране чудес»).

Кэрролл предложил рисунок, который мы здесь воспроизводим (рис. 51), и поставил вопрос: «Куда подвинется груз, когда обезьяна начнет взбираться вверх по веревке?»

Ответы не были единообразны. Одни из решавших задачу утверждали, что, бегая по веревке, обезьяна не может оказать ни малейшего действия на груз: гиря не сдвинется с места. Другие полагали, что при движении обезьяны вверх груз будет опускаться. И лишь меньшинство высказало мысль, что гиря подвинется вверх, навстречу обезьяне.

Последний ответ и является единственно правильным: движение обезьяны или людей вверх должно

---

\*) Если пренебречь трением. При наличии значительного трения гиря может и не подняться.

вызвать не опускание, а подъем гири. Когда люди взбираются вверх по свисающей с блока веревке, сама веревка под их руками должна двигаться обратно вниз (сравните с подъемом человека по лестнице, свисающей с воздушного шара, в задаче 21). Но если веревка движется по блоку слева направо, то груз будет увлекаться ею вверх, т. е. подниматься.



Рис. 51. «Обезьянья задача»  
Льюиса Кэрролла (в. 47).

**48.** Груз в 2 кг, конечно, не будет опускаться, но не с ускорением  $g$  свободно падающего тела, а с меньшим. Так как движущая сила здесь равна  $(2-1)g$ , т. е.  $10\text{ Н}$ , а приводимая ею в движение масса равна  $1+2=3\text{ кг}$ , то ускорение замедленно опускающегося тела будет втрое меньше ускорения свободно падающего:

$$a = \frac{1}{3}g.$$

Далее, зная ускорение движущегося тела и его массу, легко вычислить силу  $F$ , порождающую это движение:

$$F = ma = \frac{mg}{3} = \frac{P}{3},$$

где  $P$  — вес груза, равный  $20\text{ Н}$ . Значит, груз  $2\text{ кг}$  увлекается вниз с силою в  $20/3\text{ Н}$ .

Такова сила натяжения веревки и так велика сила, тянущая вверх гирю в  $1\text{ кг}$ . С такой же силой, по закону противодействия, гиря в  $1\text{ кг}$  натягивает веревку. На блок действуют, следовательно, две параллельные силы по  $20/3\text{ Н}$ . Равнодействующая равна их сумме:

$$\frac{20}{3} + \frac{20}{3} = \frac{40}{3}\text{ Н}.$$

Итак, показание пружинного безмена равно  $40/3\text{ Н}$ .

**49.** Центр масс не изменит своего положения внутри конуса. Таково вообще свойство центра масс: положение его определяется лишь распределением масс в теле и не меняется с изменением положения самого тела по отношению к отвесной линии.

**50.** Пространство внутри свободно падающей кабины представляет особый мирок с совершенно исключительными свойствами (рис. 52). Все поставленные в подобной кабине тела опускаются точно с такой же скоростью, как и их опоры, а все подвешенные тела падают со скоростью точек их подвеса; поэтому первые не давят на свои опоры, вторые не обременяют точки подвеса. Иными словами, те и другие уподобляются телам, лишенным веса.

Становятся невесомыми и тела, свободно витающие в пространстве: уроненный предмет не падает на пол, а остается в том месте, где выпустили его из рук. Он не приближается к полу кабины потому, что одновременно с ним опускается сама кабина, тот и другая с одинаковым ускорением. Короче говоря, в падающей кабине мы имеем мир, свободный от тяжести,—превосходную лабораторию для тех физических опытов, ход которых заметно нарушается силой тяжести.

После сказанного легко ответить на вопросы, поставленные в задаче.

а) Указатель весов остановится на нуле: Ваше тело не будет вовсе сжимать пружины весов.

б) Из перевернутого кувшина вода не выльется.

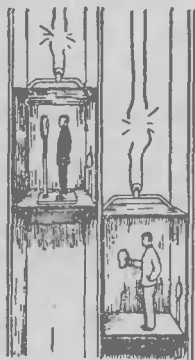


Рис. 52. К ответу на вопрос 50.

Описанные явления должны иметь место не только в кабине падающей, но и в кабине, свободно брошенной вверх, вообще в кабине, движущейся по инерции в поле тяготения. Так как все тела падают с одинаковым ускорением, то сила тяжести должна сообщать равное ускорение как самой кабине, так и телам внутри нее; по отношению друг к другу их положения не изменяются, а это то же самое, как если бы тела в кабине не были подвержены силе тяжести.

Подобная феерическая обстановка осуществится в каюте будущего ракет-



ного корабля во время перелетов, не только межпланетных, но и земных, например через Атлантический океан с одного материка на другой: сами пассажиры и все предметы на корабле станут невесомыми.

**51.** Причина, заставляющая чаинки собираться к центру дна чашки, кроется в том, что вращение нижних слоев воды тормозится трением о дно чашки. Действие центробежного эффекта, удаляющего частицы жидкости от оси вращения, оказывается поэтому для верхних слоев значительнее, чем для нижних. Вверху к стенкам чашки приливает больше воды, чем внизу, и, следовательно, внизу будет скапливаться у оси больше воды, чем вверху.

Легко видеть, что в итоге должно в чашке получиться вихревое движение, направленное в верхних слоях от середины к краям чашки, а в нижнем слое — от краев к середине. Следовательно, у дна будет существовать течение, направленное к оси чашки: оно-то и увлекает чаинки от краев чашки и поднимает их затем на некоторую высоту по ее осям (рис. 53).

Подобное же явление, но в гораздо более крупном масштабе происходит и в изогнутых местах речного русла: согласно теории, предложенной знаменитым А. Эйнштейном, благодаря этому явлению увеличивается извилистость рек (образуются так называемые меандры).

Предлагаемый здесь рис. 54, поясняющий связь обоих явлений, заимствован из статьи А. Эйнштейна «Причины образования извилин в руслах рек и так называемый закон Бэра» (1926 г.).

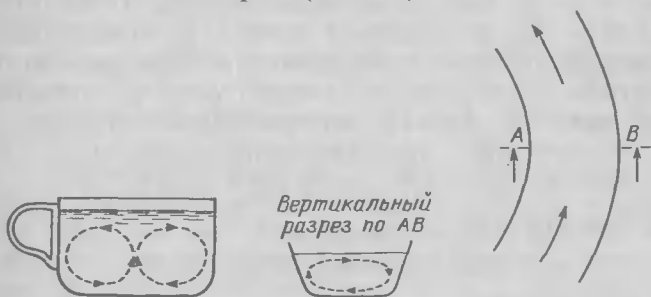


Рис. 53. Вихри в чашке чая. Из статьи А. Эйнштейна (в. 51).

Рис. 54. Вихревое движение воды у изгиба реки. Из статьи А. Эйнштейна (в. 51).

**52.** Стоя на доске качелей, безусловно, можно надлежащими телодвижениями постепенно увеличить размах качаний и довести их до желаемой величины. Для этого нужно:

1) находясь в высшей точке — приседать и оставаться в такой позе до момента, когда веревки качелей будут направлены отвесно, т. е. когда будет достигнута низшая точка;

2) находясь в низшей точке — выпрямляться и оставаться в этой позе до момента достижения высшей точки.

Короче: идти вниз присев, а вверх — поднявшись, делая два движения за одно качание доски.

Механическая целесообразность этих приемов вытекает из того, что качели есть физический маятник, длиной которого следует считать расстояние от места подвеса до центра масс качающегося груза. Когда человек на качелях приседает, он опускает центр масс качающегося груза; выпрямляясь, человек повышает центр масс груза. Следовательно, длина маятника попеременно то увеличивается, то уменьшается, изменяясь дважды за одно качание.

Рассмотрим, как должен качаться такой маятник переменной длины.

Пусть маятник  $AB$ , придя в отвесное положение  $AB'$  (рис. 55), укоротился до  $AC'$ . Так как груз маятника опустился на величину  $DB'$ , то он накопил запас кинетической энергии, который должен на дальнейшем отрезке пути поднять этот груз на равную высоту. Оттого, что груз поднялся из точки  $B'$  в  $C'$ , запас этот не уменьшился, так как работа поднятия производится не за счет накопленной энергии. Поэтому груз из точки  $C'$  отклонением отвеса в положение  $AC$  должен быть поднят на величину  $C'H$ , равную  $B'D$ . Нетрудно убедиться, что новый угол  $b$  отклонения нити маятника больше первоначального угла  $a$ :

$$\begin{aligned} DB' &= AB' - AD = AB(1 - \cos a), \\ HC' &= AC' - AH = AC(1 - \cos b). \end{aligned}$$

Так как  $DB' = HC'$ , то

$$AB(1 - \cos a) = AC(1 - \cos b)$$

и, следовательно,

$$\frac{AC}{AB} = \frac{1 - \cos a}{1 - \cos b}.$$

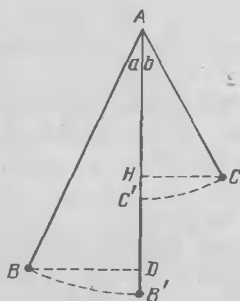


Рис. 55. Прямое движение на качелях (в. 52).

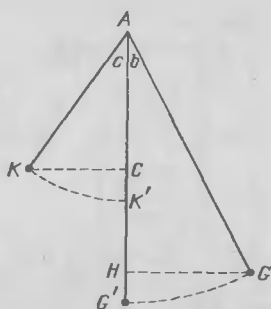


Рис. 56. Обратное движение на качелях (в. 52).

Преобразуя выражения  $1 - \cos a$  и  $1 - \cos b$ , получаем

$$\frac{AC}{AB} = \frac{1 - \cos a}{1 - \cos b} = \left( \frac{\sin \frac{a}{2}}{\sin \frac{b}{2}} \right)^2.$$

Но в нашем случае  $AC$  меньше  $AB$ , поэтому

$$\sin \frac{a}{2} < \sin \frac{b}{2}.$$

А так как оба угла острые, то

$$a < b.$$

Итак, нить маятника (и веревка качелей) должна отклониться от отвесного направления дальше, чем находилась от него первоначально. Таков эффект поднятия человека на качелях при восходящем движении доски.

Проследим за обратным движением — от крайнего высшего положения груза маятника к низшему его положению, принимая во внимание, что длина маятника при этом увеличилась: груз из точки  $C$  опустился в  $G$ . Когда маятник из положения  $AG$  (рис. 56) переходит в  $AG'$ , груз, опускаясь на величину  $HG'$ , приобретает запас потенциальной энергии, который при дальнейшем движении маятника должен поднять груз на равную высоту. Но так как в положении  $AG'$  груз из  $G'$  поднимается в  $K$ , то при дальнейшем движении маятник отойдет на угол  $c$ , больший, чем угол  $b$ , по причине, которую мы уже рассмотрели раньше. Итак,

$$c > b > a.$$

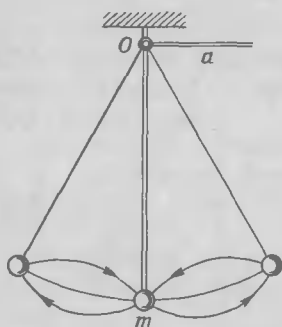


Рис. 57. Модель качелей. Из «Курса теоретической физики» проф. А. А. Эйхенвальда (в. 52).

Угол отклонения нити маятника, а следовательно, и веревки качелей при пользовании указанным приемом, как видим, с каждым качанием увеличивается и может быть доведен постепенно до желаемой величины.

При другом порядке движений можно тем же приемом затормозить качели и даже вовсе остановить их.

Профессор А. А. Эйхенвальд в своей «Теоретической физике» описывает несложный опыт, позволяющий проверить

сказанное без качелей. Надо «повесить груз  $m$  на нитке, продетой через неподвижное кольцо  $O$  (рис. 57). Другой конец нитки  $a$  мы можем двигать вправо и влево и тем самым периодически изменять длину маятника  $Om$ . Если двигать конец  $a$  с частотой, вдвое большей, чем частота колебаний маятника, и взять подходящую фазу движений, то можно раскачать маятник очень быстро».

**53.** Огромные расстояния между небесными телами должны, конечно, значительно ослаблять силу их взаимного притяжения. Но если велики небесные расстояния, то невообразимо огромны и массы небесных тел. Мы склонны недооценивать величину космических масс. Между тем даже те небесные тела, которые на языке астрономов называются «крошечными» — вроде спутников Марса и «мелких» астероидов, обладают массами, исполинскими в обиходном масштабе.

Самый миниатюрный из всех известных астероидов имеет в объеме  $10-15 \text{ км}^3$ . А представляем ли мы себе хотя бы примерно, какова масса  $1 \text{ км}^3$  вещества, даже если плотность его такая же, как у воды? Сделаем подсчет. В кубическом километре  $(10^5)^3 = 10^{15} \text{ см}^3$ ; такое количество воды имеет массу  $10^{15} \text{ г}$ , т. е.  $10^9 \text{ т}$ .

Тысяча миллионов тонн! Весь годовой грузооборот железных дорог СССР не составляет и половины этой величины. Небесные же тела содержат сотни миллионов и миллиарды кубических километров вещества, зачастую более плотного, чем вода.

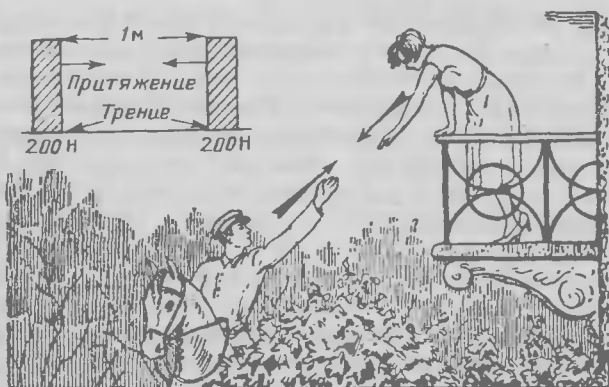


Рис. 58. Два человека на расстоянии 1 м взаимно притягиваются с силой  $3 \cdot 10^{-7}$  Н; трение же, препятствующее сближению, достигает 200 Н (в. 53).

Сила притяжения, зависящая от произведения столь колоссальных масс, не ослабляется до ничтожных значений даже огромным расстоянием между телами. Земля и Луна притягиваются с силой  $2 \cdot 10^{20}$  Н, между тем как два человека на расстоянии 1 м притягиваются с силой всего  $3 \cdot 10^{-7}$  Н (рис. 58), а два линейных корабля на расстоянии 1 км — с силой 0,04 Н (рис. 59). Такие силы не могут, конечно, преодолеть ни трения ног человека об опору, ни сопротивления воды движению судна.

Вот почему тяготение влечет друг к другу солнца и миры — и в то же время не проявляется заметным образом во взаимодействиях тел на земной поверхности.

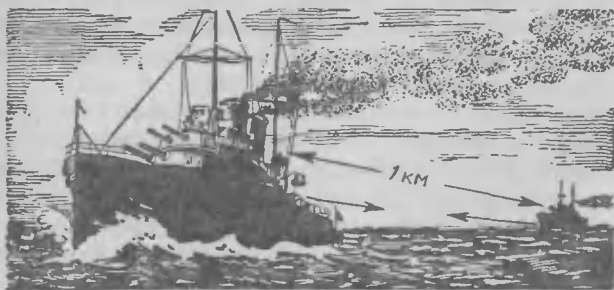


Рис. 59. Два линкора по 20000 т на расстоянии 1 км притягиваются с силой 0,04 Н (в. 53).

Этого не понимал Э. Карпентер, автор на шумевшей в свое время брошюры «Современная наука»; брошюра привлекла к себе внимание у нас, так как она появилась в переводе Л. Н. Толстого, снабдившего ее одобрительным предисловием. Карпентер подверг критике все здание науки и, между прочим, в числе доводов, подрывающих будто бы доверие к научным положениям, привел указание на чрезмерную слабость силы тяготения:

«Мы обыкновенно не представляем себе, насколько мала сила тяготения. Вычислено, что между двумя массами, каждая 415 000 т, находящимися на расстоянии одной мили одна от другой, сила притяжения равна всего 1 фунту; если бы такие тела отстояли друг от друга на расстоянии радиуса лунной орбиты, то сила притяжения между ними равнялась бы 1/57 600 000 000 фунта. Вот как незначительна сила, управляющая движением тела в 415 000 т».

Критик поддался обманчивому влиянию земных масштабов. Что такое 415 000 т, даже целый миллион тонн? Тело подобной массы, если бы было оно и не плотнее воды, занимало бы объем всего лишь в тысячную долю кубического километра, т. е. имело бы размеры, в астрономическом масштабе совершенно ничтожные. Удаленные друг от друга на расстояние Луны, такие две небесные пылинки двигались бы около общего центра масс со столь невероятной медленностью<sup>\*)</sup>, что ни у кого не могли бы вызвать изумления перед чрезмерной малостью силы, управляющей их движениями.

**54.** Рассуждение, изложенное в задаче, ошибочно, хотя ошибка и не сразу заметна. Она, однако, легко обнаруживается, если сказанное о Земле и Луне попробовать применить к Солнцу и Земле. Тогда рассуждение получит такой вид.

Земные тела притягиваются не только Землей, но и Солнцем, и должны, казалось бы, падать к общему центру масс Земли и Солнца. Эта точка лежит внутри солнечного шара (потому что масса Солнца в 330 000 раз больше земной, а расстояние между центрами обоих тел равно ~200 солнечным радиусам).

---

<sup>\*)</sup> Скорость движения была бы порядка 0,01 мм в секунду.

Выходит, следовательно, что все отвесы на земном шаре должны быть направлены ... к Солнцу!

Явная несообразность подобного вывода облегчает разыскание ошибки в ходе рассуждения. Солнце, конечно, притягивает все земные тела,—но притягивает оно также и весь земной шар. Ускорения, сообщаемые Солнцем каждому грамму земного шара и каждому грамму любого тела на поверхности Земли, равны. Земной шар и предметы на нем должны под действием солнечного притяжения получать одинаковые перемещения к Солнцу; иными словами, должны находиться в относительно покое. Отсюда следует, что притяжение Солнца не может влиять на падение земных тел: тела должны падать к Земле так, как если бы солнечного притяжения не существовало вовсе.

Сказанное применимо и к системе Земля—Луна. Не только в том смысле, что лунные тела не должны падать на Землю, но и в том, что земные тела должны падать к центру Земли, как если бы лунного притяжения не существовало. Лунное притяжение, безусловно, заставляет все земные тела перемещаться к Луне, но точно такое же перемещение оно сообщает и всему земному шару. Поэтому притяжение Луны не может оказывать никакого влияния на падение тел к Земле: взаимное притяжение между Землей и телами на ней происходит так, словно Луна не существует.

(Надо заметить, что ошибка, вплетенная в вопрос этой задачи, принадлежит к весьма распространенным и влечет за собой разнообразные ложные заключения. На подобном заблуждении, между прочим, основана была нашумевшая недавно «теория» одного ленинградского инженера о зависимости состояния погоды от притяжения Луною земной атмосферы. Автору теории было указано одним из оппонентов, что притяжение Луны сообщает одинаковые ускорения и частицам воздуха, и всему земному шару. Довод этот встречен был недоверчиво не только докладчиком, но и его слушателями-инженерами. «Сдвинуть Землю—шутка ли!»—расслышал я насмешливый возглас. Неудивительно, что в аудитории с подобным знанием основ динамики вздорная теория докладчика могла пользоваться успехом.)

## II. СВОЙСТВА ЖИДКОСТЕЙ

---

### ВОПРОСЫ

**55. Вода и воздух.** Что тяжелее: атмосфера земного шара или вся его вода? Во сколько раз?

**56. Самая легкая жидкость.** Назовите самую легкую жидкость.

**57. Задача Архимеда.** Легендарный рассказ о задаче Архимеда с золотой короной передается в различных вариантах. Древнеримский архитектор Витрувий (I век нашей эры) сообщает об этом следующее:

«Когда Гиерон<sup>\*)</sup>, достигший царской власти, пожелал в благодарность за счастливые деяния пожертвовать в какой-либо из храмов золотую корону, он повелел изготовить ее и передал мастеру необходимый материал. В назначенный срок тот принес изготовленную корону. Гиерон был доволен: вес короны соответствовал количеству материала. Но позже стали доходить слухи, что мастер похитил некоторое количество золота, подменив его серебром. Гиерон, рассерженный обманом, просил Архимеда придумать способ обнаружить подмену.

Занятый этим вопросом, Архимед пришел случайно в баню и, войдя в ванну, заметил, что вода вылилась через край из ванны в количестве, отвечающем глубине погружения тела. Сообразив причину явления, он не остался в ванне, а радостно выскочил и нагой побежал домой, на бегу крича по-гречески: «Эврика, эврика!» (нашел).

Затем, исходя из своего открытия, он взял два куска того же веса, как корона, один из золота,

---

<sup>\*)</sup> Сиракузский правитель, по преданию — родственник Архимеда.



другой из серебра. Наполнив глубокий сосуд доверху водой, он погрузил в него серебряный кусок. Вынув кусок, он дополнил сосуд тем количеством воды, какое из него вылилось, измеряя приливаемую воду, пока сосуд вновь наполнился до краев. Отсюда он нашел, какой вес серебра соответствовал определенному объему воды. После того он опустил подобным же образом в наполненный сосуд кусок золота и, когда пополнил вытекшую воду, нашел измерением, что вытекло ее меньше—настолько, насколько кусок золота имеет меньший объем, чем кусок серебра того же веса. Когда затем он еще раз наполнил сосуд и погрузил в него корону, он нашел, что вытекло воды более, чем при погружении куска золота, и с помощью этого избытка вычислил примесь серебра к золоту, обнаружив таким образом обман мастера».

Можно ли было по методу Архимеда вычислить количество золота, подмененное в короне серебром?

**58. Сжимаемость воды.** Что сжимается под давлением больше—вода или свинец?

**59. Стрельба по воде.** Открытый ящик из фанеры с парафинированными стенками 20 см длины и 10 см ширины налит водой до высоты 10 см. В ящик стреляют из ружья—и он разносится в щепки, а вода превращается в облако мелкой пыли (рис. 60).

Чем объяснить подобное действие выстрела?

**60. Электрическая лампочка под автомобилем.** Может ли электрическая лампочка выдержать в воде давление груза в полтонны (рис. 61)? Диаметр поршня 16 см.

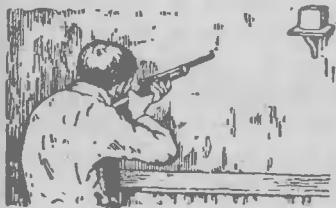


Рис. 60. Стрельба по ящику с водой (в. 59).

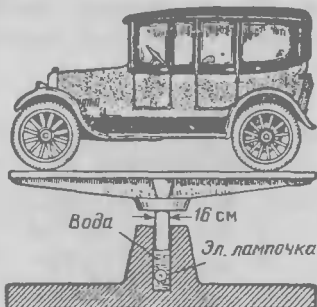


Рис. 61. Уцелеет ли лампочка (в. 60)?

**61. Плавание в ртути.** Два сплошных цилиндра одинаковой массы и равного диаметра, алюминиевый и свинцовый, плавают стоя в ртути. Который сидит глубже?

**62. Погружение в сыпучий песок.** Применим ли закон Архимеда к телам сыпучим? Как глубоко может погрузиться в сухой песок деревянный шар, положенный на его поверхность? Может ли человек утонуть с головой в сыпучем песке?

**63. Шарообразная форма жидкости.** Какое имеется лучшее доказательство того, что жидкости в невесомом состоянии принимают строго шарообразную форму?

**64. Капля воды.** В каком случае из крана самовара падают более тяжелые капли: когда вода горяча или когда она остыла?

**65. Капиллярное поднятие.**

а) Как высоко должна подняться вода в стеклянной трубке с просветом в один микрометр?

б) Какая жидкость поднялась бы в такой трубке всего выше?

в) Какая вода поднимается в капиллярных трубках выше — холодная или горячая?

**66. В наклонной трубке.** В отвесной капиллярной трубке жидкость поднимается на 10 мм над уровнем в сосуде. Как высоко поднимается она, если трубку наклонить под углом в  $30^\circ$  к поверхности жидкости (рис. 62).

**67. Движущиеся капли.** Имеются две тонкие стеклянные трубки, расширяющиеся к одному концу (рис. 63). В первую трубку у точки *A* введена капля

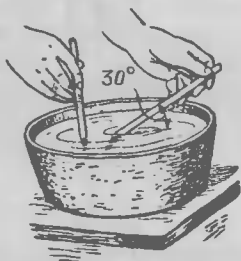


Рис. 62. В какой трубке вода поднимается выше (в. 66)?

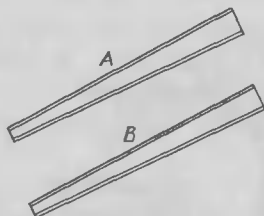


Рис. 63. Задача о двух трубках (в. 67).

ртути, во вторую у точки В — капля воды. При этом наблюдается, что капли не остаются в покое, а движутся вдоль трубок. Почему?

Куда капли подвигаются: к широкому или к узкому концу трубок?

**68. Пластика на дне сосуда с жидкостью.** Если ко дну стеклянного сосуда с водой приложить вплотную деревянную пластинку, она всплывет. Если ко дну такого же сосуда с ртутью приложить стеклянную пластинку, она не всплывет. Между тем известно, что плавучесть стекла в ртути (разность значений плотности ртути и стекла) гораздо больше, чем плавучесть дерева в воде.

Почему же деревянная пластинка в воде всплывает, а стеклянная в ртути не всплывает?

**69. Отсутствие поверхностного натяжения.** При какой температуре поверхностное натяжение жидкости равно нулю?

**70. Поверхностное давление.** С какой приблизительно силой сдвигается жидкость своим поверхностным слоем?

**71. Водопроводный кран.** Почему водопроводный кран устраивают заворачивающимся, а не поворотным, как в самоваре (рис. 64)?

**72. Скорость вытекания.** Какая жидкость — вода или ртуть — вытечет из воронки скорее, если высота уровней одинакова?

**73. Задачи о ванне.**

а) Ванна с отвесными стенками может быть наполнена из крана за 8 минут, а опорожнена через выпускное отверстие (при закрытом кране) за 12 минут. За сколько времени наполнится она, если при открытом выпускном отверстии держать первоначально пустую ванну под открытым краном (рис. 65)?

б) Ванна наполняется за 8 минут; при закрытом кране и открытом выпускном отверстии она опорож-

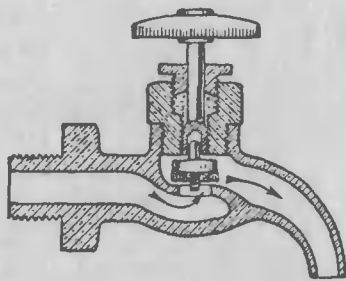


Рис. 64. Почему водопроводные краны устраивают заворачивающимися (в. 71)?



Рис. 65. Головоломные задачи с ванной (в. 73).

няется также за 8 минут. Сколько воды окажется в первоначально пустой ванне, если целые сутки наливает в нее воду из крана при открытом выпускном отверстии?

в) Решить ту же задачу, если продолжительность наполнения по-прежнему 8 минут, а опорожнения — 6 минут.

г) Решить ту же задачу, если продолжительность наполнения

полчаса, а опорожнения — 5 минут.

д) Ванна опорожняется в срок более короткий, чем продолжительность ее наполнения из крана. Удержится ли в ней хотя бы немного воды, если одновременно наливает пустую ванну и выпускать из нее воду?

**74. Водяные вихри.** Опорожняя ванну, мы замечаем близ выпускного отверстия водяной вихрь. В какую сторону он вращается: по часовой стрелке или против нее? Почему?

**75. В половодье и в межень.** Почему в половодье (рис. 66) поверхность реки выпуклая, а в межень (т.е. при низком стоянии воды) — вогнутая (рис. 67)?

**76. Волны прибоя.** Почемугибаются гребни морских волн, набегающих на берег (рис. 68)?

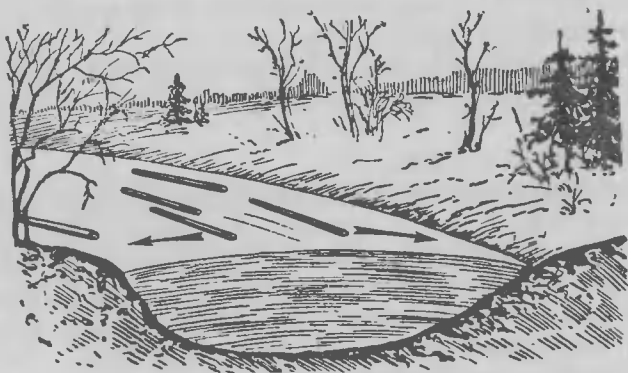


Рис. 66. Поверхность реки в половодье (в. 75).

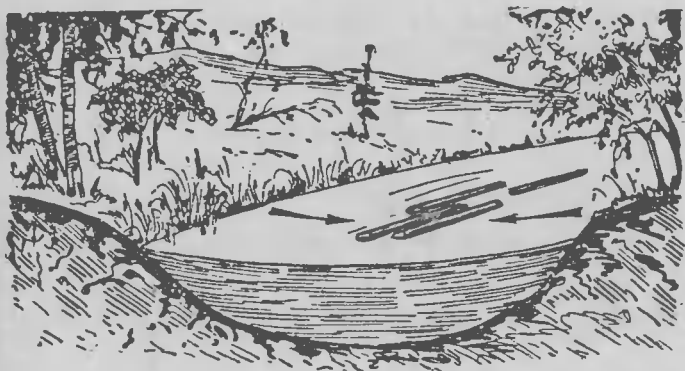


Рис. 67. Поверхность реки в межень (в. 75).

**77. Задача Колладона.** Следующий вопрос был сто лет назад предложен известным физиком Колладоном, учащимся так называемой Центральной школы (инженерной академии) в Париже:

«Судно переместилось вверх по течению реки, поднявшись при этом на 170 м (от Марселя до Лиона). При вычислении работы, затраченной на это передвижение, надо ли помимо сопротивления движущейся воды принять в расчет также и произведение веса судна на высоту 170 м?»

Дайте ответ.



Рис. 68. Гребни морских волн, набегающих на берег, загибаются (в. 76).

## ОТВЕТЫ НА ВОПРОСЫ 55—77

**55.** Несложный расчет дает возможность определить приблизительное отношение массы атмосферы к массе всех водных запасов нашей планеты. Вес атмосферы равен весу водяного слоя высотой около 10 м (0,01 км), равномерно покрывающего всю поверхность земного шара. Если радиус Земли  $R$  километров, то масса атмосферы (в миллиардах тонн)

$$4\pi R^2 \cdot 0,01 = 0,04\pi R^2.$$

Океаны же при средней глубине около 4 км занимают  $\frac{3}{4}$  земной поверхности. Отсюда масса воды всех океанов (в миллиардах тонн):

$$\frac{3}{4} \cdot 4\pi R^2 \cdot 4 = 12\pi R^2.$$

Искомое отношение равно

$$12\pi R^2 : 0,04\pi R^2 = 300.$$

Итак, вся вода земного шара весит примерно в 300 раз больше, чем весь воздух (точнее — в 270 раз).

**56.** Наименьшей плотностью из всех жидкостей обладает сжиженный водород:  $0,07 \text{ г/см}^3$ . Он легче воды в 14 раз — примерно во столько же раз, во сколько вода легче ртути. Второе место по легкости среди жидкостей занимает сжиженный гелий с плотностью  $0,15 \text{ г/см}^3$ .

**57.** По тем данным, которыми располагал Архимед, он вправе был утверждать лишь, что корона — не чисто золотая. Но установить в точности, сколько именно золота утаено мастером и заменено серебром, Архимед не мог. Это было бы возможно, если бы объем сплава из золота и серебра строго равнялся сумме объемов составных его частей. Легенда приписывает Архимеду именно такой взгляд, который разделяет, по-видимому, и большинство составителей современных школьных учебников.

В действительности только немногие сплавы отличаются таким свойством. Что касается объема сплава золота с серебром, то он меньше суммы объемов входящих в него металлов. Иными словами, плотность такого сплава больше плотности, получаемой в результате расчета по правилам простого смешения. Нетрудно понять, что, вычисляя на основании своего опыта количество похищенного золота, Архимед должен был получить результат преуменьшенный: более высокая плотность сплава являлась в его глазах доказательством большего содержания в нем золота. Поэтому он не мог обнаружить всего количества утаенного золота.

Как же следовало разрешить задачу Архимеда?

«В настоящее время, — пишет проф. Меншуткин в своем «Курсе общей химии», — мы поступили бы

так. Мы определили бы плотность не только чистых золота и серебра, но и ряда промежуточных сплавов их точно известного состава; выразили бы полученные данные графически и получили бы таким образом диаграмму. Эта диаграмма дает нам кривую изменений плотности сплавов золота и серебра в зависимости от их состава; в данном случае получается прямая линия — плотность изменяется линейно с составом сплава. Определив теперь плотность короны, откладываем полученный результат на кривой плотности системы золото—серебро и смотрим, какому составу сплава отвечает найденная плотность, таков и будет состав металла короны».

Другое дело, если бы золото было заменено не серебром, а медью: объем сплава золота с медью в точности равен сумме объемов его составных частей. В этом случае способ Архимеда дает безошибочный результат.

**58.** Несжимаемость жидкостей подчеркивается школьными учебниками так настойчиво, что внушается мысль, будто жидкости в самом деле несжимаемы,—во всяком случае поддаются сжатию в меньшей степени, нежели тела твердые. На самом деле «несжимаемость» жидкостей есть лишь фигуральное выражение для их весьма слабой сжимаемости, и то по сравнению не с твердыми телами, а с газами. Если же сопоставлять сжимаемость жидкостей со сжимаемостью твердых тел, то окажется, что жидкость сжимается во много раз сильнее их.

Наиболее сжимаемый из металлов — свинец — уменьшает при всестороннем сжатии свой объем на 0,000006 первоначального под давлением одной атмосферы. Между тем вода под таким же давлением сжимается на 0,00005, т. е. приблизительно в 8 раз сильнее. По сравнению же со сталью вода сжимается в 70 раз больше\*).

Весьма сильной сжимаемостью из жидкостей отличается азотная кислота: она сокращает свой объем под давлением одной атмосферы на 0,00034, т. е. в 500 раз больше стали. Зато по сравнению с газами

---

\*) Под давлением в 25 000 ат метровый водяной столб сжимается до высоты 65 см (опыты Джеймса Бассета, 1933 г.).

сжимаемость жидкостей действительно ничтожна: в десятки тысяч раз меньше.

**59.** Явление объясняется слабой сжимаемостью и, кроме того, абсолютной упругостью жидкостей. Пуля проникает в воду так быстро, что уровень жидкости не успевает подняться. Вода поэтому должна мгновенно сжаться на величину объема пули. Возникающее сильнейшее давление разносит стенки ящика и распыляет воду.

Простая оценка дает представление о величине этого давления. В ящике заключается  $20 \times 10 \times 10 = 2000 \text{ см}^3$  воды. Объем пули  $1 \text{ см}^3$ . Вода должна сжаться на  $1/2000$ , или на  $0,0005$  своего объема. Под давлением в 1 ат вода сжимается на  $0,0005$ , т. е. в 10 раз меньше. Следовательно, уменьшение объема жидкости в ящике должно сопровождаться возрастанием ее давления до 10 ат; таково примерно рабочее давление в цилиндре паровой машины. Легко вычислить, что на каждую стенку и дно ящика будут действовать силы в  $10\,000$ — $20\,000 \text{ Н}$ .

Этим объясняется и сильное разрушительное действие снарядов, взрывающихся под водой. «Если снаряд разорвется даже в 50 м от подводной лодки, но достаточно глубоко, чтобы сила взрыва не рассеялась на поверхности моря, то лодка неминуемо погибает» (Милликен).

**60.** Рассчитаем давление, которому подвержены стенки лампочки. Сечение поршня равно

$$S = \frac{\pi}{4} \cdot 16^2 = 201 \text{ см}^2.$$

Так как вес автомобиля  $5000 \text{ Н}$ , то на квадратный сантиметр приходится давление

$$5000 : 201 \approx 25 \text{ Н/см}^2.$$

Лампочка обычного образца выдерживает даже несколько большее давление—до  $27 \text{ Н/см}^2$ . Поэтому в условиях поставленного вопроса лампочка раздавлена не будет.

Вопрос имеет практическое значение для подводных работ. Выдерживая давление в 2,7 ат, обычная электрическая лампочка пригодна для употребления на глубинах до 27 м (для больших глубин изготавливаются особые лампы).



**61.** Не надо подозревать, что уловка вопроса кроется в отвесном плавании цилиндров: цилиндрическое тело не может будто бы плавать в вертикальном положении, а должно опрокинуться на бок. Это не верно: при достаточной величине диаметра по сравнению с высотой цилиндр может плавать в устойчивом положении.

Сама по себе задача не трудна, но порождает иногда ошибочные представления. Алюминиевый цилиндр в 4 раза длиннее свинцового, имеющего ту же массу и диаметр. Можно думать поэтому, что, плавая в ртути стоймя, он должен погружаться в нее глубже, чем свинцовый. С другой стороны, тяжелый свинец должен как будто глубже погружаться в жидкость при плавании, чем легкий алюминий.

Ни то, ни другое не верно: оба цилиндра погружаются при плавании на одинаковую глубину. Причина понятна: имея одинаковый вес, они по закону Архимеда должны вытеснять при плавании одинаковые объемы жидкости: а так как диаметры их равны, то и длина погруженных частей обоих цилиндров должна быть одинакова — иначе они не вытесняли бы равных объемов ртути.

Интересно, во сколько раз алюминиевый цилиндр будет выступать над ртутью выше свинцового. Легко вычислить, что свинцовый цилиндр должен выступать на 0,17 своей длины, а алюминиевый — на 0,8. Но так как алюминиевый цилиндр длиннее свинцового в 4,2 раза, то 0,8 длины алюминиевого цилиндра больше 0,17 длины свинцового в

$$\frac{0,8 \cdot 4,2}{0,17} \approx 20 \text{ раз.}$$

Итак, алюминиевый цилиндр будет возвышаться над уровнем ртути в 20 раз больше свинцового.

Рассмотренная задача имеет применение в современном учении о структуре земного шара, а именно в так называемой теории изостазии. Теория эта исходит из того, что твердые части земной коры легче, нежели лежащие под ними пластичные массы, и потому плавают в последних. Земную кору теория рассматривает как совокупность призм равного сечения и веса, но разной высоты. Тогда более возвышенные части должны соответствовать призмам меньшей плотности, менее

возвышенные — призмам большей плотности. Легко видеть, что, по соображениям, вытекающим из нашей задачи, наружные возвышения всегда отвечают подземным дефектам масс, а понижения — избыткам. Геодезические измерения вполне подтверждают эту теорию.

**62.** Непосредственно применять закон Архимеда к телам сыпучим нельзя, так как частицы таких тел подвержены трению, которое в жидкостях ничтожно. Однако, если сыпучее тело поставить в условия, при которых свобода перемещения частиц не стесняется их трением друг о друга, то закон Архимеда оказывается вполне применимым. В таком состоянии находится, например, сухой песок, подвергаемый частым сотрясениям, которые помогают песчинкам перемещаться, подчиняясь действию тяжести. Об опытах подобного рода писал еще Гук, знаменитый современник и соотечественник Ньютона:

«Нельзя закопать в песок (подверженный частым сотрясениям) легкое тело, например кусок пробки: он тотчас же «всплывет» на поверхность песка; наоборот, тяжелое тело немедленно закапывается в нем и падает на дно сосуда».

Опыты эти осуществлены были впоследствии В. Брэгом, выдающимся английским физиком нашего времени, с помощью особой центробежной машины\*) (рис. 69, 70).

Судьбу шара, положенного на поверхность неподвижного песка, можно предсказать, если применить к этому случаю те рассуждения, на основании которых Стевин некогда вывел закон Архимеда. Заметим прежде всего, что так называемая «кажущаяся плотность» песка, т. е. масса его кубического сантиметра вместе с воздушными порами, равна (для тонкозернистого песка) 1,7 г, т. е. втрое больше, нежели дерева.

Выделим в песке мысленно шаровой объем, геометрически равный нашему деревянному шару. Этот объем

---

\*) См. книгу: Брегг В. «О природе вещей», имеющуюся на русском языке. [Перу лауреата Нобелевской премии Генри Брэга (1862—1942) (такое написание фамилии этого исследователя принято ныне), заложившего вместе с сыном Лоуренсом Брэгом (1890—1971) основы рентгеноструктурного анализа кристаллов, принадлежит несколько научно-популярных книг. «О природе вещей» — одна из них. Название ее Г. Брэгг заимствовал у поэмы римского поэта и философа Тита Лукреция Кара, жившего в I в. до н. э. — Примеч. ред.]

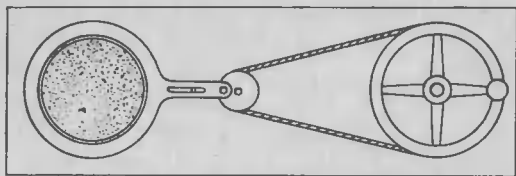


Рис. 69. Машина для встряхивания песка (в. 62).

песка удерживается в равновесии силами двух родов: 1) трением песчинок друг о друга и 2) весом вышележащего песка, передающего свое давление частью в стороны и тем подпирającego наш объем снизу. Равнодействующая всех этих сил должна быть не меньше веса выделенного нами объема песка. Если заменим мысленно песочный шар деревянным, более легким, то давление на него снизу будет больше его собственного веса. Ясно, что под действием силы тяжести шар наш погрузится на такую глубину не может.

Самая большая глубина его погружения в песок не должна превышать той, на которой вес шара равен весу песка в объеме его погруженной части. Это не значит, что шар погрузится непременно на такую глубину: мы установили лишь предельную величину его углубления в песок под действием собственной тяжести. Не означает это и того, что шар, зарытый в песок глубже предельного уровня, сам «всплывет» на поверхность: «всплыванию» помешает трение.

Итак, к сыпучим телам закон Архимеда применим, но с существенными оговорками, отпадающими в случае, когда сыпучее тело подвергается сотрясениям; сотрясаемое сыпучее тело уподобляется в рассматриваемом отношении жидкостям. Что касается неподвижных сыпучих тел, то для них закон Архимеда утверждает лишь, что твердое тело с большим удельным весом,

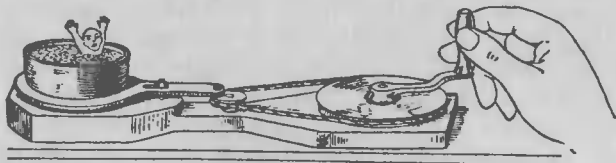


Рис. 70. Легкая фигурка с грузиком внизу, зарытая в песке, при действии машины высывает голову наружу (в. 62).

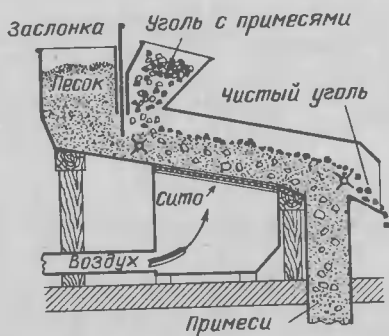


Рис. 71. Техническое применение задачи 62.

может быть с головой засосан сыпучим песком. При этом чем меньше будет он делать движений, тем мельче углубится он в песок: движения лишь помогают его погружению.

Приложимость закона Архимеда к песку находит себе применение в технике — для очищения каменного угля от посторонних примесей. Сырой уголь, подлежащий очистке, бросают на песок, удельный вес которого подобран так, что он больше удельного веса каменного угля, но меньше удельного веса той породы, которая к углю примешена. Чтобы сделать песчинки подвижными, сквозь песок непрерывно продувается снизу вверх воздух, проникающий через сито под песком. От давления продуваемого воздуха, т. е. от скорости воздушного потока, зависит и удельный вес песка. Очутившись на песке, зерна угля и куски породы разделяются: уголь остается на поверхности, а порода утопает в песке, проваливается сквозь сито и собирается в приемник. Устройство аппарата показано на рис. 71.

**63.** Свойство жидкости принимать в состоянии невесомости шарообразную форму наглядно доказывается знаменитым опытом Плато: оливковое масло, введенное в равноплотную с ним смесь спирта с водой, собирается в форме шара.

Однако установить точными измерениями, что получающийся шар геометрически правилен, невозможно. Поэтому опыт Плато дает лишь приближенное доказательство интересующего нас положения. Безусловно же строгое доказательство доставляет нам

Рис. 72. Капля удерживается натяжением поверхностной пленки (в. 64).



явление совершенно из другой области, а именно — радуга.

Теория радуги утверждает, что малейшее отклонение формы дождевых капель от геометрически правильного шара должно заметно сказаться на виде радуги, а при более значительных отклонениях радуга вовсе не может образоваться. Так как свободно падающая капля невесома (см. вопрос 50), то здесь мы и имеем искомое доказательство.

**64.** Вес капли зависит от величины поверхностного натяжения жидкости: капля отрывается тогда, когда ее вес достаточен для разрыва поверхностной пленки на шейке образующейся капли. Из рис. 72 видно, что если радиус шейки сужения равен  $r$ , а коэффициент поверхностного натяжения  $\sigma$  (Н/м), то отрыв капли произойдет в тот момент, когда

$$2\pi r\sigma = mg,$$

откуда масса капли

$$m = \frac{2\pi r\sigma}{g}.$$

Чем больше поверхностное натяжение, тем капли тяжелее. Но известно, что с повышением температуры поверхностное натяжение уменьшается — для воды на 0,23% на каждый градус. При температуре 100° С поверхностное натяжение воды ослабевает на 23% по сравнению с величиной его при 0° С, а при 20° С оно на 4,6% меньше, чем при 0° С. Значит, при остывании воды в самоваре от 100° С до комнатной температуры (20° С) вес капель должен возрасти на

$$\frac{95,4 - 77}{77} = 0,24,$$

или на 24% — величину весьма заметную.

**65.** а) По закону Борелли\*) высота поднятия смачивающей жидкости в трубке обратно пропорциональна диаметру трубки. В стеклянной трубке с просветом в 1 мм вода поднимается на 15 мм. Значит, в трубке с просветом в 1 мкм вода поднимается в 1000 раз выше: на 15 м!

б) Выше всех других жидкостей поднимается в капиллярных трубках расплавленный калий (плавится при  $63^{\circ}\text{C}$ ): в стеклянной трубке с диаметром просвета 1 мм калий поднимается на 10 см. При диаметре канала в 1 мкм подъем должен равняться  $10\text{ см} \cdot 1000 = 100\text{ м}$ .

в) В трубке данного диаметра жидкость поднимается тем выше, чем больше ее поверхностное натяжение и меньше плотность. Зависимость эта выражается формулой

$$\rho gh = \frac{2\sigma}{r},$$

где  $h$  — высота поднятия,  $\sigma$  — коэффициент поверхностного натяжения,  $r$  — радиус просвета трубки,  $\rho$  — плотность жидкости. С повышением температуры поверхностное натяжение падает гораздо быстрее, чем уменьшается плотность  $\rho$  жидкости. В итоге высота  $h$  должна уменьшаться: горячая жидкость поднимается в капиллярных трубках ниже холодной.

**66.** Высота поднятия жидкости в капиллярной трубке не зависит от того, погружена ли трубка отвесно или под каким-либо углом к горизонтальной плоскости. Во всех случаях высота поднятия, т. е. вертикальное расстояние от мениска до поверхности жидкости, одинакова. В нашем случае жидкая нить в трубке при наклоне на  $30^{\circ}$  будет вдвое длиннее, чем при ее отвесном положении, но высота мениска над уровнем жидкости в сосуде будет та же.

**67.** Столбик ртути в стеклянной трубке имеет обе свободные стороны выпуклые, так как ртуть не смачивает стекла. Поверхность, обращенная к узкому концу, имеет меньший радиус кривизны, чем противоположная; давление ее на ртуть поэтому больше

---

\*) Часто называемому также «законом Юрина».

(задача 65), и столбик выталкивается в сторону широкого конца.

Столбик воды — жидкости, смачивающей стекло, — ограничен с обеих сторон вогнутыми менисками, причем мениск в узкой части трубки имеет меньший радиус кривизны, чем в широкой. Более изогнутый мениск сильнее увлекает жидкость, и оттого столбик воды перемещается в сторону узкого конца трубки.

Итак, столбики жидкости двигаются в трубках по противоположным направлениям: ртутный — к широкому концу, водяной — к узкому (рис. 73).

Способность воды самой переходить в капиллярных каналах из широких трубочек в узкие имеет важное значение для сохранения влаги в почве. «Если верхний слой почвы плотен, т. е. содержит в себе узкие каналы, а нижние слои рыхлы, т. е. содержат в себе много широких каналов, то, — пишет агроном А. Н. Дудинский, — верхний слой легко пополняется водой из нижнего слоя. Если же, наоборот, нижний слой плотен, а верхний рыхл, то верхний рыхлый слой, высохнув, не принимает влагу из нижнего слоя (так как вода не переходит из узких каналов в широкие, но лишь из широких в узкие) и остается поэтому сухим».

Отсюда вытекает и одно из средств борьбы с засухой — рыхление поверхностного слоя почвы:

«Для сохранения в почве влаги разрыхляют по возможности чаще самый верхний слой ее на глубину 2 см или даже менее; при этом узкие каналы, образовавшиеся в этом слое, разрушаются и заменяются более широкими, не могущими всасывать воду снизу. Этот верхний рыхлый слой высыхает, но не может принять воду из более узких каналов нижележащего слоя почвы; поэтому он не проводит ее к поверхности, но предохраняет собой всю остальную толщу почвы от иссушающего действия ветров и солнечных лучей».

Мы видим здесь один из поучительных примеров того, как ясное понимание, казалось бы, незначитель-

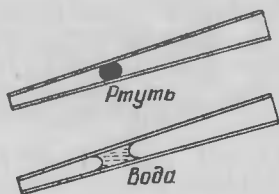


Рис. 73. Ртутный столбик ползет к широкому концу трубки, водяной столбик — к узкому. На последнем свойстве воды основан один из способов борьбы с засухой (в. 67).

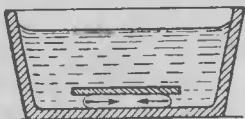


Рис. 74. Вода подтекает под пластинку на дне (в. 68).



Рис. 75. Ртуть не подтекает под пластинку на дне (в. 68).

ного физического факта, приводит к чрезвычайно важным практическим мероприятиям.

**68.** В сосуде с водой деревянная пластинка, положенная на дно, всплывает потому, конечно, что вода проникает под пластинку. Остается объяснить, почему вода под деревянную пластинку проникает, а ртуть под стеклянную — не проникает.

Надо иметь в виду, что, как бы плотно ни прилегала пластинка ко дну, между ними неизбежно будет оставаться тонкий промежуток. У краев этих тесно сближенных поверхностей вода, смачивающая и дерево, и стекло, образует вогнутость, обращенную к свободной от жидкости прослойке (рис. 74); эта вогнутость, как вогнутый мениск, втягивает воду в промежуток между пластинкой и дном.

Иное дело в случае ртути и стеклянной пластинки. Стекло не смачивается ртутью; поэтому между стеклянной пластинкой и стеклянным же дном ртуть образует выпуклость, обращенную к свободной прослойке; выпуклость эта давит наружу и не допускает ртуть под пластинку (рис. 75).

**69.** Поверхностное натяжение жидкости исчезает совершенно при критической температуре: жидкость утрачивает способность собираться в капли и превращается в пар при любом давлении.

**70.** Несмотря на свою необычайную тонкость<sup>\*)</sup> — около  $5 \cdot 10^{-8}$  см, поверхностный слой жидкости оказывает на охватываемую им массу жидкости огромное давление. Оно достигает для некоторых жидкостей десятков тысяч атмосфер, т. е. равно десяткам тонн на квадратный сантиметр.

<sup>\*)</sup> Поверхностная пленка жидкости состоит из одного слоя молекул.



Существование этого давления делает понятным слабую сжимаемость жидкостей: жидкости всегда сильнее всего сдавлены, и прибавка к десяткам тысяч атмосфер еще даже целой сотни атмосфер мало меняет дело.

**71.** Удобнее, казалось бы, устраивать водопроводные краны по образцу самоварных, т. е. поворотные, а не винтовые. Не делается же этого потому, что поворотные краны быстро привели бы в негодность домовую водопроводную сеть. Закрывание отверстия крана сразу, т. е. внезапная остановка течения воды в трубе, вызывает опасное сотрясение сети — так называемый гидравлический удар. Автор учебника гидравлики проф. А. В. Дейша сравнивает гидравлический удар с ударом поездного состава, получившего толчок от паровоза и набежавшего на упор:

«В этом случае буфера первого от упора вагона сожмутся инерцией напирających сзади вагонов, пока все вагоны не остановятся. Затем пружины буферов переднего вагона будут стремиться распрямиться, пока не отбросят все вагоны назад. Волна сжатых буферов побежит назад от первого вагона к последнему. Если в конце поезда стоит тяжелый паровоз, то сжатие буферов от него отразится обратно к упору. Таким образом, колебания, постепенно уменьшаясь, затухая от сопротивлений, передадутся от одного конца поезда к другому и обратно. Первая волна сжатия будет опасна для буферных пружин всех вагонов, а не только одного переднего.

Ввиду того что вода обладает хотя и небольшой способностью сжиматься — упругостью, то, когда мы остановим закрытием крана в конце длинной трубы передние частицы, задние будут напирать, создадут у крана повышенное давление, которое аналогично обыкновенной волне побежит обратно по трубе с большой скоростью, лишь немногим меньшей скорости распространения в воде звука. Добежав до начала трубы (до водонапорного резервуара), волна отразится и побежит обратно к крану; таким образом, произойдет ряд колебаний — повышений давления, которые вследствие сопротивлений движению волны, будут понемногу затухать. Однако первая волна будет опасна не только в конце у крана, но также легко может разорвать какую-нибудь слабую деталь и слабое соединение

в начале трубы у резервуара. Получившиеся «ударные» давления, особенно при отражении, могут значительно, в 60—100 раз, превзойти обычный гидростатический напор в трубе».

Удар тем сильнее и разрушительнее, чем труба длиннее. Гидравлический удар расшатывает водопроводную сеть, разрывает нередко чугунные трубы, раздувает свинцовые, выбивает колена на заворотах и т. п. Чтобы всего этого избежать, надо прекращать течение воды в трубах постепенно, т. е. закрывать отверстие трубы медленно, закручивающимся краном. Чем длиннее труба, тем больше должна быть продолжительность закрытия.

Итак, сила гидравлического удара прямо пропорциональна длине трубы и времени, в течение которого происходит закрытие трубы: чем быстрее закрывается кран, тем удар сильнее. Из опыта найдена следующая формула для вычисления силы удара: напор при ударе равен в метрах водяного столба

$$h = 0,15 \frac{vl}{t} \text{ (м)},$$

где  $v$  — скорость течения воды в трубе (в метрах в секунду),  $l$  — длина трубы (в метрах),  $t$  — время, в течение которого запирается кран (в секундах).

Например, если труба, в которой вода течет со скоростью 1 м/с и длина которой 1000 м, закрывается в течение 1 с, то напор в ней возрастает под действием гидравлического удара до

$$h = 0,15 \cdot \frac{1 \cdot 1000}{1} = 150 \text{ м},$$

т. е. до 15 ат.

Явление гидравлического удара можно наблюдать на опыте, установка которого показана на рис. 76. Сифонная стеклянная трубка идет от сосуда с водой вниз и загибается горизонтально. У конца трубы устраивается поворотный кран  $H$ , а недалеко от конца трубка имеет отросток  $S$  с узким отверстием. Когда кран закрыт, вода из отростка бьет фонтаном не выше уровня воды в сосуде. Если же кран открыть, а затем быстро закрыть, то в первый момент фонтан бьет выше уровня воды в сосуде, наглядно доказывая, что давление в трубке превосходит гидростатический напор.

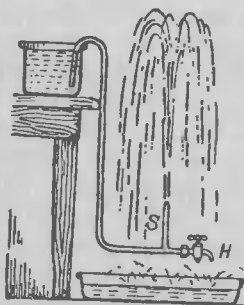


Рис. 76. Простой опыт для демонстрации гидравлического удара (в. 71).

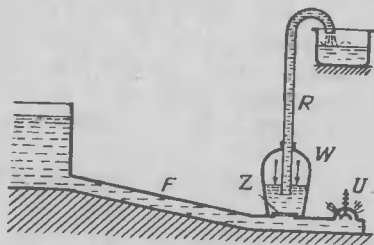


Рис. 77. Схема устройства самодействующего гидравлического тарана (в. 71).

Не следует думать, что мы имеем в этом случае нарушение закона сохранения энергии: падением воды с известной высоты поднимается здесь на бо́льшую высоту меньшее количество воды, подобно тому как на рычаге опускание конца его, нагруженного тяжелым грузом, вызывает поднятие меньшего груза на бо́льшую высоту.

На принципе гидравлического удара основано устройство особого самодействующего водоподъемного прибора — так называемого «гидравлического тарана» (рис. 77). Чтобы заставить таран работать, надо клапан *U* закрыть. Тогда в трубе *F* происходит гидравлический удар; повышенное водяное давление открывает клапан *Z* и воздух, сжимаемый в *W*, вытесняет воду вверх. Удар прекращается, клапан *Z* закрывается, *U* — открывается, течение воды в *F* возобновляется — закрывает клапан *U* и опять вызывает гидравлических удар. Все повторяется сначала.

**72.** Ртуть гораздо тяжелее воды; можно ожидать поэтому, что ртуть вытечет быстрее. Однако уже Торричелли знал, что это не так: скорость вытекания ни в какой зависимости не находится от плотности жидкости. Она определяется следующей формулой Торричелли:

$$v = \sqrt{2gh},$$

где *v* — скорость вытекающей струи, *g* — ускорение силы тяжести, *h* — высота уровня жидкости в сосуде. Как видим, плотность жидкости в формулу не входит.

Этот парадоксальный закон вытекания становится, однако, вполне понятным, если принять во внимание, что силой, движущей жидкость, является вес вышележащей ее части. В случае тяжелой жидкости сила эта больше, чем в случае легкой; но и приводимая в движение масса в первом случае также больше, и притом — во столько же раз. Не приходится удивляться, что ускорение, а следовательно, и скорость получаются в обоих случаях одинаковые.

**73.** На каждый из пяти вопросов приведено далее по два ответа: в одном столбце правильные, а в другом — неправильные.

- |  |  |
|--|--|
| а) Ванна наполнится до краев за 24 минуты. | а) Ванна никогда до краев не наполнится. |
| б) Ванна останется пустой.                 | б) Ванна нальется до $1/4$ высоты.       |
| в) Ванна останется пустой.                 | в) Ванна нальется до $9/64$ высоты.      |
| г) Ванна останется пустой.                 | г) Ванна нальется до $1/144$ высоты.     |
| д) В ванне не удержится ничего.            | д) Удержится некоторое количество воды.  |

В котором же столбце приведены правильные ответы?

Правдоподобными представляются ответы левого столбца. Верны же в действительности ответы правого столбца. Охотно верю, что эти правильные ответы могут казаться совершенно несообразными. Рассмотрим каждую задачу порознь.

а) Ванна наполняется быстрее, чем опорожняется, и тем не менее в правом столбце мы находим утверждение, что ванна никогда до краев не наполнится. Почему? Нетрудно, казалось бы, вычислить даже, через сколько минут вода должна начать переливаться через края. Ежеминутно поступает в ванну  $1/8$  ее вместимости, а вытекает  $1/12$ ; значит, каждую минуту вода прибывает в количестве.

$$\frac{1}{8} - \frac{1}{12} = \frac{1}{24}$$

вместимости всей ванны. Ясно, что за 24 минуты ванна должна наполниться до краев...

б) Во второй задаче срок наполнения ванны равен продолжительности ее опорожнения. Значит, количество ежеминутно поступающей воды равно количеству вытекающей. В ванне не должно остаться ни капли

воды, сколько бы времени ни длилось наливание. А между тем в столбце правильных ответов мы видим утверждение, что ванна нальется до  $1/4$  высоты.

в), г) и д) В этих трех случаях вода, очевидно, вытекает из ванны в большем количестве, чем поступает, и все же в правом столбце мы находим утверждение, будто даже и при таких условиях в ванне накопится некоторый запас воды.

Словом, решения, предлагаемые нами как правильные, представляются абсурдными. Чтобы тем не менее убедиться в их правильности, читателю придется проследить за довольно длинной цепью рассуждений. Начнем с первой задачи.

а) Задача эта представляет собой видоизменение знаменитой задачи о бассейнах, родоначальником которой является Герон Александрийский. За две тысячи лет она успела проникнуть в школьные задачки арифметики; однако традиционное ее решение является ошибочным с точки зрения физики. Ходячее решение опирается на незаконное допущение, будто вытекание воды из резервуара с понижающимся уровнем происходит равномерной струей.

Допущение это противоречит физическому закону, согласно которому скорость вытекания уменьшается по мере понижения уровня. Неправильно поэтому принимать, как делают школьники на уроках арифметики, что если вся ванна опорожняется за 12 минут, то каждую минуту вытекает  $1/12$  ее объема. Вытекание происходит совсем не так: вначале, пока уровень воды высок, вытекает ежеминутно больше  $1/12$  содержимого полной ванны; количество это с каждой минутой убывает, и когда уровень очень низок, ежеминутно вытекает уже меньше  $1/12$  содержимого. Значит, количество ежеминутно вытекающей воды только в среднем равно  $1/12$  объема полной ванны, в действительности же почти ни одну минуту оно не равно  $1/12$ , а либо больше, либо меньше.

Картина опорожнения ванны очень напоминает ход тех карманных часов, о которых поведал нам в шуточном рассказе Марк Твен: они шли «в среднем» вполне правильно, добросовестно делая полагающееся им число оборотов в сутки. Но в первую половину суток они непозволительно уходили вперед, в течение же второй — оставались далеко позади. Решать нашу задачу, исходя из средней скорости вытекания воды,

все равно, что пользоваться для определения времени этими часами Марка Твена.

Мы видим, что упрощенную картину арифметических задачников необходимо при решении нашего вопроса заменить реальной картиной, согласной с законами природы. Тогда результат получится существенно иной. Если в начале наливания, пока уровень невысок, вытекает меньше  $1/12$  объема ванны, а при высоком уровне воды — больше  $1/12$ , то количество вытекающей воды может стать равным и  $1/8$  объема ванны. Значит, расход может сравняться с приходом раньше, чем вода дойдет до краев ванны. С этого момента уровень воды повышаться больше не будет: все, что наливается из крана, уходит через выпускное отверстие. Уровень становится постоянным на высоте ниже краев ванны. Понятно, что при таких условиях ванна никогда не наполнится. Математический расчет, как увидим далее, подтверждает правильность сказанного.

б) Здесь правильность нашего решения выступает еще яснее. Продолжительность как наполнения, так и опорожнения 8 минут. При низком уровне, т. е. в начале наливания, ежеминутно поступает  $1/8$  вместимости ванны, вытекает же, как было уже объяснено, менее  $1/8$ . В итоге уровень должен повышаться; он будет повышаться до тех пор, пока приход воды не сравняется с расходом. Ванна, следовательно, пустой не останется: в ней должен удерживаться некоторый слой воды. Можно доказать — мы это скоро сделаем, — что при равенстве сроков наполнения и опорожнения высота удерживаемого слоя должна составлять  $1/4$  высоты уровня полной ванны.

в), г) и д) После сказанного не потребуются долгих объяснений, чтобы рассеять недоверие к нашим ответам на остальные три вопроса. Продолжительность опорожнения задается в них более короткой, чем наполнение. Наполнить такую ванну до краев нельзя, но удержать в ней некоторый слой воды всегда возможно, как бы медленно ни подливалась она сверху.

Надо помнить, что первые порции воды, поступающие сверху, не могут вылиться так же быстро, потому что при низком уровне воды скорость вытекания весьма мала, делаясь с понижением уровня меньше любой постоянной скорости наливания. Значит, некоторый, хотя бы очень тонкий, слой воды должен

в резервуаре удержаться. Иными словами, вопреки заключению «здравого смысла», во всякой дырявой бочке можно удерживать немного воды, если все время равномерно ее подливать.

Обратимся теперь к математическому рассмотрению тех же вопросов. Мы убедимся, что задачи о бассейнах, два тысячелетия предлагаемые школьникам как элементарные арифметические упражнения, предъявляют на самом деле к учащимся требования, далеко выходящие за пределы азов арифметики.

Установим для цилиндрического резервуара (вообще для резервуара с отвесными стенками) зависимость между продолжительностью  $T$  его наполнения, продолжительностью  $t$  его опорожнения и высотой  $l$  постоянного уровня, какого достигает жидкость, если резервуар наливать при открытом выпускном отверстии. Условимся относительно обозначений:

- $H$  — высота уровня жидкости в полном резервуаре;
- $T$  — продолжительность наливания до уровня  $H$ ;
- $t$  — продолжительность опорожнения резервуара с первоначальным уровнем  $H$ ;
- $S$  — сечение резервуара;
- $s$  — сечение выпускного отверстия;
- $w$  — секундная скорость опускания уровня в резервуаре;
- $v$  — секундная скорость вытекающей струи;
- $l$  — высота постоянного уровня при открытом отверстии.

Легко видеть, что если за какую-нибудь секунду времени уровень жидкости опускается на  $w$ , то из выпускного отверстия за ту же секунду должен вытечь слой жидкости объемом  $Sw$ , равновеликий объему столба  $cv$  струи:

$$\text{откуда} \quad Sw = cv,$$

$$w = v \frac{c}{S}.$$

Но скорость  $v$  струи жидкости, вытекающей из отверстия сосуда, определяется известной формулой Торричелли  $v = \sqrt{2gl}$ , где  $l$  — высота уровня, а  $g$  — ускорение тяжести. С другой стороны, скорость  $w$  повышения уровня жидкости при закрытом выпускном отверстии равна  $H/T$ . Уровень делается постоянным, когда скорость его понижения сравняется со

скоростью повышения, т. е. когда будет существовать равенство

$$\frac{H}{T} = \frac{c}{S} \sqrt{2gl},$$

откуда высота  $l$  устанавливающегося уровня равна

$$l = \frac{H^2 S^2}{2gT^2 c^2}. \quad (1)$$

Такова предельная высота уровня жидкости в резервуаре, наполняемом при открытом выпускном отверстии.

Формулу эту можно упростить, исключив из нее величины  $S$ ,  $c$  и  $g$ . Опускание уровня в резервуаре с отвесными стенками (при закрытом кране) есть движение равнопеременное, начинающееся со скоростью  $w$  и кончающееся со скоростью, равной нулю. Ускорение  $a$  такого движения определяется из уравнения

$$w^2 = 2aH,$$

откуда

$$a = w^2 / 2H.$$

Подставив значение  $w$  из выражения  $w = cv/S$  и имея в виду, что  $v = \sqrt{2gH}$ , получаем

$$a = \frac{c^2 v^2}{2S^2 H} = \frac{c^2 \cdot 2gH}{2S^2 H} = g \frac{c^2}{S^2}.$$

Далее, для рассматриваемого случая движения

$$H = \frac{at^2}{2} = \frac{gc^2 t^2}{2S^2},$$

откуда

$$t = \frac{2HS^2}{gc^2}.$$

Деля подстановку в формуле (1), получаем

$$l = \frac{H^2 S^2}{2gT^2 c^2} = \frac{H \cdot HS^2}{2T^2 \cdot gc^2} = \frac{Ht^2}{4T^2}, \quad \frac{l}{H} = \frac{t^2}{4T^2}.$$

Итак, уровень жидкости в резервуаре должен при рассматриваемых условиях установиться на высоте,



составляющей определенную долю высоты полного резервуара; доля эта определяется формулой

$$\frac{l}{H} = \frac{t^2}{4T^2}.$$

\*

Применим теперь выведенную формулу к решению наших задач.

а) Продолжительность наполнения  $T=8$  мин, продолжительность опорожнения  $t=12$  мин. Высота  $l$  предельного уровня составляет от высоты резервуара  $H$  долю

$$\frac{l}{H} = \frac{12^2}{4 \cdot 8^2} = \frac{9}{16}.$$

Ванна нальется только на  $9/16$ . Сколько бы ни длилось наливание, после этого уровень повышаться не будет.

б) В этом случае  $T=t=8$  мин:

$$\frac{l}{H} = \frac{t^2}{4t^2} = \frac{1}{4}.$$

Ванна нальется на  $1/4$ .

в) Здесь  $T=8$  мин,  $t=6$  мин:

$$\frac{l}{H} = \frac{6^2}{4 \cdot 8^2} = \frac{9}{64}.$$

Ванна нальется на  $9/64$ .

г)  $T=30$  мин,  $t=5$  мин:

$$\frac{l}{H} = \frac{5^2}{4 \cdot 30^2} = \frac{1}{144}.$$

Ванна нальется на  $1/144$ .

д) В этом случае  $t < T$ :

$$\frac{l}{H} = \frac{t^2}{4T^2}.$$

Полученное выражение может равняться нулю только при двух условиях:

1)  $t=0$ ,  $T \neq 0$ . Это значит, что ванна опорожняется мгновенно — случай нереальный.

2)  $t \neq 0$ ,  $T = \infty$ . Это значит, что ванна с закрытым выпускным отверстием наполняется в бесконечно долгий срок, иными словами, секундный приток воды равен нулю, вода не поступает вовсе. Практически такой случай равносильно тому, что кран закрыт.

Итак, если только кран открыт и ванна не опорожняется мгновенно,  $l$  никогда не равно нулю: слой воды в ванне всегда имеет конечную высоту.

При каком же условии ванна с открытым выпускным отверстием может быть наполнена до краев? Очевидно, тогда, когда  $l = H$ , т. е. когда

$$\frac{t^2}{4T^2} = 1, \quad t^2 = 4T^2, \quad t = 2T.$$

Значит, если продолжительность наполнения вдвое менее продолжительности опорожнения, ванна и при открытом выпускном отверстии может быть выполнена до краев.

\*

Интересно вычислить еще, за какое время достигается тот или иной постоянный уровень. Задача эта не может быть разрешена средствами элементарной математики; она требует применения интегрального исчисления. Для интересующихся приводим далее ход вычисления; не знакомые с высшей математикой могут этот вывод пропустить, обратившись сразу к окончательной формуле.

Скорость повышения уровня жидкости в резервуаре, наполняемом при открытом выпускном отверстии, получится, если из скорости поднятия уровня при закрытом отверстии ( $H/T$ ) отнять скорость опускания уровня в непополняемом резервуаре ( $(c/g)\sqrt{2gx}$ , где  $x$  — высота уровня в данный момент). Следовательно, скорость повышения уровня в данный момент

$$\frac{dx}{dt} = \frac{H}{T} - \frac{c}{S}\sqrt{2gx},$$

откуда

$$dt = \frac{dx}{\frac{H}{T} - \frac{c}{S}\sqrt{2gx}}.$$

Время, в течение которого жидкость достигает высоты  $x = h$ , обозначим здесь через  $\Theta$ .

Имеем уравнение

$$\int_0^{\Theta} dt = \int_0^h \frac{dx}{\frac{H}{T} - \frac{c}{S} \sqrt{2gx}}.$$

Проинтегрировав это уравнение, получаем следующую формулу для продолжительности  $\Theta$  времени поднятия уровня до высоты  $h$ :

$$\Theta = -\frac{S}{gc} \left[ \sqrt{2gh} + \frac{HS}{Tc} \ln \left( 1 - \frac{cT}{SH} \sqrt{2gh} \right) \right].$$

(Здесь  $\ln$  означает логарифм при основании  $e=2,718 \dots$ )

Выражение это может быть упрощено. Исходя из равенств  $wS=vc$  и  $v=\sqrt{2gh}$  имеем, что скорость  $w$  опускания уровня с высоты  $h$  при опорожнении резервуара равна

$$w = \frac{dh}{dt} = \frac{c}{S} v = \frac{c}{S} \sqrt{2gh}.$$

Следовательно,

$$dt = \frac{S}{c\sqrt{2gh}} \cdot \frac{dh}{\sqrt{h}}, \quad \int_0^t dt = \frac{S}{c\sqrt{2gh}} \cdot \int_0^h \frac{dh}{\sqrt{h}},$$

откуда

$$t = \frac{2S}{c} \sqrt{\frac{H}{2g}}.$$

После соответствующих подстановок получаем следующее выражение\*) для  $\Theta$ :

$$\Theta = -\left[ t \sqrt{\frac{h}{H}} + \frac{t^2}{2T} \ln \left( 1 - \frac{2T}{t} \sqrt{\frac{h}{H}} \right) \right],$$

в которое не входят случаи сечения  $S$  и  $c$  резервуара и отверстия, а также и ускорение  $g$  силы тяжести. Последнее указывает, что продолжительность наливания резервуара должна быть одинакова на любой планете.

\*

Если, обращаясь к нашим задачам, пожелаем узнать, за какое время достигаются в резервуарах предельные уровни, то придем к заключению, что это может осуществиться только в бесконечно большой срок, иначе говоря, никогда. Вывод несколько не неожиданный: его легко было предвидеть. Ведь по мере

---

\*) Формула эта, как и предыдущие, выведена четырнадцатилетним М. Я. Перельманом [сыном Я. И. Перельмана и его жены Анны Давидовны Каминской-Перельман.— *Примеч. ред.*], которым выполнена математическая обработка задачи.

приближения уровня к предельной высоте скорость его повышения все уменьшается; чем ближе жидкость к предельному уровню, тем медленнее она к нему стремится; ясно, что она никогда этого уровня не достигнет, а может лишь сколь угодно близко к нему подойти.

Но для целей практических можно поставить вопрос несколько иначе. Практически почти безразлично, дошла ли жидкость до предельного уровня или не достигла его, скажем, на 0,01 долю его высоты. А продолжительность такого «почти достижения» вполне возможно вычислить по нашей формуле, подставив  $h=0,99l$ , где  $l$ —высота предельного уровня. Получим

$$\Theta = -\frac{t^2}{2T}(0,995 - \ln 0,005) = 2,15 \frac{t^2}{T}.$$

Эту формулу

$$\Theta = 2,15 \frac{t^2}{T}$$

применим к рассмотренным ранее случаям.

а)  $T=8$  мин,  $t=12$  мин:

$$\Theta = 2,15 \cdot \frac{12^2}{8} = 38,7 \text{ мин.}$$

Постоянный уровень практически установится примерно через 39 минут.

б)  $T=t=8$  мин:

$$\Theta = 2,15 \cdot \frac{8^2}{8} = 17,2 \text{ мин.}$$

Постоянный уровень установится спустя примерно 17 минут.

в)  $T=8$  мин,  $t=6$  мин:

$$\Theta = 2,15 \cdot \frac{6^2}{8} = 9,7 \text{ мин.}$$

Уровень установится приблизительно через 10 минут.

г)  $T=30$  мин,  $t=5$  мин:

$$\Theta = 2,15 \cdot \frac{5^2}{30} = 1,8 \text{ мин.}$$

Предельный уровень будет практически достигнут менее чем через две минуты.

д) Наконец, наполнение резервуара до краев при открытом выпускном отверстии, осуществляющееся, как было ранее установлено, при условии, что  $t=2T$ , совершится в промежуток времени

$$\Theta = 2,15 \cdot \frac{(2t)^2}{2t} = 4,3t = 8,6T.$$

На этом закончим наш непредвиденно затянувшийся разбор задач о резервуаре. Дело, как убедился читатель, выходит намного сложнее, чем представляют себе те авторы арифметических задачникков, которые беспечно предлагают «задачи о бассейнах» ученикам начальной школы.

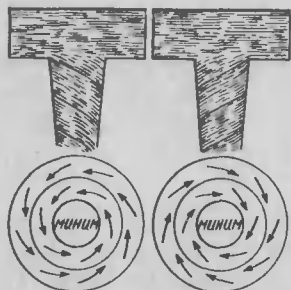
**74.** Поставленный в задаче вопрос привлек несколько лет назад внимание нашего известного математика академика Д. Граве.

«Если,— писал он,— выпускать из резервуара воду при помощи отверстия на дне его, то образуется (над отверстием) воронкообразный вихрь, который в северном полушарии вращается в сторону, обратную движению часовой стрелки; в южном же полушарии вращение идет в другую сторону. Каждый читатель сам может проверить справедливость сказанного, выпуская воду из ванны. Чтобы лучше заметить направление вращения вихревой воронки, можно бросить на нее маленькие обрывки бумаги. Получается эффектный опыт, доказывающий вращение Земли, произведенный самыми простыми средствами в домашней обстановке»<sup>\*)</sup>.

Отсюда ученый делает и практические выводы: «Из сказанного можно сделать важные выводы относительно водяных турбин. Если горизонтальная водяная турбина вращается в сторону, обратную движению часовой стрелки, то вращение Земли поможет действию турбины. Обратно, если турбина вращается в сторону движения часовой стрелки, то влияние вращения Земли будет тормозить ее работу». «Поэтому,— заключает акад. Д. Граве,— при заказах новых турбин следует держаться требования наклонения лопаток турбины в такую сторону, чтобы вращение турбины происходило в желательном направлении».

---

<sup>\*)</sup> В журнале «Хочу все знать».— 1931, № 4 (статья «Вращение Земли, вихри и работа турбин»).



Северное полушарие Южное полушарие

Рис. 78. «Схема вихревых движений: вверху — при вытекании воды из ванны, внизу — воздуха в циклоне.» Рисунок и подпись — из статьи акад. Д. Граве (в. 74).

водяной воронкой у отверстия ванны легко могут быть проверены и, как оказывается, вовсе не подтверждаются: водяной вихрь закручивается в одних случаях против часовой стрелки, в других — по стрелке. Не только нет постоянства направления, но не заметно и какой-либо преобладающей тенденции, особенно если наблюдения производятся не в одном и том же резервуаре, а в различных\*).

Расчет дает результат, согласный с наблюдениями. Он показывает, что величина появляющегося при этом так называемого поворотного (кориолисова) ускорения чрезвычайно мала. Вычисление выполняется по формуле

$$a = 2\omega v \sin \varphi,$$

где  $a$  — поворотное ускорение,  $v$  — скорость движущегося тела,  $\omega$  — угловая скорость вращения Земли,  $\varphi$  —

Соображения эти представляются вполне правдоподобными. Всем известно, что вращение Земли обуславливает вихреобразное закручивание циклонов, большее изнашивание правого рельса на железных дорогах и т. п. Можно, казалось бы, ожидать, что Земля своим вращением действует также на водяные воронки в резервуаре и на водяные турбины отмеченным выше образом (рис. 78).

Не следует, однако, поддаваться этому первому впечатлению. Наблюдения за во-

\*) Желая удостовериться в этом, я года два назад организовал с читателями одного из наших научно-популярных журналов коллективную проверку утверждения акад. Д. Граве. Каждый из участников этой работы должен был проследить десяток раз, в каком направлении вращается воронка, образующаяся при вытекании воды из ванны, умывальника и подобных резервуаров, и прислать мне сообщение, сколько раз из десяти случаев наблюдалось вращение против часовой стрелки. Хотя в анкете участвовало сравнительно небольшое число читателей, все же, сопоставляя полученный материал, можно было заключить, что преобладания вращения в сторону против часовой стрелки замечено не было.

широта места<sup>\*)</sup>. На широте, например, Ленинграда при скорости водяных струй 1 м/с имеем:  $v=1$  м/с;  
 $\omega = \frac{2}{86400 \text{ с}}$ ;  $\sin \varphi = \sin 60^\circ = 0,87$ ;

$$a = \frac{2 \cdot 2\pi \cdot 0,87}{86400} \approx 0,0001 \text{ м/с}^2.$$

Так как ускорение земной тяжести равно 9,8 м/с<sup>2</sup>, то поворотное ускорение составляет стотысячную долю ускорения тяжести. Другими словами, возникающее усилие составляет стотысячную часть веса вращаемой вихрем воды. Ясно, что малейшая неровность в устройстве резервуара, несимметричность его по отношению к выпускному отверстию гораздо больше должны влиять на направление водяных струй, нежели вращение Земли. То, что многократные наблюдения за опорожнением одного и того же резервуара нередко свидетельствуют о вращении в одном и том же направлении, ничуть не является подтверждением ожидаемого правила вращения, потому что одинаковость направления вихря обуславливается формой дна резервуара, его неровностями, а не вращением Земли.

Значит, на поставленный в задаче вопрос следует ответить так: предсказать направление вращения водяного вихря у отверстия резервуара нельзя: оно определяется обстоятельствами, не поддающимися учету. К тому же вихри, какие могли бы быть вызваны в текущей жидкости вращением Земли, должны иметь, как показывает вычисление, гораздо больший диаметр, чем маленькие водовороты вокруг отверстия резервуара. Например, на широте Ленинграда при скорости течения 1 м/с диаметр такого вихря должен достигать 18 м, при скорости 0,5 м/с—9 м и т. д.—пропорционально скорости течения.

Скажем еще несколько слов об ожидаемом влиянии земного вращения на работу водяных турбин. Теоретически можно доказать, что всякое вращающееся колесо побуждается вращением Земли занять такое положение, при котором ось колеса параллельна оси

---

<sup>\*)</sup> Вывод этой формулы читатели могут найти в курсах геофизики. Весьма понятно он изложен в известном труде Ю. М. Шокальского «Океанография». [Юлий Михайлович Шокальский (1856—1940)—известный отечественный океанограф и картограф.—Примеч. ред.]

нашей планеты, а направление вращения обоих тел одинаково\*). Однако эффект этого влияния имеет величину того же ничтожного порядка, как и в случае водяной воронки в опоражниваемом резервуаре; другими словами, действие земного вращения — менее стотысячной доли силы тяжести. Следовательно, малейшая неоднородность в корпусе вращающейся части турбины, практически совершенно неизбежная, должна сказываться гораздо сильнее и затупевывать влияние вращения Земли. Не приходится возлагать поэтому никаких надежд на то, чтобы вращением Земли «заставить помогать» нашим вращающимся механизмам в их работе», как писал акад. Д. Граве в упомянутой статье.

**75.** Негоризонтальность водной поверхности реки в половодье и в межень объясняется тем, что средняя, осевая часть («стрежень») текущей водной массы имеет большую скорость, чем краевые: река на стрежне течет быстрее, чем у берегов. Поэтому в половодье, когда вода прибывает с верховья, она прибывает вдоль стрежня в большем количестве, чем у берегов; по оси ежесекундно притекает больше воды, чем по краям; естественно, что река вздувается посередине (см. рис. 60). Наоборот, в межень, когда вода убывает, отливая в низовье, она вдоль стрежня спадает значительнее, чем у берегов, и поверхность реки становится вогнутой.

Рассматриваемое явление особенно заметно на больших и широких реках. «На Миссисиппи,— пишет Э. Реклю в «Земле»,— поперечная выпуклость реки во время разлива равна средним числом одному метру. Дровосекам хорошо известен этот факт: они знают, что сплавляемый лес, спущенный в реку во время разлива, выбрасывается на берега (соскальзывает с водной выпуклости), а при спаде воды плывет всегда посередине реки» (скапливается в водной низине).

**76.** Загибание гребней волн, набегающих на пологий берег, объясняется тем, что скорость распространения волн по поверхности неглубокого водоема

---

\*1 Интересующимся могу указать на статью Отто Башина «Влияние вращения Земли на вращающиеся колеса» в журнале «Naturwissenschaften». — 1923, № 52.



зависит от глубины этого водоема, а именно — прямо пропорциональна квадратному корню из глубины. Когда волна бежит над мелким местом моря, гребень ее возвышается над дном больше, чем долина волны; следовательно, гребень должен двигаться быстрее, чем идущая впереди него долина, и, обгоняя ее, загигаться вперед.

Этим же объясняется и другое явление, замечаемое на берегу моря во время волнения: гряды волн, разбивающихся о берег, всегда ему параллельны. Причина в том, что когда к берегу приближаются волны, идущие параллельными рядами под углом к нему, то часть волны, которая раньше оказывается в мелком месте близ берега, замедляет свое движение. Нетрудно сообразить, что вследствие этого ряд волн должен поворачиваться по направлению к берегу до тех пор, пока не станет параллельным ему.

**77.** Так как поверхность реки представляет собой наклонную плоскость, то можно думать, что движение судна вверх по течению требует такой же затраты работы, как и скольжение тела вверх по наклонной плоскости. Но не следует упускать из виду, что вес пловущего в воде судна уравновешивается выталкивающей силой воды. Поэтому подъем пловущего судна на высший уровень не требует никакой силы; работа такого поднятия равна нулю. Принимать ее в расчет не следует.

Любопытно, что из студентов академии, где задача была предложена, правильное ее решение дал только один, впоследствии сделавшийся во Франции известным инженером-путейцем.

#### ВОПРОСЫ

**78. Третья составная часть воздуха.** Назовите третью по количественному содержанию постоянную составную часть атмосферного воздуха.

**79. Самый тяжелый газ.** Назовите самый тяжелый из газообразных элементов.

**80. Давят ли на нас 20 т?** Если поверхность человеческого тела равна  $2 \text{ м}^2$ , то можно ли считать, что общее давление атмосферы на тело человека составляет 20 т (200 000 Н) (рис. 79)?

**81. Сила выдоха и дуновения.** На сколько отличается от 1 атмосферы давление выдыхаемого и выдуваемого нами воздуха?

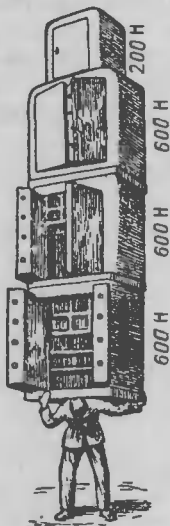


Рис. 79. «20 тысяч килограммов на наших плечах. Таким грузом отягчает нас 300-километровый столб воздуха. Не ощущаем мы его потому, что он действует не только сверху, но и снизу, а также изнутри, и потому уравновешивается.» Рисунок и подпись — из научно-популярной книги (в. 80).

**82. Давление пороховых газов.** Давлением скольких атмосфер пороховые газы выталкивают снаряд артиллерийского орудия?

**83. Мера атмосферного давления.** В каких мерах выражают давление воздуха?

**84. Вода в опрокинутом стакане.** Общеизвестен опыт с листком бумаги, который не отпадает от краев опрокинутого стакана с водой (рис. 80). Он описывается во многих начальных учебниках и часто фигурирует в популярных книгах. Объяснение обычно дается такое: извне, снизу на бумажку давит воздух с силою одной атмосферы; изнутри же, сверху давит только вода с силою во много раз меньшею (во столько раз, во сколько 10-метровый водяной столб, соответствующий атмосферному давлению, выше стакана); избыток давления и прижимает бумажку к краям стакана.

Если такое объяснение верно, то бумажка должна придавливаться к стакану с силою почти целой атмосферы (0,99 ат). При диаметре отверстия стакана 7 см на бумажку должна действовать сила почти в  $10^5 \cdot \frac{1}{4}\pi \cdot 7^2 \cdot 10^{-4} \approx 380$  Н. Известно, однако, что для отрывания бумажного листка в подобном опыте не требуется такая сила, а достаточно самого незначительного усилия. Пластинка, металлическая или стеклянная, массой несколько десятков граммов вовсе не удерживается у краев стакана — она отпадает под действием тяжести. Очевидно, обычное объяснение опыта несостоятельно.

Каково же правильное объяснение?

**85. Ураган и пар.** Сравните давление, производимое ураганом, и рабочее давление пара в цилиндре паровой машины. Во сколько примерно раз одно больше другого?

**86. Тяга заводской трубы.** Сравните напор воздуха, выдуваемого ртом (рис. 81), с тягой в заводской 40-метровой трубе.



Рис. 80. Почему бумажный листок не отпадает (в. 84)?

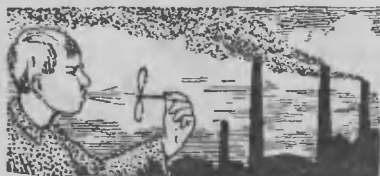


Рис. 81. Задача о тяге в заводской трубе (в. 86).

которым мы дышим, или тот, которым дышат рыбы?

**88. Пузырьки в воде.** В стакане водопроводной воды, внесенном в теплую комнату, появляются пузырьки. Объясните это явление.

**89. Облака.** Почему облака не падают?

**90. Пуля и мяч.** На что сильнее влияет сопротивление воздуха: на полет ружейной пули или на движение брошенного мяча?

**91. Почему газ можно взвесить?** Физика утверждает, что молекулы газа находятся в непрерывном движении. Каким же образом вес несущихся в пустоте молекул передается дну сосуда?

Почему мы считаем, что вес, получаемый при взвешивании газа, равен сумме весов всех его молекул?

**92. По примеру слона.** Слон может оставаться под водою, дыша через хобот, выступающий над ней (рис. 82). Когда же пробовали подражать слону люди, заменяя хобот трубкой, плотно прилегающей ко рту, то начиналось кровотечение изо рта, носа, ушей, кончавшееся тяжелым заболеванием или даже гибелью водолаза. Почему?

**93. Давление в гондоле стратостата.** При своих стратосферных полетах проф. Пикар помещался в шарообразной алюминиевой кабине диаметром 2,1 м со стенками 3,5 мм толщины (рис. 83). Внутри этой абсолютно непроницаемой для воздуха кабины поддерживалось нормальное атмосферное давление, а на той высоте, которую шар достиг, давление наружного воздуха составляло около 0,1 ат.

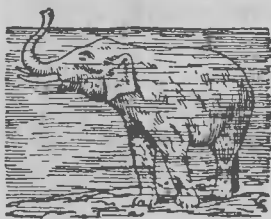


Рис. 82. Отчего человек не может следовать этому примеру (в. 92)?

Рис. 83. Проф. Пикар  
возле своей алюми-  
ниевой кабины, ря-  
дом — его спутник по  
полету (в. 93).



На каждый квадратный сантиметр поверхности шарообразной кабины действовал изнутри избыток давления в  $0,9 \text{ кг}$  ( $9 \text{ Н/см}^2$ ). Легко рассчитать, что полушария распирались с силою в  $35 \text{ т}$  ( $350\,000 \text{ Н}$ ). Почему же кабина не была разорвана таким сильным давлением подобно детскому воздушному шару под колпаком воздушного насоса?

**94. Ввод веревки в гондолу стратостата.** Внутри кабины высотного аэростата Пикара необходимо было ввести конец веревки от клапана стратостата. Как следует устроить этот ввод, имея в виду, что воздух из кабины не должен быть выпущен в окружающую разреженную среду?

**95. Барометр, подвешенный к весам.** Верхний конец трубки чашечного барометра прикреплен к одной чашке весов, на другую чашку положены для равновесия гири (рис. 84).

Нарушится ли равновесие, если изменится барометрическое давление?

**96. Сифон в воздухе.** Как без всяких приспособлений пустить в действие сифон (рис. 85), не наклоняя сосуда и не пользуясь обычными приемами — насасыванием жидкости, погружением сифона в жидкость? Сосуд наполнен почти доверху.

**97. Сифон в пустоте.** Может ли сифон действовать в пустоте?

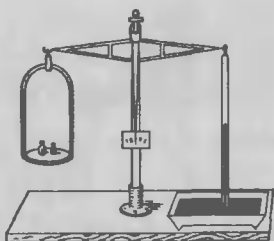


Рис. 84. Поколеблются ли весы, если атмосферное давление изменится (в. 95)?

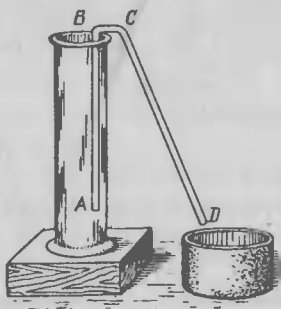


Рис. 85. Как проще всего пустить в действие этот сифон (в. 96)?

**98. Сифон для газов.** Можно ли сифоном переливать газ?

**99. Подъем воды насосом.** Как высоко может поднять воду колодезный всасывающий насос (рис. 86)?

**100. Истечение газа.** Под колоколом воздушного насоса помещен закрытый баллон с газом, давление которого нормальное. Если кран баллона открыт, газ устремится в окружающую пустоту со скоростью 400 м/с.

Какова была бы скорость вытекания, если бы первоначальное давление газа в баллоне равнялось 4 ат?



Рис. 86. Как высоко может поднимать воду такой насос (в. 99)?

**101. Проект дарового двигателя.** Всасывающий насос поднимает воду потому, что под поршнем его разрежается воздух. При наибольшем практически достижимом разрежении вода поднимается на 7 м. Но если работа накачивания состоит лишь в разрежении воздуха, то поднятие воды на высоту 1 м и 7 м требует одинакового расхода энергии.

Можно ли использовать это свойство водяного насоса для устройства дарового двигателя? Как?

**102. Тушение пожара кипятком.** Кипяток гасит огонь быстрее, чем холодная вода, так как сразу отнимает от пламени теплоту парообразования и окружает огонь слоем пара, затрудняющего доступ воздуха.

Ввиду этого, не следовало ли бы пожарным являться на пожары с бочками кипящей воды и поливать ею из насосов горящее здание?

**103. Задача о резервуаре с газом.** Резервуар *A* (рис. 87) содержит воздух, сжатый под давлением свыше 1 ат при температуре окружающей среды. Давление сжатого газа измеряется высотой ртутного столба в манометре. Открыв кран *B*, выпустили из резервуара столько газа, что ртутный столб в манометрической трубке понизился до высоты, соответствующей нормальному давлению.

Спустя некоторое время было замечено, что хотя кран оставался закрытым, ртуть в трубке снова несколько поднялась. Почему это произошло?

**104. Воздушный пузырек на дне океана.** Если бы у дна океана на глубине 8 км появился пузырек воздуха, мог ли бы он всплыть на поверхность воды?

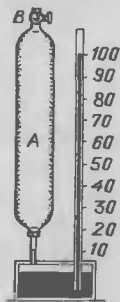


Рис. 87. К задаче о резервуаре с газом (в. 103).

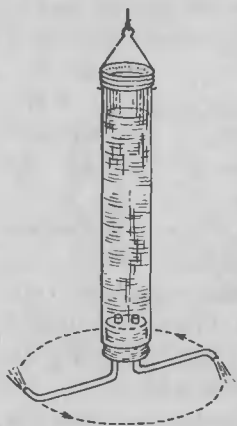


Рис. 88. Может ли Сегнерово колесо вращаться в пустоте (в. 105)?

**105. Сегнерово колесо в пустоте.** Вращается ли Сегнерово колесо в пустоте (рис. 88)?

**106. Вес сухого и влажного воздуха.** Что тяжелее: кубометр сухого воздуха или кубометр воздуха влажного — при одинаковых условиях температуры и давления?

**107. Максимальное разрежение.** Во сколько раз примерно разрежается воздух лучшими современными воздушными насосами?

**108. Что мы называем «пустотой».** Сколько приблизительно молекул остается еще в литровом сосуде, из которого воздух выкачан самым лучшим насосом?

Хватило ли бы их, чтобы наделить по одной молекуле все население Москвы?

**109. Почему существует атмосфера?** Как объясняете Вы существование земной атмосферы?

Молекулы воздуха либо подвержены силе тяготения, либо не подвержены. Если не подвержены, то почему не рассеиваются они в пустом пространстве вокруг Земли? Если же они подвержены тяжести, то почему не упали на поверхность Земли, а держатся над нею?

**110. Газ, не заполняющий резервуара.** При всяких ли условиях газ заполняет весь предоставленный ему объем?

Возможно ли, чтобы газ занимал часть резервуара, оставляя другую часть пустой?

#### ОТВЕТЫ НА ВОПРОСЫ 78—110

**78.** Многие еще и теперь продолжают «по инерции» считать третьей постоянной составной частью воздуха после азота и кислорода углекислый газ. Между тем уже довольно давно обнаружен в составе воздуха газ, количественное содержание которого раз в тридцать больше, нежели углекислого газа. Это аргон, один из так называемых благородных газов.



Его содержится в воздухе по объему около 1% (точнее 0,94%), между тем как содержание углекислого газа всего 0,03%.

**79.** Неправильно считать самым тяжелым газообразным элементом хлор, который тяжелее воздуха в 2,5 раза. Существуют газообразные элементы, гораздо более тяжелые. Если не принимать в расчет крайне недолговечный радон, или эманацию радия, который тяжелее воздуха в 8 раз, то на первое место по массе надо поставить газ ксенон: он тяжелее воздуха в 4,5 раза. Ксенон содержится в атмосферном воздухе в ничтожном количестве: 1 см<sup>3</sup> ксенона в 150 м<sup>3</sup> воздуха.

Если бы требовалось назвать не газообразный элемент, а вообще газообразное вещество, то к самым тяжелым газам надо было бы отнести четыреххлористый кремний, SiCl<sub>4</sub>, который в 5,5 раз тяжелее воздуха, и никель-карбонил, Ni(Co)<sub>4</sub>, — в 6 раз тяжелее воздуха.

Пары бывают еще тяжелее: пары брома в 5,5 раза тяжелее воздуха, а ртути — даже в 7 раз. (Читатель, конечно, помнит существенный признак, отличающий пар от газа: газ имеет температуру выше критической, пар — ниже.)

**80.** Традиционное утверждение многих учебников и популярных книг, что человеческое тело испытывает со стороны атмосферы силу давления в 200 кН, лишено всякого смысла. Проследим, откуда появляются эти 200 кН.

Расчет ведется так: на каждый квадратный сантиметр поверхности тела давят 10 Н. Вся поверхность тела составляет примерно 20 000 см<sup>2</sup>; «следовательно, общая сила давления равна 200 000 Н = 200 кН».

Совершенно упускается из вида, что силы, приложенные здесь к разным точкам тела, действуют в различных направлениях, а складывать арифметически силы, направленные под углом одна к другой, — бессмысленная операция. Складывать силы, конечно, можно, но по правилу сложения векторов — и тогда получится совсем не то, о чем говорилось выше: получится то, что равнодействующая всех сил равна весу воздуха в объеме тела. Если мы хотим определить не величину этой равнодействующей, а величину давления на поверхность тела, то можем лишь утверждать, что тело находится под давлением 10 Н/см<sup>2</sup>, —

это все, что можно сказать вразумительного о давлении, испытываемом нашим телом со стороны атмосферы.

Давление это переносится нами легко потому, что уравнивается равным давлением изнутри, и еще потому, что по абсолютной величине оно, в сущности, не так уж велико:  $0,1 \text{ Н/мм}^2$ . Сравнительная незначительность давления объясняет, почему клеточные стенки тканей нашего тела не раздавливаются двусторонним давлением.

Внутренние числа для величины давления атмосферы мы законно получили бы тогда лишь, когда поставили бы самый вопрос иначе, например, спросили бы:

1) с какою силою верхняя часть нашего тела придавливается атмосферой к нижней?

2) с какою силою правая и левая части нашего тела придавливаются атмосферой одна к другой?

Для ответа на первый вопрос нужно рассчитать силу давления на площадь горизонтального сечения или горизонтальной проекции нашего тела (около  $1000 \text{ см}^2$ ); получилась бы сила в  $10 \text{ кН}$ . Во втором случае следовало бы определить силу давления на площадь вертикальной проекции тела (около  $5000 \text{ см}^2$ ); результат —  $5 \text{ кН}$ . Но столь поражающие числа означают, в сущности, не более того, что мы знали, приступая к расчету, а именно, что на  $1 \text{ см}^2$  сечения нашего тела приходится сила в  $10 \text{ Н}$ . Это лишь различные выражения одной и той же мысли.

**81.** Спокойно выдыхаемый нами воздух имеет избыток давления над наружным воздухом примерно в  $0,001 \text{ ат}$ .

Выдувая воздух, мы сжимаем его гораздо больше, доводя избыток давления над наружным до  $0,1 \text{ ат}$ . Это соответствует  $76 \text{ мм рт. ст.}$  Такова сила нашего дуновения. Она наглядно проявляется тогда, когда, вдывая ртом воздух в одно колено открытого ртутного манометра, мы поднимаем уровень ртути в другом: надо довольно сильно напрячь мускулы груди, чтобы добиться разницы уровней в  $7\text{—}8 \text{ см}$ . (Впрочем, опытные стеклодувы могут поднять ртуть до  $30 \text{ см}$  и более.)

**82.** Снаряды современных артиллерийских орудий выбрасываются пороховыми газами под давлением до  $4000 \text{ ат}$ : это соответствует давлению водяного столба в  $40 \text{ км}$ .

**83.** Выражение величины атмосферного давления в миллиметрах ртутного столба или в  $\text{кгс}/\text{см}^2$  в настоящее время уже устарело. В метеорологической практике употребляется теперь для этого другая мера, относящаяся к абсолютной системе и носящая название «миллибар».

Миллибар, как видно из названия (милли), есть тысячная часть другой единицы—бара. Бар—единица давления, равная мегадине (т. е. миллиону дин) на квадратный сантиметр. Понятно, что миллибар, который в 1000 раз меньше бара, равен  $1000 \text{ дин}/\text{см}^2$ . Так как дина составляет  $1/980$  долю грамм-силы, нормальное же давление атмосферы (отвечающее 760 мм рт. ст.) равно  $1033 \text{ гс}/\text{см}^2$ , то нормальное атмосферное давление выражается в миллибарах числом

$$10333 \cdot 980 = 1\,013\,000 \text{ дин}/\text{см}^2 = 1013 \text{ миллибар.}$$

Легко рассчитать, что  $1000 \text{ миллибар} = 750 \text{ мм рт. ст.}$  Это дает простое правило перевода прежних мер в новые: число миллиметров ртутного столба умножить на  $4/3^*)$ .

**84.** Ошибочно полагать, будто в стакане имеется только вода, а воздуха нет вовсе, так как бумажка прилегает к воде вплотную. Там, безусловно, есть и воздух. Если бы между двумя соприкасающимися плоскими предметами не было прослойки воздуха, мы не могли бы приподнять со стола ни одной вещи, опирающейся на стол плоским основанием: пришлось бы преодолевать атмосферное давление. Накрывая поверхность воды листком бумаги, мы всегда имеем между ними тонкий слой воздуха.

Проследим за тем, что происходит при перевертывании стакана дном вверх. Под тяжестью воды бумажка прогибается слегка вниз, а если вместо бумажки взята пластинка, то она несколько оттягивается от краев стакана.

Так или иначе, для небольшого количества воздуха, которое имелось между водой и бумажкой (или

---

<sup>\*)</sup> В принятой в настоящее время системе единиц СИ за единицу давления принят паскаль (Па)—давление, создаваемое силой 1 Н, равномерно распределенной по нормальной к ней поверхности площадью  $1 \text{ м}^2$ . С другими единицами паскаль связан соотношениями:  $1 \text{ мм рт. ст.} = 133 \text{ Па}$ ;  $1 \text{ кгс}/\text{см}^2 = 1 \text{ ат} = 9,81 \cdot 10^4 \text{ Па}$ ;  $1 \text{ бар} = 10^5 \text{ Па}$ . (Примеч. ред.)

пластинкой), освобождается некоторое пространство под доньшком стакана; пространство это больше первоначального; воздух, следовательно, разрезается, и давление его падает.

Теперь на бумажку действуют: снаружи — полное давление атмосферы, изнутри — неполное атмосферное давление плюс вес воды. Оба давления, наружное и внутреннее, уравниваются. Достаточно поэтому приложить к бумажке небольшое усилие, чтобы преодолеть силу прилипания (поверхностное натяжение жидкой пленки), — и бумажка отпадет.

Прогибание бумажки под действием веса воды должно быть ничтожно. Когда пространство, заключающее воздух, увеличится на 0,01, на такую же долю уменьшится давление воздуха в стакане. Недостающая сотая доля атмосферного давления покрывается весом 10 см водяного столба. Если слой воздуха между бумажкой и водой имел первоначально толщину 0,1 мм, то достаточно увеличения его толщины на  $0,01 \times 0,1$ , т. е. на 0,001 мм (1 микрометр), чтобы объяснить удержание бумажки у краев перевернутого стакана. Нечего и пытаться поэтому уловить непосредственно глазом это прогибание бумажки.

В некоторых книгах при описании рассматриваемого опыта высказывается требование, чтобы стакан был налит водою непременно до самого верха — иначе опыт не удастся: воздух будет находиться по обе стороны бумажки, давление его с той и другой стороны уравнивается, и бумажка отпадет под действием веса воды. Прodelав опыт, мы сразу же убеждаемся в неосновательности этого предостережения: бумажка держится не хуже, чем при полном стакане. Чуть отогнув ее, мы увидим воздушные пузыри, пробегающие от отверстия через слой воды. Это с несомненностью показывает, что воздух в стакане разрежен (иначе внешний воздух не врывался бы через воду в пространство над нею).

Очевидно, при перевертывании стакана слой воды, скользя вниз, вытесняет часть воздуха, и остающаяся часть, занимая больший объем, разрежается. Разрежение здесь значительнее, чем в случае полного стакана, о чем наглядно свидетельствуют пузыри воздуха, проникающего в стакан при отгибании бумажки. Соответственно большему разрежению прижатие бумажки бывает сильнее.

Чтобы покончить с этим опытом, который, мы видим, далеко не так прост, как представляется сначала, заметим еще, что бумажка может держаться даже и при отсутствии над ней слоя воды: для этого нужно лишь, чтобы края стакана были мокры, а сама бумажка — не слишком тяжела. В таком случае бумажку поддерживает сила поверхностного натяжения тонкой водяной пленки. При длине окружности кромки стакана 25 см мы имеем для водяной пленки (коэффициент поверхностного натяжения воды равен  $74 \cdot 10^{-5}$  Н/см) силу, равную

$$75 \cdot 10^{-5} \cdot 25 \cdot 2 = 3750 \cdot 10^{-5} \text{ Н.}$$

Такая сила может удерживать массу примерно в 4 г.

Следовательно, если масса бумажки не превышает 4 г, она не будет отпадать от смоченных краев стакана.

**85.** Самый опустошительный ураган, вырывающий с корнем вековые дубы и опрокидывающий каменные стены, давит не только не сильнее, чем пар в цилиндре машины, но во много раз слабее. Давление его  $\approx 3000$  Н/м<sup>2</sup>, что составляет примерно 0,03 нормального атмосферного давления. Цифра весьма скромная: давление пара в цилиндре машины достигает десятков атмосфер, если даже не иметь в виду машин сверхвысокого давления. Можно сказать поэтому, что самый сильный ураган давит в сотни раз слабее, чем пар в машине.

**86.** Глядя на высокую заводскую трубу, невольно поддаешься впечатлению, что сила тяги ее должна быть огромна. В действительности же засасывающая сила заводских труб имеет весьма и весьма скромную величину: выдувая воздух изо рта, мы гоним его с гораздо большей силой.

Легко убедиться в этом, проделав следующий расчет. Сила тяги измеряется разницей веса двух столбов воздуха — наружного и заключенного в трубе (при равной высоте и одинаковой площади основания). Воздух внутри трубы нагревается до температуры не выше 300° С, можно рассчитать, что вес его при этом уменьшается примерно вдвое; значит, вес кубометра воздуха в трубе вдвое меньше веса кубометра наружного воздуха. Так как высота трубы 40 м, то разность веса упомянутых столбов воздуха, нагретого

и холодного, равна весу 20-метрового столба наружного воздуха. Известно, что атмосферный воздух в 10 000 раз легче ртути; вес 20-метрового воздушного столба равен поэтому весу ртутного столба высотой

$$20\,000 : 10\,000 = 2 \text{ мм.}$$

Мы узнали, что тяга в заводской трубе измеряется всего 2 мм рт. ст. Сила, которая гонит воздух в такой трубе, меньше  $30 \text{ Н/см}^2$ . Между тем избыток давления воздуха, выдуваемого ртом, — около 70 мм рт. ст., т. е. в 35 раз больше. Дуновением мы сообщаем воздуху большую скорость, чем быстрота течения газов в самой высокой заводской трубе. Даже простое выдыхание воздуха создает течение, правда, раза в три слабее, чем в заводской трубе, но, безусловно, более сильное, чем в дымовой трубе трехэтажного дома.

Эти неожиданные результаты способны внушить сомнение. Как может столь незначительная сила породить тот энергичный приток воздуха к топке, который наблюдается при тяге? Но не будем забывать, что в данном случае малая сила приводит в движение очень небольшую массу (литр нагретого в трубе воздуха имеет массу 0,65 г); поэтому ускорение получается значительнее.

С другой стороны, можно поставить вопрос: неужели для получения тяги в 2 мм рт. ст. необходимо возводить такие сооружения, как заводская труба? Ведь самый несовершенный вентилятор порождает гораздо большую тягу. Соображение правильное. Но без трубы куда деть вредные для дыхания топочные газы? Их необходимо отослать подальше от человека, домашних животных, растений.

Заводские трубы строятся не только ради тяги (этого можно было бы достичь проще и дешевле), но и для того, чтобы удалять вредные топочные газы от тех мест, где находятся люди, животные, растения. Развеивая вредные газы в высоких слоях воздуха, заводские трубы значительно ослабляют непосредственный вред от вдыхания продуктов горения топлива.

**87.** В воздухе, которым мы дышим, кислород составляет по объему 21%. Установлено, что в литре воды растворяется кислорода вдвое больше, чем азота. Это приводит к обогащению растворенного воздуха кислородом: воздух, растворенный в воде,

содержит 34% кислорода. (Углекислоты же в атмосфере 0,04%, в воде—2%.)

**88.** Пузырьки, появляющиеся в холодной воде при нагревании,—воздушные: выделяется часть воздуха, растворенного в воде. В отличие от растворимости твердых тел растворимость газов с повышением температуры уменьшается. Поэтому при нагревании вода уже не может удерживать в растворе прежнее количество воздуха, и избыток газов выделяется пузырьками.

Вот относящиеся сюда числовые данные—в литре воды содержится:

19 см<sup>3</sup> воздуха при 10° С (водопроводная вода),

17 см<sup>3</sup> воздуха при 20° С (комнатная температура).

Из каждого литра воды должно выделиться 2 см<sup>3</sup> воздуха. Так как стакан вмещает 1/4 литра воды, то из полного стакана воды в указанных условиях выделится 500 мм<sup>3</sup> воздуха. При среднем диаметре пузырька 1 мм это составляет тысячу пузырьков.

**89.** «Потому что водяной пар легче воздуха»,—отвечают нередко. Водяной пар действительно легче воздуха, это бесспорно; однако облака не состоят вовсе из водяного пара. Водяной пар невидим; если бы облака состояли из пара, они были бы совершенно прозрачны. Облака и туман (это одно и то же) состоят из воды в жидком, а не в газообразном состоянии. Но тогда еще непонятнее, почему облака держатся в воздухе, а не падают на землю.

Не так еще давно господствовал взгляд, успевший широко распространиться, что облака состоят из мельчайших водяных пузырьков, наполненных водяным паром. Теперь это представление отвергнуто: облака и туман состоят не из пузырьков, а из сплошных водяных капелек диаметром 0,01—0,02 мм, зачастую даже 0,001 мм. Такие шарики, конечно, тяжелее сухого воздуха в 800 раз. Но, обладая по сравнению со своей массой весьма большой поверхностью, водяные шарики при падении в воздухе встречают настолько значительное сопротивление, что опускаются вниз крайне медленно. Они отличаются, как говорят, значительной «парусностью». Например, капельки радиусом в 0,01 мм падают равномерно со скоростью всего 1 см/с. Значит, облака в сущности не плавают в воздухе—они падают, но падение это происходит чре-

звычайно медленно; достаточно самого слабого восходящего течения воздуха, чтобы не только удержать облако от падения, но и поднять его вверх.

Итак, фактически облака падают, но медленное падение их либо остается незамеченным, либо скрадывается восходящим воздушным течением.

По той же причине держатся в воздухе и пылинки, хотя масса многих из них, например металлических, больше массы воздуха в несколько тысяч раз.

**90.** Наивно думать, что стремительно летящая пуля не может встречать сколько-нибудь заметной помехи своему движению со стороны такой легкой среды, как воздух. Как раз наоборот: именно быстрота движения обуславливает весьма значительное сопротивление воздуха полету пули. Мы знаем, что пуля современной винтовки залетает в лучшем случае на расстояние 4 км. А знаете, как далеко залетала бы она, если бы сопротивления воздуха не было? Буквально в 20 раз дальше (рис. 89)! Это кажется невероятным; полезно для убедительности привести расчет.

Пуля покидает ствол винтовки со скоростью около 900 м/с. Наибольшая дальность полета тела, брошенного в пустоте, достигается, как известно из механики, в том случае, когда тело брошено под углом  $45^\circ$  к горизонту; дальность определяется тогда формулой

$$L = v^2 / g,$$

где  $v$  — начальная скорость,  $g$  — ускорение силы тяжести. В нашем случае  $v = 900$  м/с,  $g \approx 10$  м/с<sup>2</sup>. Подставляя эти значения  $v$  и  $g$ , получаем:

$$L = 900^2 / 10 = 81\,000 \text{ м} = 81 \text{ км}.$$

Причина такого сильного влияния воздуха на полет пули кроется в том, что величина сопротивления среды



Рис. 89. Как влияет воздух на полет пули: вместо 80 км пуля залетает только на 4 км (в. 90).



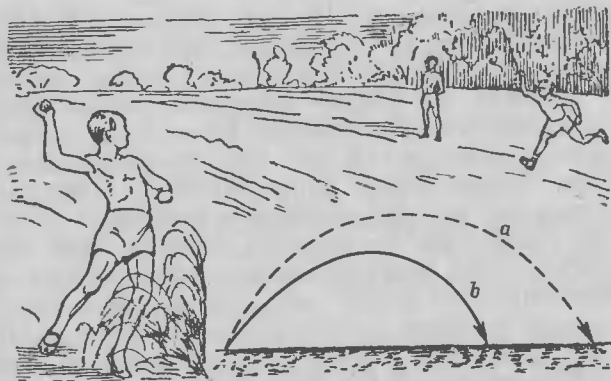


Рис. 90. Как влияет воздух на полет мяча: вместо параболы (штриховая линия) он летит по баллистической кривой (сплошная линия) (в. 90).

растет пропорционально не первой, а второй (и даже несколько выше второй) степени скорости. Вот почему полету мяча, который получает от руки человека обычно скорость всего около 20 м/с, воздух оказывает до того ничтожное сопротивление, что практически им можно вовсе пренебречь, применяя к движению брошенного мяча формулы механики без всяких оговорок (рис. 90). В пустоте мяч, брошенный под углом к горизонту в  $45^\circ$  со скоростью 20 м/с, упал бы на расстоянии 40 м от бросающего ( $20^2 : 10$ ), и примерно такова же дальность его полета в реальных условиях.

Преподаватели механики хорошо бы сделали, если бы в качестве материала для численных упражнений пользовались не столько движением пуль и артиллерийских снарядов, сколько полетом брошенного мяча: результаты будут гораздо ближе отвечать реальной действительности, чем те в сущности фантастические числа, к которым приводит игнорирование сопротивления воздуха при движении пуль и снарядов.

**91.** Учебники и даже большие курсы физики не уделяют внимания этому простому вопросу, естественно возникающему в уме учащегося и способному породить недоумение. Между тем вопрос допускает совершенно элементарное рассмотрение.

Как бы молекула ни двигалась — вниз, вверх, в сторону или в косом направлении, — это «тепловое» ее движение складывается с отвесным падением под

действием силы тяжести. На вес газа могут влиять только такие отвесные слагающие; все прочие, чисто «тепловые» скорости обуславливают равное давление газовых молекул на стенки сосуда и не сообщают ему поступательного движения. Поскольку скорости эти никакого влияния на вес газа иметь не могут, мы вправе, рассматривая нашу задачу, отвлечься от них, считать их как бы несуществующими.

Что же тогда у нас останется? Дождь молекул, падающих отвесно вниз, подскакивающих после удара о дно и обменивающихся своими скоростями при взаимных столкновениях \*). Обмен скоростями равнозначен прохождению, при взаимной встрече, одной молекулы сквозь другую. Мы можем считать поэтому, что все молекулы беспрепятственно достигают дна сосуда.

В этой упрощенной картине гораздо легче разобраться.

Проследим за какой-нибудь одной молекулой. Достигнув дна, она отражается от него с такою же скоростью и поднимается на ту высоту, с какой упала. С этой высоты она падает вторично, третий раз и т. д. Если продолжительность падения  $t$ , то в течение каждой секунды молекула ударится о дно

$$n = 1/2t \text{ раз}$$

( $2t$  потому, что от удара до удара молекула должна сделать два пробега — один вверх, другой вниз, оба — одинаковой продолжительности). Величину  $t$  определяем из формулы:

$$h = \frac{gt^2}{2}, \quad t = \sqrt{\frac{2h}{g}}, \quad n = \frac{1}{2t} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{g}{2h}},$$

где  $h$  — высота падения. Скорость, с какой молекула достигает дна сосуда, равна

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

Импульс  $p$  каждого единичного удара равен разности количеств движений до и после удара:

$$p = mv - m(-v) = 2mv,$$

а суммарный импульс  $P$  всех  $n$  ударов равен

$$P = np = 2mvn = 2m \cdot \frac{1}{2} \sqrt{\frac{g}{2h}} \cdot \sqrt{2gh} = mg.$$

---

\*) Подчиняясь законам удара вполне упругих тел равной массы.

Итак, в течение секунды дно сосуда получит от каждой молекулы импульс, равный  $mg$ . С другой стороны,

$$P = F \cdot t_0 = F \cdot 1 = F.$$

Следовательно,  $F = mg$  — сила удара равна весу молекулы.

Ясно, что если каждая молекула ударяет с силой своего веса и все заключающиеся в сосуде молекулы долетают до дна, то дну сосуда передается суммарный вес всех молекул газа.

Вспомним, что сосуд с беспорядочно движущимися молекулами был нами заменен сосудом с молекулами, падающими отвесно. Мы знаем, однако, что в смысле веса молекул оба сосуда равнозначщи. Поэтому вывод, установленный для одного сосуда, должен быть верен и для другого.

Читатель пожелает, быть может, узнать, как же в действительности осуществляется эта передача молекулами своего веса дну сосуда. Молекулы, движущиеся отвесно вниз, передают свой удар дну либо непосредственно, либо через сталкивающиеся с ними молекулы, с которыми они обмениваются скоростями (речь идет, напомним, о передаче только той составляющей, которая обусловлена силою тяжести). Молекулы, ударяющие в боковые стенки косо вниз, передают свой удар дну через эти стенки. Молекулы, ударяющие в верхнюю стенку или в боковые косо вверх, доносят свой удар ослабленным, так как скорость их уменьшается действием тяжести; уменьшение же удара вверх дает соответствующий перевес действию ударов в нижнюю стенку. Остается сказать о молекулах, ударяющих в строго горизонтальном направлении. Если при наличии тяжести молекула ударяет горизонтально, то при отсутствии тяжести она ударила бы косо вверх и уменьшила бы давление на чашку весов сосуда. Тяжесть отменяет это уменьшение давления, иначе говоря — увеличивает вес сосуда.

Вопрос о передаче веса был нами поставлен для газов. Но в сущности его можно повторить также для тел твердых и жидких: все тела состоят из хаотически движущихся молекул (кристаллы — из атомов), которые между собою не соприкасаются. Условия, как видим, принципиально те же, что и для газов. Передача опоре веса молекул, составляющих

тела, осуществляется во всех случаях посредством многочисленных мелких ударов; с изменением состояния тела меняется лишь механизм этой передачи.

**92.** Причина тех болезненных расстройств, которые наблюдаются при погружении под воду человека с трубкой, ведущей от рта наружу воды, кроется в неравенстве давлений внутри и снаружи тела (рис. 91).

Изнутри, со стороны легких, давит нормальный воздух с силой одной атмосферы, а снаружи давит одна атмосфера + столб воды, высотой, равной глубине погружения. При глубине погружения в полметра грудная клетка находится под избыточным давлением снаружи, равным 50 см водяного столба, или  $50 \text{ гс/см}^2$  ( $5 \text{ кгс/дм}^2$ ). Это, конечно, должно заметно затруднять дыхание: приходится дышать, когда на грудь давит груз в 15—20 кг. Но дело не только в этом одном, гораздо серьезнее нарушение кровообращения. Кровь вытесняется из частей тела, где давление выше (ноги, полость живота) в области меньшего давления — в

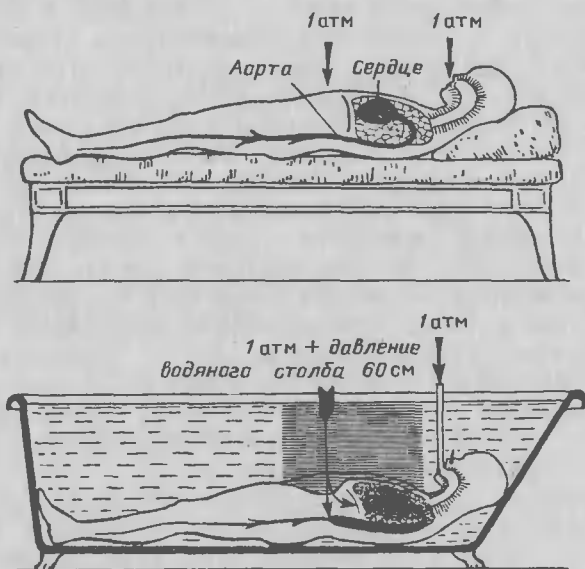


Рис. 91. Что происходит в организме человека под действием атмосферного давления, когда он окружен воздухом (вверху) и когда он погружен в воду (внизу). Рисунок объясняет, почему человек не может дышать под водой, как слон на рис. 83 (в. 92).

грудь и голову. Переполненные кровью сосуды этих частей тела препятствуют оттоку крови от сердца и аорты: последние непомерно расширяются от избытка крови, и в результате—если не смерть, то тяжелое заболевание.

Австрийский врач Р. Штиглер проверил сказанное на ряде опытов, описанных им в книге «Купанье, плавание и ныряние» (Вена). Опыты проводил он над самим собой, погружая в воду тело и голову с трубкой, ведущей ото рта наружу. Оказалось, что когда грудь находилась на глубине одного метра, дыхание становилось совершенно невозможным. На глубине 60 см организм выдерживал пребывание под водой в течение всего 3,75 мин, на глубине 90 см—1 мин, на 1,5 м—не более 6 с. Когда же врач рискнул погрузиться под воду до 2 м, то уже через несколько секунд сердце расширилось до опасного предела и для лечения расстроенного кровообращения потребовалось трехмесячное пребывание в постели.

Почему же,—спросит, вероятно, читатель,—можем мы все-таки нырять на большую глубину и оставаться там довольно долго без вреда для здоровья? Потому что при нырянии условия совершенно иные. Перед тем как броситься в воду, ныряющий набирает в легкие возможно больше воздуха; по мере погружения тела в воду, воздух этот все сильнее сдавливается напором воды, оказывая в каждый момент давление, равное давлению окружающей воды. Нет причины поэтому для переполнения сердца кровью. В таких же условиях, как ныряющий, находится и водолаз в своем костюме (давление воздуха, подводимого накачиванием в шлем скафандра, равно давлению окружающей воды), а также рабочие в кессонах.

Остается еще вопрос—о слоне: почему не погибает слон, оставаясь под водою с выступающим наружу хоботом? Потому что он слон: обладай мы крепостью слонового организма, могучей его мускулатурой, мы тоже могли бы безнаказанно погружаться на подобную глубину.

**93.** Совершенно верно, что сила, стремящаяся разорвать кабину Пикара, весьма велика, но это не значит, что кабина должна разорваться. Рассчитаем, какое разрывающее усилие приходится в этом случае

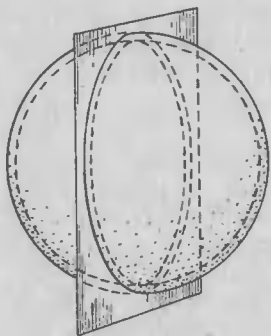


Рис. 92. Разрез шарообразной кабины Пикара по большому кругу (в. 93).

3,5 мм = 0,35 см, поэтому площадь кольца (приближенно) составляет

$$\pi \cdot 210 \cdot 0,35 = 230 \text{ см}^2.$$

На 1 см<sup>2</sup> оказывается давление

$$350\,000 : 230 = 1500 \text{ Н/см}^2.$$

Между тем материал кабины (алюминий) разрывается при нагрузке 10 000 Н/см<sup>2</sup>, если алюминий литой, и при нагрузке 25 000 Н/см<sup>2</sup>, если он прокатный. Отсюда ясно, что кабина построена с 8—20-кратным запасом прочности.

Сооруженный летом 1933 г. в Ленинграде первый у нас стратосферный аэростат «Осоавиахим I» имеет шарообразную стальную кабину со стенками толщиной всего в 0,8 мм. Но и в этом случае нагрузка от давления воздуха изнутри равна только 6700 Н/см<sup>2</sup>, между тем как разрывающее усилие для стали равно 45 000—100 000 Н/см<sup>2</sup>: мы имеем здесь 7—15-кратный запас прочности.

**94.** Для ввода клапанной веревки в герметически закрытую гондолу высотного аэростата проф. Пикар придумал следующее простое приспособление, примененное также и для советских стратостатов.

Внутри кабины устроена сифонная трубка, длинное колено которой сообщается с наружным пространством. В трубку налита ртуть (рис. 93). Так как давление

на каждый квадратный сантиметр сечения оболочки. Сила, стремящаяся разорвать шарообразную кабину на два полушария, равна

$$0,9 \cdot 10^5 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot 2,1^2 = 350\,000 \text{ Н}$$

(надо учитывать не поверхность полушария, а лишь ее проекцию на плоскость, т. е. площадь большого круга). Сила эта приложена к площади кругового кольца, по которому полушария соприкасаются (рис. 92). Толщина стенки шарообразной кабины Пикара

Рис. 93. Как Пикар ввел клапанную веревку в кабину (в. 94).



внутри кабины не может превышать наружного больше чем на 1 ат, то уровень ртути в длинном колене будет возвышаться над уровнем ее в коротком не более, чем на 76 см. Через ртуть проводят клапанную веревку, которая при своем движении не нарушает установившейся разности уровней ртути. Благодаря этому можно тянуть за веревку, не опасаясь выпустить воздух из гондолы: канал, по которому скользит веревка, все время закупорен ртутью.

**95.** Глядя на барометрическую трубку, подвешенную к чашке весов, можно подумать, что изменение уровня ртути в трубке не должно никак влиять на равновесие чашек: ведь ртутный столб опирается на ртуть в нижнем сосуде, а на точку подвеса он не оказывает давления. Так оно и есть, и тем не менее всякая перемена барометрического давления будет нарушать равновесие весов (рис. 94).

Объясним — почему. Сверху на трубку давит атмосфера, и ее давление не встречает никакого противодействия изнутри трубки: над ртутью пространство пусто. Следовательно, гири на другой чашке весов уравнивают не только стеклянную трубку барометра, но и давление на нее атмосферы, а так как давление атмосферы на сечение трубки в точности равно весу ртутного столба в ней, то выходит, что гири как бы уравнивают ртутный барометр целиком. Вот

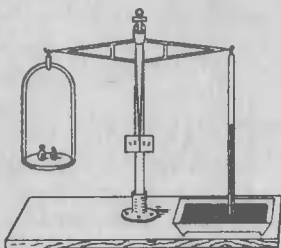


Рис. 94. К ответу на вопрос 95.

почему всякая перемена в барометрическом давлении (т. е. всякое колебание уровня ртути в трубке) должна нарушать равновесие чашек.

На этом принципе устроены так называемые весовые барометры, к которым удобно присоединить механизм, записывающий их показания (например, барограф Секки).

**96.** Задача сводится к тому, чтобы заставить жидкость подняться в трубке сифона выше уровня ее в сосуде и дойти до изгиба сифона. С того момента, когда жидкая нить перекинется через изгиб, сифон начнет действовать. Добиться этого нетрудно, если воспользоваться следующим простым, хотя и малоизвестным свойством жидкости, о котором мы сейчас расскажем.

Возьмем стеклянную трубку такой толщины, чтобы отверстие ее можно было плотно закрыть пальцем. В таком виде погрузим ее в воду. Вода в трубку, конечно, не проникнет, но при отнятии пальца жидкость сразу войдет в трубку, и мы увидим, что в первый момент она поднимется в трубке выше, чем в сосуде; лишь затем уровни жидкости в трубке и вне ее сравняются (рис. 95).

Объясним, почему жидкость вначале переходит в трубке за уровень ее в сосуде. В момент отнятия пальца жидкость в трубке обладает в нижней точке скоростью, согласно формуле Торричелли,  $v = \sqrt{2gH}$ , где  $g$  — ускорение силы тяжести,  $H$  — глубина конца трубки под уровнем жидкости в сосуде. При дальнейшем подъеме жидкости в трубке скорость эта не уменьшается действием тяжести, так как движущаяся

порция жидкости опирается все время на нижние слои ее в трубке. Здесь не происходит того, что мы наблюдаем, подбрасывая вверх мяч. Подброшенный мяч как бы участвует в двух движениях — восходящем с постоянной (начальной) скоростью и нисходящем, равноускоренном (порождаемом силой тяжести). В нашей трубке нет этого второго движения, так как жидкость, поднимаясь, все время подпирается снизу порцией восходящей жидкости.



Рис. 95. К вопросу 96.



В итоге жидкость, вступающая в трубку, достигает уровня жидкости в сосуде с начальной своей скоростью  $v = \sqrt{2gH}$ . Нетрудно сообразить, что теоретически она должна взлететь вверх еще на такую же высоту  $H$ . Трение заметно уменьшает высоту этого подъема. С другой стороны, можно и увеличить подъем, если сузить верхнюю часть трубки.

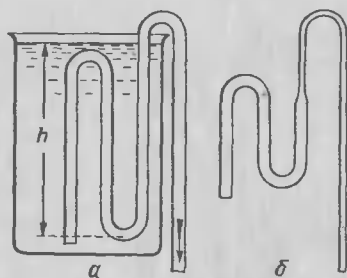


Рис. 96. Сифоны, которые не приходится засасывать (в. 96).

Легко догадаться, как может быть использовано описанное явление для пуска в действие сифона. Закрыв плотно пальцем один конец сифона, погружают другой в жидкость возможно глубже (для увеличения начальной скорости: чем больше  $H$ , тем больше и  $v = \sqrt{2gH}$ ). Затем быстро отнимают палец от трубки: жидкость поднимается в ней выше наружного уровня, перельется через изгиб в другое колено — и сифон начнет работать.

Практически очень удобно применять указанный прием к сифонам, форма которых приспособлена специально для этой цели. На рис. 96, а Вы видите такой самодействующий сифон. После сделанных разъяснений работа его становится понятна. Чтобы возможно было поднять повыше второй изгиб, соответствующую часть сифонной трубки устраивают несколько меньшего диаметра (рис. 96, б). Тогда жидкость, поступающая из широкой трубки в узкую, поднимается выше\*).

**97.** На вопрос: «Может ли сифон переливать жидкость в пустоте?» — отвечают обычно категорически: «Нет». Такой ответ получал я и от учащихся, и от преподавателей средней школы, и иной раз от профессоров — высшей.

Большинство школьных учебников и значительная часть университетских\*\*) — безоговорочно считают дав-

\*) Сифоны описанного образца придуманы немецким инженером Нейгебауэром.

\*\*) В том числе — и таких первоклассных ученых, как Г. Лоренц, Д. А. Гольдгаммер, Р. Милликен.

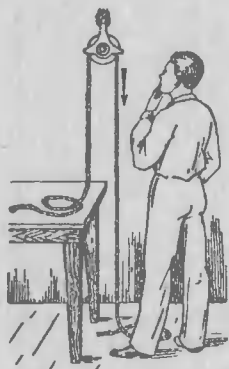


Рис. 97. Наглядное пояснение действия сифона (в. 97).

ление воздуха единственной причиной, обуславливающей переливание жидкости сифоном. Между тем это — физический предрассудок. «Жидкость в сифоне отлично течет в пустоте. В принципе сифон с жидкостью работает совершенно без давления воздуха», — читаем мы у проф. Р. В. Поля в его талантливой книге «Введение в механику и акустику» (1930 г.).

Как же объяснить работу сифона, не опираясь на давление атмосферы? Позволю себе привести соответствующие строки из моей «Технической физики» (1927 г.): «Так как правая половина жидкой

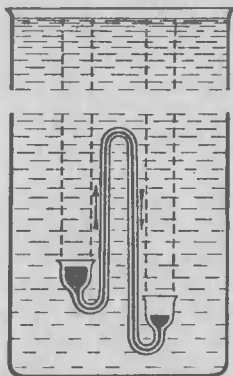
нити сифона длиннее, а следовательно, и тяжелее левой, то она перетягивает и заставляет жидкость все время течь в трубке по направлению к длинному концу. Это наглядно поясняется сопоставлением с веревкой, перекинутой через блок» (рис. 97).

Остановимся теперь на роли воздушного давления в рассмотренном явлении. Оно лишь поддерживает непрерывность жидкой нити, препятствуя ей выливаться из колен сифона. Но целость жидкой нити может быть обеспечена при известных условиях и без участия внешних сил, одним только сцеплением жидкости.

«В безвоздушном пространстве действие сифона обыкновенно прекращается, особенно если в верхней его точке имеются воздушные пузырьки. Но если на стенках трубки нет ни малейших следов воздуха и вода в сосуде также свободна от него, то при осторожном обращении сифон продолжает действовать и в пустоте. В этом случае сцепление воды препятствует разрыву водяного столба» (Гримзель, «Курс физики», ч. I, § 106).

Категоричнее других говорит о том же проф. Поль в упомянутой выше книге: «В элементарном обучении часто изображают действие сифона как следствие давления воздуха. Однако это верно лишь с большими оговорками. Принцип сифона ничего общего не имеет с давлением воздуха». Приводя известное уже читателю сравнение с перекинутой через блок веревкой, Поль продолжает: «То же справедливо и для жидкостей. Ведь и они, как и тела твердые, обладают

Рис. 98. Опыт переливания ртути сифоном, погруженным в масло. Целость ртутной нити в сифонной трубке поддерживается давлением масла, которое в этом случае играет роль атмосферного давления, препятствующего образованию воздушных пузырьков в воде (в. 97).



прочностью на разрыв<sup>\*)</sup>. Жидкость должна лишь быть достаточно свободна от пузырьков газа» ... Далее тот же автор описывает такую постановку опыта переливания жидкостей с помощью сифона, когда роль атмосферного давления играют два нагруженных поршня или напор другой жидкости с меньшей плотностью: давление их препятствует разрыву жидкой нити, даже если она и содержит воздух (рис. 98)<sup>\*\*)</sup>.

<sup>\*)</sup> Прочность жидкостей на разрыв огромна, достигая для воды, например, десяти тысяч атмосфер. Значит, жидкость несколько не уступает в этом отношении твердым телам; вода имеет ту же прочность на разрыв, что и стальная проволока. Наше представление о легкости, с какой жидкости разделяются на части, несколько не противоречит сказанному. Наблюдая разделение жидкости на части, мы видим лишь поверхностное переливание, но не внутренний разрыв. «Тот факт,— говорит Эдзер в «Общей физике»,— что такое переливание жидкости происходит легко, не опровергает существования сцепления между ее частями, подобно тому как легкость, с какой можно разорвать надрезанную с края бумажную полоску, не противоречит прочности такой же ненадрезанной полоски при равномерном ее растягивании».

<sup>\*\*)</sup> Здесь у читателя легко может возникнуть ложное представление, на которое обратил мое внимание иллюстратор книги. А именно: может появиться мысль, что так как над нижним сосудом (см. рис. 98) стоит более длинный столб масла, чем над верхним, то ртуть должна вытесняться из нижнего сосуда в верхний. При этом упускается из виду, что кроме масла на ртуть давит—в противоположном направлении—также и ртуть, находящаяся в соединительной трубке; это давление для нижнего сосуда значительно, чем для верхнего.

В конечном счете приходится сравнивать разность давлений обоих столбов масла с разностью давлений обоих столбов ртути. Разность высот столбов, как легко сообразить, для обеих жидкостей одинакова, но так как ртуть гораздо тяжелее масла, то решающее значение имеет давление ртути. (Заменив мысленно масло воздухом, получаем обычное объяснение действия сифона.)

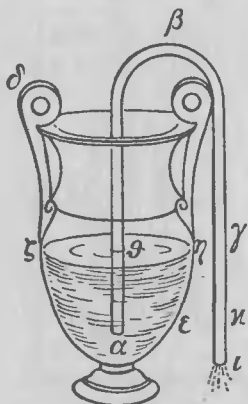


Рис. 99. Изображение сифона из сочинения Герона Александрийского (в. 97).

уровня воды, то вода из сифона вытекает, так как вода в участке  $\kappa\beta$  (рис. 99) более тяжелая, нежели на участке  $\beta\eta$ , перевешивает и перетягивает».

**98.** Переливать газы сифоном возможно. В этом случае участие атмосферного давления является уже условием необходимым, так как газы лишены внутреннего сцепления. Газы, более тяжелые, чем воздух,—например углекислый—переливаются сифоновой трубкой совершенно так же, как и жидкости, если один сосуд с углекислотой помещен выше другого. Но можно переливать сифоном и воздух при следующей, например, обстановке (рис. 100).

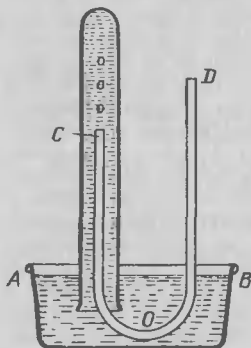


Рис. 100. Сифон для переливания воздуха (в. 98).

Короткое колено сифона вводят в широкую пробирку, наполненную водой и опрокинутую над сосудом с водой так, что отверстие лежит ниже ее уровня. Чтобы при введении сифона в пробирку в него не проникла вода, другой конец  $D$  сифона плотно закрывают пальцем. Открыв потом отверстие  $D$ , мы увидим пузыри воздуха, проникающего через сифон в пробирку: сифон для воздуха начнет работать.

Для объяснения, почему он переливает наружный воздух внутрь, обратим внимание на то, что на жидкость у *C* давит снизу полная атмосфера; сверху же вниз давит атмосфера минус вес столба воды между уровнями *C* и *AB*. Избыток давления и гонит наружный воздух внутрь пробирки.

**99.** В большинстве учебников утверждается, что вода может быть поднята всасывающим насосом на высоту не выше 10,3 м над ее уровнем вне насоса. Мало где отмечается при этом, что высота 10,3 м—чисто теоретическая, на практике не осуществимая. Не говоря уже о том, что через скважины между поршнем и стенками трубы неизбежно проникает воздух, надо считаться еще с тем, что при обычных условиях в воде растворен воздух (в количестве 2% ее объема—см. ответ на вопрос 88). Выделяясь при работе насоса в разрежаемое пространство под поршнем, воздух этот своим давлением препятствует подъему воды на теоретические 10,3 м и понижает высоту поднятия на 3 м: выше 7 м вода в колодезных насосах не поднимается.

Примерно та же предельная высота (7 м) существует на практике и для сифона, когда им пользуются при проведении воды поверх плотин или через холмы.

**100.** Может казаться, что газ, сжатый вчетверо сильнее, должен вытекать заметно быстрее. Между тем оказывается, что скорость его истечения в пустоту почти не зависит от давления, под которым он находится. Сильно сжатый газ вытекает с такой же скоростью, как и сжатый слабо.

Этот физический парадокс объясняется тем, что в случае сжатого газа имеется большой напор, но и плотность газа, увлекаемого этим напором в движение, также больше, и притом в такой же пропорции (закон Мариотта). Другими словами, масса газа, приводимого в движение, возрастает с повышением давления во столько же раз, во сколько раз увеличивается движущая сила.

А известно, что ускорение, приобретаемое телом, прямо пропорционально силе и обратно пропорционально массе. Поэтому ускорение (и обусловленная им скорость) вытекания газа не должно зависеть от его давления.

**101.** Предположение, что работа накачивания воды всасывающим насосом не зависит от высоты ее поднятия, ошибочно. Работа накачивания действительно состоит в одном лишь разрежении воздуха под поршнем, но разрежение требует различной затраты энергии в зависимости от того, какой высоты столб воды поднимается насосом.

Сопоставим работу одного хода поршня при подъеме воды на 7 м и на 1 м.

В первом случае на поршень давит сверху целая атмосфера, т. е. вес 10 м водяного столба (круглым числом). Снизу поршень подпирается атмосферным давлением (10 м водяного столба), уменьшенным на вес 7 м водяного столба и на упругость скопляющегося под поршнем воздуха (который выделяется из раствора в воде); упругость эта, очевидно, отвечает 3 м водяного столба, так как 7-метровая высота поднятия воды — предельная. Значит, при качании надо преодолевать давление водяного столба высотой

$$10 - (10 - 7 - 3) = 10 \text{ м,}$$

т. е. полное атмосферное давление.

Во втором случае, при подъеме воды на 1 м, давление на поршень сверху по-прежнему равно атмосферному: снизу же давление на поршень равно

$$10 - 1 - 3 = 6 \text{ м.}$$

Приходится преодолевать давление водяного столба в  $10 - 6 = 4$  м. Так как длина хода поршня в обоих случаях одинакова, то работа поднятия воды на 7 м больше работы поднятия на 1 м в

$$10 : 4 = 2,5 \text{ раза.}$$

Таким образом, заманчивые виды на устройство дарового двигателя рассеиваются.

**102.** Пожарный насос не может засасывать кипящую воду, так как под поршнем вместо разреженного воздуха будет находиться пар упругостью в 1 ат.

**103.** Повышение ртутного столба в манометре указывает, конечно, на то, что давление газа в резервуаре увеличилось. Нетрудно понять, почему именно оно возросло. Когда кран открыли, воздух в резервуаре вследствие быстрого разрежения охла-

дился ниже температуры окружающей среды. Когда же, спустя некоторое время, температура газа вновь повысилась, то возросло и его давление (по закону Гей-Люссака).

**104.** Пузырек воздуха на глубине 8000 м должен находиться под давлением около 800 ат, потому что каждые 10 м водяного столба приблизительно соответствуют (по весу) одной атмосфере. Закон Мариотта гласит, что плотность газа прямо пропорциональна давлению. Применяя этот закон к данному случаю, можно заключить, что плотность воздуха под давлением 800 ат должна быть в 800 раз больше, нежели под нормальным давлением. Окружающий нас воздух в 770 раз менее плотен, чем вода. Значит, воздух в пузырьке на дне океана должен быть плотнее воды и, следовательно, не может всплыть на поверхность.

Однако вывод наш основан на неправильном допущении, что закон Мариотта применим к таким высоким давлениям, как 800 ат. Уже под давлением 200 ат воздух сжимается не в 200, а только в 190 раз, под давлением 400 ат—сжимается в 315 раз. Чем значительнее давление, тем отступление от закона Мариотта больше. При 600 ат воздух сжимается в 387 раз. Под давлением выше 1500 ат воздух сжимается в 510 раз и при дальнейшем увеличении давления сжимается столь же незначительно, как и жидкость. Например, при давлении в 2000 ат плотность воздуха возрастает по сравнению с нормальной всего лишь в 584 раза, примерно до  $\frac{3}{4}$  плотности воды\*).

Мы видим, следовательно, что на дне самого глубокого океана пузырек воздуха не может приобрести плотность воды. Как бы глубоко под водой ни находился воздушный пузырек—хотя бы на глубине 13,5 км (наибольшая глубина океана близ Антильских островов),—он должен непременно всплыть на поверхность.

**105.** Кто думает, что Сегнерово колесо вращается вследствие отталкивания его водяных струй от воздуха, тот, естественно, должен быть убежден,

---

\*) Как показали опыты самого последнего времени, воздух приобретает плотность, большую плотности воды, лишь под давлением 5000 ат. Это отвечает глубине погружения в 50 км!

что в пустоте оно вращаться не будет. Но вращение Сегнерова колеса происходит вовсе не по такой причине. Сила, толкающая трубки прибора, действует не вне его, а внутри: это — разность давления воды на открытую и закрытую части трубки. Избыток давления нисколько не зависит от того, находится ли прибор в пустоте или в воздухе. Поэтому в пустоте Сегнерово колесо должно вращаться не только не хуже, чем в воздухе, но из-за отсутствия сопротивления среды — лучше.

Подобный опыт в видоизмененной форме (пистолет под колоколом воздушного насоса при выстреле приводит во вращение силою отдачи маленькую карусель) был успешно выполнен американским физиком проф. Г. Годдардом.

По той же причине должна лететь в пустоте и ракета, движимая силою отдачи, а вовсе не путем отталкивания вытекающих из нее газов от окружающего воздуха, как думали в старину (и продолжает сейчас еще думать много людей, даже среди инженеров, у нас и за рубежом).

**106.** Кубический метр влажного воздуха есть смесь кубометра сухого воздуха с кубометром водяного пара. Может показаться поэтому, что кубометр влажного воздуха должен быть тяжелее кубометра сухого воздуха — именно на вес заключенного в нем пара. Такое заключение, однако, ошибочно: влажный воздух, напротив, оказывается легче сухого.

Причина кроется в том, что давление каждой составной части газовой смеси меньше ее общего давления (которое и для сухого и для влажного воздуха одинаково); при уменьшении же давления уменьшается и вес единицы объема газа.

Разъясним подробнее. Обозначим давление пара во влажном воздухе через  $f$  атмосфер ( $f < 1$ ). Давление сухого воздуха в кубометре смеси выразится через  $1 - f$ . Если вес кубометра пара при рассматриваемой температуре и атмосферном давлении обозначить через  $r$ , а вес кубометра сухого воздуха — через  $q$ , то при давлении  $f$  атмосфер

$1 \text{ м}^3$  пара весит  $fr$ ,

$1 \text{ м}^3$  воздуха весит  $(1 - f)q$ .

Общий вес кубометра смеси равен

$$fr + (1 - f)q.$$



Легко убедиться, что если  $r < q$  (а так в действительности и есть: водяной пар легче воздуха), то

$$fr + (1-f)q < q,$$

т. е. кубометр смеси воздуха с паром легче кубометра сухого воздуха. Действительно, раз  $r < q$ , то верны следующие неравенства:

$$\begin{aligned} fr &< fq, & fr + q &< fq + q, \\ fr + q - fq &< q, & fr + (1-f)q &< q. \end{aligned}$$

Итак, при одинаковом давлении и температуре кубометр влажного воздуха не тяжелее, а легче, чем кубометр сухого воздуха.

**107.** Самое высокое разрежение, до какого может быть доведен газ посредством современных воздушных насосов, — одна стомиллиардная атмосферы, т. е.  $10^{-11}$  ат.

В старых, долго работавших пустотных электролампочках устанавливается примерно такая степень разрежения воздуха. Чем дольше работает пустотная лампочка, тем сильнее разрежается в ней воздух: после 250 часов горения — раз в тысячу (вследствие притяжения образующихся ионов стенками и другими частями колбы).

**108.** Кто никогда не пробовал вычислять, сколько молекул воздуха остается в литровом сосуде при разрежении в сто миллиардов раз, тот едва ли сможет хоть приблизительно отгадать это число. Сделаем расчет.

В одном кубическом сантиметре воздуха при давлении в 1 ат содержится молекул (число Лошмидта):

$$27\,000\,000\,000\,000\,000\,000 = 27 \cdot 10^{18}.$$

В одном кубическом дециметре — в 1000 раз больше:  $27 \cdot 10^{21}$ . После разрежения в сто миллиардов ( $10^{11}$ ) раз должно оставаться молекул

$$27 \cdot 10^{21} : 10^{11} = 27 \cdot 10^{10} = 270\,000 \text{ миллионов.}$$

Это в 135 раз больше, чем людей на земном шаре! Надеясь жителей Москвы этими молекулами, мы могли бы каждому выдать почти по сотне тысяч штук...\*)

---

\*) С учетом роста населения каждому жителю Москвы в конце 80-х годов молекул досталось бы меньше! (Примеч. ред.)

Интересен состав молекулярного населения этого так называемого «пустого» сосуда по химическому признаку. Вот он:

200 000 000 000	молекул азота
65 000 000 000	» кислорода
3 000 000 000	» аргона
450 000 000	» углекислого газа
3 000 000	» неона
20 000	» криптона
3 000	» ксенона

Не странно ли, что такое многочисленное и разнообразное скопление молекул мы обозначаем нередко словом «пустота»? Каждому москвичу досталось бы из этой «пустоты» тысяч по 50 молекул азота, тысяч по 15 кислородных молекул, около 700 молекул аргона, сотня молекул углекислого газа, по штуке молекулы неона, и только криптоном и ксеноном пришлось бы наделить всего несколько тысяч граждан.

**109.** Молекулы воздуха, безусловно, подвержены силе тяжести, несмотря на то, что всегда находятся в быстром движении (порядка скорости ружейной пули). Притяжение их Землей уменьшает ту слагающую их скорости, которая направлена от земной поверхности, и тем самым препятствует молекулам атмосферы удалиться в мировое пространство.

На вопрос же, почему молекулы атмосферы не упали все на землю, надо ответить, что они беспрестанно и падают вниз, но — как тела абсолютно упругие — отскакивают от встречных молекул и от земной поверхности и потому оказываются всегда витающими на некоторой высоте над землей.

Высота верхней границы атмосферы определяется скоростью самых быстрых молекул. Хотя средняя скорость молекул земной атмосферы равна примерно 500 м/с, отдельные молекулы могут приобретать в несколько раз большую скорость. Немногочисленные молекулы достигают семикратной скорости (3500 м/с), при которой они взлетают до высоты

$$h = \frac{v^2}{2g} = \frac{3500^2}{2 \cdot 9,8} \approx 600 \text{ (км)}.$$

Этим и объясняется присутствие следов атмосферы на высоте 600 км над земной поверхностью.

**110.** Мы привыкли думать, что газ всегда целиком заполняет предоставленный ему объем. Кажется поэтому совершенно невозможными такие условия, при которых одна часть резервуара занята газом, а другая — пуста. Резервуар, наполовину заполненный газом, является в нашем представлении физическим абсурдом.

Очень легко, однако, придумать условия, когда такое парадоксальное явление должно осуществиться. Вообразите вертикальную трубу, простирающуюся от земной поверхности на 1000 км вверх. Сообщите ее внутреннее пространство с окружающим воздухом. Он займет в трубе нижние 500—700 км, а верхняя часть на протяжении сотен километров будет свободна от газа — безразлично, открыта ли труба или закрыта. Значит, газ не всегда улетучивается из открытого сосуда, граничащего с пустотой.

С небольшим количеством газа, в особенности газа тяжелого и при весьма низкой температуре, можно было бы получить то же явление в сосуде значительно меньшей высоты, например в несколько десятков метров.

## IV. ТЕПЛОВЫЕ ЯВЛЕНИЯ

---

### ВОПРОСЫ

**111. Происхождение шкалы Реомюра.** Почему на шкале Реомюра точка кипения воды обозначена числом 80?

**112. Происхождение шкалы Фаренгейта.** Почему на шкале Фаренгейта точка кипения воды обозначена числом 212?

**113. Длина делений на шкале термометра.** Одинаковы ли градусные деления на шкале ртутного термометра? А на шкале спиртового?

**114. Термометр для температур до  $750^{\circ}\text{C}$ .** Можно ли устроить ртутный термометр для температуры до  $750^{\circ}\text{C}$ ?

**115. Градусы термометра.** В брошюре Карпентера «Современная наука», переведенной на русский язык Л. Н. Толстым и упоминавшейся ранее (в. 53), имеется следующий довод против правильности устройства наших термометров:

«Градус не есть одно и то же в начале и в конце лестницы температуры. Уже одно то, что градусы термометра суть равные пространственные деления, доказывает, что отношения их ко всему объему жидкости, расширяющейся от одного конца трубки до другого, не может оставаться постоянным».

Карпентер желает сказать, что если, например, длина деления, соответствующая одному градусу, равна 1 мм, то миллиметровый цилиндр ртути при  $0^{\circ}\text{C}$  составляет более крупную долю объема всей ртути, чем такой же цилиндр при  $100^{\circ}\text{C}$ , когда общий объем ртути увеличивается. Значит, заключает критик, нельзя считать соответствующие интервалы температуры равными.

Справедлив ли этот упрек и подрывает ли он доверие к измерению температуры с помощью термометров с жидкостями и газами?

**116. Тепловое расширение железобетона.** Почему в железобетоне при нагревании и охлаждении бетон не отделяется от железа?

**117. Наибольшее тепловое расширение.** Укажите твердое тело, расширяющееся от теплоты сильнее, чем жидкости.

Укажите жидкость, расширяющуюся от теплоты сильнее, чем газы.

**118. Наименьшее тепловое расширение.** Какое вещество всего менее расширяется при нагревании?

**119. Аномалия теплового расширения.** Какое твердое тело при нагревании сжимается, а при охлаждении расширяется?

**120. Дырочка в железном листе.** Посреди квадратного железного листа шириной в 1 м имеется дырочка диаметром 0,1 мм (толщина волоса).

При каком изменении температуры отверстие закроется?

**121. Сила теплового расширения.** Можно ли механической силой помешать тепловому расширению металлического бруса или ртутного столба?

**122. Нагревание плотничьего уровня.** Длина пузырька в трубке плотничьего уровня меняется при колебаниях температуры.

Когда же пузырек больше: в теплую или в холодную погоду?

**123. Течения в воздухе.** Следующий отрывок, относящийся к условиям смены воздуха в отапливаемом помещении, взят из технического журнала:

«В наиболее плохих условиях возобновления воздуха находятся помещения с центральным отоплением. В них при нагревании происходит лишь циркуляция воздуха вверх и вниз. Поэтому в таких помещениях необходимо на продолжительное время открывать форточки или же устраивать вентиляторы.

Всякое вентиляционное отверстие (в жилом помещении) создает обмен воздуха. Испорченный, более теплый воздух втягивается в отдушину, а так как место его должно быть заполнено, снаружи во все щели дверей, окон и даже самих стен устремляется свежий воздух. При топке с открытой дверцей получается хорошая вентиляция. Для горения дров нужен кислород воздуха, который с большой силой и засасывается из комнаты в печь. Продукты горения поступают не обратно в комнату, а улетают в трубу. На освобождающееся

внутри комнаты место должен притечь снаружи свежий воздух».

Правильно ли описаны в этом отрывке воздушные течения?

**124. Теплопроводность дерева и снега.** Что защищает от холода лучше: деревянная стена или слой снега такой же толщины?

**125. Медная и чугунная посуда.** В какой посуде пища подгорает легче: в медной или в чугунной?

Почему?

**126. Замазывание рам на зиму.** При замазывании оконных рам на зиму маляры советуют оставлять верхнюю щель наружной рамы незамазанной.

Укажите физическое основание этого совета.

**127. В натопленной комнате.** Теплота способна переходить только от тела с более высокой температурой к телу, менее нагретому. Температура нашего тела выше температуры воздуха в натопленной комнате.

Почему же нам в такой комнате тепло?

**128. Вода на дне реки.** Когда вода теплее на дне глубокой реки: летом или зимою?

**129. Замерзание рек.** Почему быстрые реки еще не замерзают на морозе в несколько градусов?

**130. Температура атмосферы.** Почему атмосфераверху холоднее, чем внизу?

**131. Скорость нагревания.** Что требует больше времени: нагревание воды на примусе от  $10$  до  $20^{\circ}\text{C}$  или от  $90$  до  $100^{\circ}\text{C}$ ?

**132. Температура пламени свечи.** Какова приблизительно температура пламени стеариновой свечи?

**133. Гвозди и пламя.** Почему гвозди не плавятся в пламени свечи?

**134. Что такое калория?** Почему в точном определении калории имеется указание, что нагревание  $1\text{ г}$  или  $1\text{ кг}$  воды должно производиться от  $14,5$  до  $15,5^{\circ}\text{C}$ ?

**135. Нагревание воды в трех состояниях.** Что легче нагреть на одинаковое число градусов: килограмм жидкой воды, килограмм льда или килограмм водяного пара?

**136. Нагревание  $1\text{ см}^3$  меди.** Сколько требуется тепла для нагревания на  $1^{\circ}\text{C}$  одного кубического сантиметра меди (удельная теплоемкость  $\approx 0,1$ )?

**137. Тела наибольшей теплоемкости.**

а) Какое твердое тело требует наибольшего количества тепла для своего нагревания?

б) Какая жидкость требует наибольшего количества тепла для своего нагревания?

в) Какое вещество требует наибольшего количества тепла для своего нагревания?

**138. Теплоемкость пищи.** В практике холодильного дела требуется знание удельной теплоемкости пищевых продуктов. Известны ли Вам теплоемкости мяса, яиц, рыбы, молока?

**139. Самый легкоплавкий металл.** Какой из металлов, твердых при обычной температуре, самый легкоплавкий?

**140. Самый тугоплавкий металл.** Назовите самый тугоплавкий металл.

**141. Нагревание стали.** Почему рушатся при пожаре стальные конструкции, хотя сталь не горит и в огне пожара — не плавится?

**142. Бутылка воды во льду.**

а) Можно ли закупоренную бутылку, наполненную водой, опустить в тающий лед без опасения за целостность бутылки?

б) Одна бутылка с водой положена в лед при  $0^{\circ}\text{C}$ , другая — в воду также при  $0^{\circ}\text{C}$ . В какой бутылке вода замерзнет раньше?

**143. Лед в воде.** Может ли лед в чистой воде тонуть?

**144. Замерзание воды в трубах.** В трубах подземных частей зданий вода часто замерзает не в мороз, а в оттепель.

Чем это объяснить?

**145. Скользкость льда.** Скользкость льда объясняют понижением точки таяния льда при повышении давления. Известно, что для понижения точки таяния льда на один градус требуется давление в 130 ат. Поэтому, чтобы кататься на коньках при морозе, например, в  $5^{\circ}\text{C}$ , конькобежец должен оказывать на лед давление  $5 \cdot 130 = 650$  ат. Однако поверхность, по которой лезвие конька соприкасается со льдом, не менее нескольких квадратных сантиметров, так что на  $1\text{ см}^2$  приходится не более 10—20 кг массы конькобежца. Следовательно, давление конькобежца на лед во много раз меньше того, какое необходимо для понижения точки таяния льда на 5 градусов.

Как же объяснить возможность кататься на коньках при морозе  $-5^{\circ}\text{C}$  и ниже?

**146. Понижение точки таяния льда.** До какой температуры можно понизить точку плавления льда сильным давлением?

**147. «Сухой лед».** Известно ли Вам, что такое «сухой лед»?

**148. Цвет водяного пара.** Какого цвета водяной пар?

**149. Кипение воды.** Какая вода — сырая или кипячая — закипает при одинаковых условиях раньше?

**150. Нагревание паром.** Можно ли довести воду до кипения, подогревая ее 100-градусным паром?

**151. Кипящий чайник на ладони.** Снятый с огня металлический чайник с кипятком можно, говорят, безбоязненно поставить на ладонь: ожога не будет, хотя вода бурлит от кипения (рис. 101). Жар начинает ощущаться, лишь если подержать так чайник несколько секунд. (Я не проделывал этого опыта, но мои ученики-рабочие отважились проверить его на себе и убедились, что он удастся.)

Чем объяснить это явление?

**152. Жарение и варка.** Почему жареное вкуснее вареного?

**153. Горячее яйцо в руке.** Почему не обжигает рук вынутое из кипятка яйцо (рис. 102)?

**154. Ветер и термометр.** Как влияет ветер на термометр в морозный день?

**155. Принцип холодной стены.** Русский переводчик иностранного сочинения по астрономии встретил в тексте ссылку на «физический принцип холодной стены». В учебниках и курсах физики он не нашел упоминания о таком принципе. Знаете ли Вы, в чем он состоит?

**156. Калорийность дров.** Что дает при сгорании больше тепла: килограмм березовых дров или килограмм столь же сухих осиновых?



Рис. 101. Опыт менее опасный, чем кажется (в. 151).

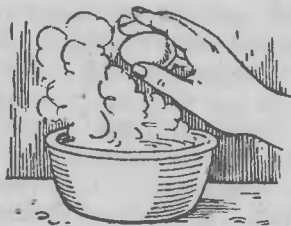


Рис. 102. Яйцо, вынутое из кипятка, не обжигает рук (в. 153).



**157. Калорийность пороха и керосина.** Что больше: удельная теплота сгорания пороха или керосина?

**158. Мощность горячей спички.** Какова мощность горящей спички?

**159. Выведение пятен утюгом.** На чем основано выведение жирных пятен с тканей утюгом?

**160. Растворимость поваренной соли.** В какой воде можно больше растворить поваренной соли: в 40-градусной или в 70-градусной?

## ОТВЕТЫ НА ВОПРОСЫ 111—160

**111.** Первоначальный термометр Реомюра был мало похож на нынешний. Он, прежде всего, был не ртутный, а спиртовой. При градуировании его шкалы Реомюр опирался только на одну постоянную точку, а именно — на температуру таяния льда, которая обозначена была числом 1000. Спирт подобран был такой крепости, что коэффициент его теплового расширения равнялся 0,0008. Увеличение объема спирта в термометре на 0,001 долю определяло длину деления, соответствующую одному градусу. При таком счете точка кипения воды должна иметь обозначение на 80 градусов выше точки таяния льда, а именно 1080 градусов. Впоследствии точка таяния льда была обозначена 0, и тогда точка кипения воды получила свое современное обозначение: 80.

**112.** Зима 1709 г. отличалась в Западной Европе исключительной суровостью. Таких сильных и продолжительных морозов не было там уже целое столетие. Естественно, что проживавший в городе Данциге физик Фаренгейт, намечая для изобретенного им термометра постоянные точки, принял тогда за нуль температуры ту степень холода, ниже которой морозы в его городе зимой 1709 г. не достигали. Это был холод, полученный с помощью охлаждающей смеси из льда, поваренной соли и нашатыря.

Для другой постоянной точки термометра Фаренгейт, по примеру ряда своих предшественников (в том числе и Ньютона), избрал нормальную температуру человеческого тела. В ту эпоху распространено было убеждение, будто температура воздуха никогда не поднимается выше температуры крови человека, и такое

нагревание воздуха считалось для человека смертельным (мнение — совершенно ошибочное).

Эту вторую постоянную точку Фаренгейт отметил первоначально числом 24, число градусов равнялось числу часов в сутках. Но когда практика показала, что такие градусы слишком крупны, Фаренгейт подразделил их на четверти и температура человеческого тела оказалась обозначенной числом  $24 \cdot 4 = 96$ . Этим определилась окончательно длина деления, соответствующая одному градусу. Откладывая градусы по шкале снизу вверх, ученый получил для температуры кипения воды 212 градусов.

Чем объяснить, что Фаренгейт не взял температуру кипения воды в качестве второй постоянной точки своего термометра? Он воздержался от этого потому, что ему известна была изменчивость этой температуры (в зависимости от давления воздуха). Температура человеческого тела казалась ему более надежной в смысле постоянства. Любопытно отметить, между прочим, что, как нетрудно вычислить, нормальная температура нашего тела считалась в ту эпоху на целый градус ниже, чем теперь ( $35,5^\circ \text{C}$ ).

**113.** Длина градусных делений шкалы термометра определяется, конечно, величиной коэффициента теплового расширения той жидкости, которая его наполняет. Известно, что с повышением температуры коэффициент теплового расширения всех жидкостей растет. Чем ближе к точке кипения, тем этот рост значительнее.

После сказанного мы легко поймем различие между шкалами ртутного и спиртового термометров в отношении длины их градусных делений. Термометры ртутные обычно предназначаются для температур, довольно далеких еще от точки кипения ртути ( $357^\circ \text{C}$ ). В интервале  $0—100^\circ \text{C}$  коэффициент расширения ртути возрастает незначительно, а так как вместимость стеклянной трубки термометра также увеличивается с температурой, то неравномерность видимого расширения ртути в указанном температурном промежутке незаметна. Поэтому градусные деления на шкале ртутного термометра почти одинаковы.

Напротив, спирт применяется в термометре при температурах, близких к точке кипения этой жидкости ( $78^\circ \text{C}$ ). Поэтому увеличение коэффициента расширения

спирта с температурой весьма заметно. Если объем спирта при  $0^{\circ}\text{C}$  принять за 100, то объем его при  $30^{\circ}\text{C}$  равен 103, а при  $78^{\circ}\text{C}$ —110.

Ясно, что градусные деления на шкале спиртового термометра должны увеличиваться от нуля вверх.

**114.** Так как температура кипения ртути  $357^{\circ}\text{C}$  и стекло размягчается уже при  $500$ — $600^{\circ}\text{C}$ , то получается, что устроить ртутный термометр для температур до  $750^{\circ}\text{C}$  невозможно. Между тем такие термометры изготавливаются. Трубка их делается из кварцевого стекла, весьма тугоплавкого (плавится при  $1625^{\circ}\text{C}$ ), а в канале под ртутью имеется азот. При повышении температуры ртутная колонка сжимает газ и, следовательно, ртуть нагревается под повышенным давлением (50—100 ат). Точка кипения от этого повышается и ртуть остается жидкой при температуре до  $750^{\circ}\text{C}$ . Эти термометры, впрочем, очень дороги.

**115.** Карпентер (а с ним и Л. Н. Толстой, разделявший его мнение) оспаривает в сущности следующее положение, на котором основано устройство шкалы наших термометров:

«Равные интервалы температуры соответствуют абсолютно равным приращениям объема термометрического вещества».

Отвергая это положение, критик предлагает заменить его следующим, по его мнению, единственно правильным:

«Равные интервалы температуры соответствуют относительно равным приращениям объема термометрического вещества».

Однако спорить о том, какое из этих двух положений правильное, все равно, что спорить о том, чем правильнее мерить длину—метрами или футами. Оба положения—условные допущения, и речь может идти только о том, какое из них целесообразнее, т. е. вносит большую простоту в учение о теплоте.

Положение Карпентера было уже однажды выдвинуто в науке не кем иным, как знаменитым Дальтоном, и носит название «шкалы Дальтона». На этой шкале, если бы она была принята, не могло бы, между прочим, существовать точки абсолютного нуля; вообще все учение о теплоте претерпело бы значительные

изменения. Это преобразование не упростило бы, а, напротив, крайне усложнило бы выражение законов природы. Поэтому шкала Дальтона, которую Карпентер с Толстым невольно пытались возродить, была в свое время отвергнута.

**116.** Коэффициент теплового расширения бетона (0,000012) совпадает с коэффициентом расширения железа; при изменениях температуры они расширяются согласно и потому не отделяются друг от друга.

**117.** Из твердых тел сильнее всех расширяется воск, превышая в этом отношении многие жидкости. Коэффициент теплового расширения воска, в зависимости от сорта,—от 0,0003 до 0,0015, т. е. в 25—120 раз больше, чем железа. Так как коэффициент (объемного) расширения ртути 0,00018, а керосина 0,001, то воск расширяется, безусловно, сильнее ртути, а в некоторых сортах—сильнее даже керосина.

Из жидкостей сильнее других расширяется эфир с коэффициентом 0,0016. Но это не рекордное расширение: существует жидкость, расширяющаяся в 9 раз сильнее эфира,—жидкая углекислота ( $\text{CO}_2$ ) при  $20^\circ \text{C}$ . Ее коэффициент расширения равен 0,015—в 4 раза больше, чем у газов. Коэффициент расширения жидкостей вообще быстро растет с приближением к критической температуре, превосходя во многих случаях коэффициент расширения газов.

**118.** Наименьшим коэффициентом теплового расширения обладает кварцевое стекло: 0,0000003—в 40 раз меньше, чем железо. Кварцевую колбу, накалившую до  $1000^\circ \text{C}$  (кварцевое стекло плавится при  $1625^\circ \text{C}$ ), можно смело опускать в ледяную воду, не опасаясь за целостность сосуда: колба не лопается. Малым коэффициентом расширения—хотя и большим, чем у кварцевого стекла,—отличается также алмаз: 0,0000008.

Из металлов наименьшим коэффициентом теплового расширения обладает сорт стали, носящий название инвар (от латинского слова, означающего «неизменный»). Это—сталь, содержащая 36% никеля, 0,4% углерода и столько же марганца. Коэффициент расширения инвара 0,0000009, а некоторых сортов

0,00000015, т. е. в 80 раз меньше, чем обыкновенной стали. Есть даже такие сорта инвара, которые в определенном температурном промежутке вовсе не расширяются.

Благодаря ничтожному расширению инвар с успехом применяется при изготовлении частей точных механизмов (часовых маятников), а также мер длины.

**119.** На вопрос, какое тело от охлаждения расширяется, не вдумавшись, отвечают: лед,—забывая, что аномальным расширением вода отличается только в жидком состоянии. Лед при охлаждении не расширяется, а—как и большинство тел природы—сжимается.

Существуют, однако, другие твердые тела, которые при охлаждении ниже определенной температуры расширяются. Это, прежде всего, алмаз, закись меди и смарагд. Алмаз начинает расширяться при довольно значительном холоде, именно при  $-42^{\circ}\text{C}$ , закись же меди и смарагд обнаруживают ту же особенность при умеренном морозе, около  $-4^{\circ}\text{C}$ . Значит, при  $-42$  и  $-4^{\circ}\text{C}$  названные тела обладают наибольшей плотностью, как вода при  $+4^{\circ}\text{C}$ .

Кристаллическое йодистое серебро (минерал йодирит) расширяется от охлаждения при обычных температурах. Той же особенностью отличается и резиновый стержень, растягиваемый грузом: при нагревании он укорачивается.

**120.** Неправильно полагать, что если лист достаточно нагреть, то дырочка закроется вследствие теплового расширения. Никакое нагревание не может дать такого результата, потому что отверстия при нагревании тел вовсе не уменьшаются, а, напротив, увеличиваются. Это ясно из следующего рассуждения.

Если бы дырочки не было, то заполняющее ее вещество при нагревании тела расширялось бы в такой же мере, как и окружающий материал: иначе образовались бы либо складки, либо зазор; между тем известно, что при тепловом расширении однородного тела никаких складок или скважин в нем не возникает. Отсюда ясно, что лист с дырочкой расширяется так, словно бы дырочка была заполнена железом: иначе говоря, при нагревании дыра увеличивается, как равный

ей участок железного листа. Поэтому вместимость сосудов, просветы труб, всякого рода полости в телах при нагревании увеличиваются (а при охлаждении — уменьшаются); коэффициент этого расширения такой же, как и окружающего вещества.

Итак, добиться закрытия дырочки нагреванием невозможно, дырочка сделается еще больше. Не достигнута ли будет цель путем охлаждения? Можно ли настолько охладить железный лист, чтобы дырочка в нем исчезла?

Так как коэффициент расширения железа 0,000012, а наибольшее охлаждение равно  $-273^{\circ}\text{C}$ , то ясно, что дырочка не может уменьшить диаметр своего просвета более чем на  $0,000012 \cdot 273$ , т. е. примерно на 0,003. Значит, никаким изменением температуры нельзя достичь того, чтобы отверстие в твердом теле, даже самое маленькое, закрылось.

**121.** Тепловое расширение и сжатие происходят, как известно, с весьма значительной силой. В опыте, придуманном Тиндалем и воспроизводимом в школьных физических кабинетах, железный брусок, сжимаясь при охлаждении, переламывает железный же стержень в палец толщиной. Популярен также рассказ о выпрямлении покосившейся каменной стены здания Консерватории искусств и ремесел в Париже при Наполеоне I — рассказ, входивший прежде в школьные хрестоматии в упрощенной передаче Льва Толстого<sup>\*)</sup>. У многих сложилось поэтому убеждение, что противостоять силе теплового расширения вообще ничто не может: препятствовать расширению нагреваемого стержня или жидкости кажется невозможным.

---

<sup>\*)</sup> Приводим этот рассказ из «Первой книги для чтения» Л. Н. Толстого:

«Как в городе Париже починили дом (быль). В одном большом доме разошлись врозь стены. Стали думать, как их свести так, чтобы не ломать крыши. Один человек придумал. Он вделал с обеих сторон в стены железные ушки, потом сделал железную полосу такую, чтоб она на вершок не хватала от ушка до ушка. Потом загнул на ней крюки по концам так, чтобы крюки входили в ушки. Потом разогрел полосу на огне; она раздалась и достала от ушка до ушка. Тогда он задел крюки за ушки и оставил ее так. Полоса стала остывать и сжиматься и стянула стены».

Подлинный способ выпрямления стены в этой передаче сильно искажен. Как происходило дело в действительности, описано в моей книге «Физика на каждом шагу».

Это представление ошибочно: как ни велики молекулярные силы, порождающие тепловое расширение, как ни могущественны «замаскированные титаны» — молекулы (выражение Тиндаля), сила их вовсе не безгранична. Нетрудно рассчитать, например, с какой силой надо сжимать железный стержень в  $1 \text{ см}^2$  поперечного сечения, чтобы помешать ему удлиняться при нагревании от  $0$  до  $20^\circ \text{C}$ . Для этого достаточно знать температурный коэффициент линейного расширения материала (железа —  $0,000012^\circ \text{C}^{-1}$ ) и меру его сопротивления механическому растяжению, так называемый модуль упругости, или модуль Юнга (для железа —  $20\,000\,000 \text{ Н/см}^2$ ; это значит, что под действием силы в  $10 \text{ Н}$  на квадратный сантиметр железный стержень растягивается на  $1/2\,000\,000$  своей длины, а при сжатии с указанной силой — на столько же укорачивается).

Вот расчет. Надо препятствовать удлинению железного стержня сечением  $1 \text{ см}^2$  на

$$0,000012 \cdot 20 = 0,00025$$

его длины. Чтобы укоротить такой стержень на  $1/2\,000\,000$  его длины механической силой, требующей сжимающее усилие в  $10 \text{ Н}$ . Следовательно, для укорочения на  $0,00024$  длины понадобится усилие в

$$0,00024 : (1/2\,000\,000) = 4800 \text{ Н}.$$

Значит, если к концам нашего стержня приложить силы примерно в  $5000 \text{ Н}$ , то при нагревании от  $0$  до  $20^\circ \text{C}$  он не удлинится. Это же число ( $5000 \text{ Н}$ ) является и мерилom силы, с какой расширяется стержень при указанном нагревании.

Так же можно рассчитать давление, необходимое для того, чтобы помешать столбику ртути в трубке термометра удлиняться при нагревании. Возьмем тот же температурный промежуток — от  $0$  до  $20^\circ \text{C}$ . Коэффициент расширения ртути  $0,00018$ ; сжимаемость ее под давлением такова, что  $1 \text{ ат}$  сокращает ее объем, на  $0,000003$  первоначальной величины. В нашем случае необходимо помешать ртути расширяться на долю

$$0,00018 \cdot 20 = 0,0036.$$

Значит, чтобы препятствовать такому расширению, потребуется давление, равное

$$0,0036 : 0,000003 = 1200 \text{ ат}.$$

Это показывает, между прочим, что практикуемое иногда заполнение канала термометра азотом, сжатым под давлением 50—100 ат (см. в 114), не может оказывать на расширение столбика ртути сколько-нибудь заметного влияния.

**122.** На вопрос задачи нередко отвечают, что пузырек уровня в теплую погоду больше, чем в холодную, так как заключенный в нем газ под действием тепла расширяется. Забывают, однако, что в данных условиях газ не может расширяться: этому препятствует замкнутая в трубке жидкость. Нагреваются все части уровня: твердая оправа, стеклянная трубка, жидкость, газ в пузырьке. Расширение оправы и трубки весьма незначительно; расширение жидкости больше расширения трубки и потому должно сжимать пузырек.

Итак, пузырек уровня в теплую погоду меньше, чем в холодную.

**123.** Отрывок написан так, как писали более трехсот лет назад, когда о давлении атмосферы никто еще не подозревал и распространено было, наряду с учением о «боязни пустоты», также разделение тел природы на тяжелые, которые падают вниз, и легкие, всплывающие вверх. Нельзя представлять себе дело так, что теплый воздух вытягивается в отдушину, а для заполнения опорожненного места устремляется снаружи свежий воздух. Теплый воздух не поднимается вверх сам по себе,—он вытесняется вверх опускающимся холодным воздухом. Причина и следствие в цитированном отрывке переставлены.

Еще Торричелли, положивший знаменитым опытом конец принципу болезни пустоты, остроумно высмеял теорию о стремлении легких тел подниматься вверх. В одном из своих «Академических чтений» он писал:

«Однажды nereиды (морские нимфы) задумали составить курс физики. В самой глубине океана открыли они свою академию и стали излагать основы физики, как делаем в наших школах мы, обитатели океана воздушного. Любопытные nereиды заметили, что из предметов, которыми они пользовались среди воды, одни в воде опускались, другие поднимались вверх. Отсюда они, не задумываясь над тем, что было бы в других средах, заключили, что одни тела, например



земля, камни, металлы,—тяжелы, потому что, находясь в море, опускаются; другие—как воздух, воск, большинство растений,—легки, потому что всплывают на поверхность воды...

Ошибка молодых нимф, которые сочли легкими многие тела, нами причисляемые к тяжелым, вполне простительна. Я представил себе мысленно обширное ртутное море, в котором я родился и вырос. И вот мне пришло на мысль написать трактат о телах тяжелых и легких. Я стал рассуждать так: живя много лет в глубине этого моря, я постоянно убеждаюсь, что все вещества, за исключением золота, надо держать на привязи, чтобы они не всплыли на поверхность. Значит, все вообще тела легки, имеют от природы склонность подниматься вверх, кроме золота, которое одно опускается в ртуть вниз. Совершенно иная была бы физика саламандр (если верно, что они живут в огне); она учила бы, что все тела, не исключая и воздуха, тяжелы».

«В книге Аристотеля дается следующее определение: тяжел тот предмет, природа которого состоит в стремлении вниз; легок тот предмет, природа которого состоит в стремлении вверх. Не кажутся ли такие определения мало отличающимися от тех, какие даны были нереидами и которые согласны с наблюдениями, но не исправлены разумом».

Спустя три века, мы не изжили остатков доторричеллиевых воззрений, потому что упоминание о теплом воздухе, «стремящемся вверх», и о холодном, «заступающем его место», еще и теперь попадают не только в популярных книгах, но и в некоторых учебниках.

**124.** Снег защищает от потери тепла лучше, чем дерево: теплопроводность снега в 2,5 раза меньше. Незначительной теплопроводностью снега обусловлено «греющее» почву действие снега: покрывая землю, он замедляет потерю ею теплоты.

**125.** Теплопроводность чугуна в 7,5 раз больше, чем меди; это значит, что в единицу времени через слой чугуна протекает в 7,5 раз больше теплоты, чем через слой меди такой же толщины при одинаковой разности температур по обе стороны слоя. Отсюда ясно, что в чугунной посуде, поставленной на огонь, пища должна подгорать легче, чем в медной.

**126.** Совет маляров никакого физического основания не имеет и является вредным предрассудком, значительно понижающим пользу замазывания оконных рам. Вставка второй рамы только в том случае уменьшает теплопотери комнаты, если заключенный между рамами слой воздуха совершенно не сообщается ни с комнатным воздухом, ни с наружным. Если же в наружной раме имеется незамазанная щель, то холодный наружный воздух вытесняет собою из междурамного пространства менее холодный воздух, нагревается там и в свою очередь вытесняется новой порцией наружного воздуха. Так как нагревание производится за счет тепла комнатного воздуха, то смена воздуха в междурамном пространстве постепенно охлаждает комнату. Чем лучше замазаны рамы, тем значительнее их теплоизолирующее действие.

**127.** Температура поверхности человеческого тела — от  $29^{\circ}\text{C}$  (ступни ног) до  $35^{\circ}\text{C}$  (лицо). Комнатный же воздух имеет температуру не выше  $20^{\circ}\text{C}$ . Непосредственного перехода теплоты из окружающего воздуха в наше тело поэтому происходить не может. Отчего же нам в натопленной комнате тепло?

Не оттого вовсе, что тело наше получает тепло из воздуха, а оттого, что прилегающий к телу воздух, как плохой проводник тепла, мешает теплу тела уходить из него, т. е. замедляет потерю нашим телом своего тепла. При этом прилегающий слой воздуха нагревается телом и вытесняется вверх более холодным воздухом, который в свою очередь также нагревается, уступает место новой порции воздуха и т. д. Понятно, что воздух теплый должен отнимать от нашего тела при этом процессе меньше теплоты, нежели холодный. Этим и объясняется ощущение теплоты в натопленной комнате.

**128.** Часто пишут и говорят, что на дне глубоких рек круглый год господствует одна и та же температура, именно  $+4^{\circ}\text{C}$ , потому что при указанной температуре вода имеет наибольшую плотность. Для стоячих пресных водоемов, для озер, это верно. Но в реках — вопреки утверждению многих школьных учебников — господствует другое распределение температур.

В речной воде существует не только видимое продольное течение, но и незаметные для глаз

поперечные токи. Вся вода в реке беспрестанно перемешивается, оттого температура ее близ дна такая же, как и на поверхности. «При всех колебаниях атмосферной температуры эти колебания очень быстро проникают до самого дна потока, и точными термометрами не было уловлено разницы в температуре различных слоев воды, даже при значительных глубинах реки.» (Проф. М. А. Великанов «Гидрология суши».)

Правильный ответ на поставленный вопрос поэтому таков: «Близ дна самой глубокой реки вода летом теплее, нежели зимой, на столько же, на сколько летний воздух теплее зимнего».

**129.** Реки запаздывают с замерзанием вовсе не потому, как думают многие, что в них частицы воды находятся в движении. Молекулы воды движутся и тогда, когда вода стоит, движутся со скоростью несколько сотен метров в секунду; прибавка в 1—2 м/с ничего по существу изменить не может. К тому же — и это самое важное — движение воды в реке как продольное, так и вихревое увлекает водные массы, обширные совокупности молекул, и не вносит изменений в движение отдельных молекул относительно друг друга, т. е. не меняет теплового состояния тела.

Впрочем, в ином смысле запаздывание в замерзании рек обусловлено движением воды, но связь здесь не такова, какую ее себе обычно представляют. Быстро текущая вода противостоит замерзанию не оттого, что «мороз бессилен захватить движущиеся частицы», а оттого, что течение перемешивает водную массу реки от поверхности до самого дна, выравнивая температуру во всех ее частях. Охлажденные до нуля поверхностные слои реки тотчас смешиваются с нижележащими, еще не охлажденными слоями, и температура поверхностного слоя снова становится выше нуля. Замерзание может начаться лишь тогда, когда вся вода реки до самого дна охладится до нуля, а на это требуется время — тем большее, чем река глубже.

Перемешивание воды в быстрой реке влияет на ход замерзания еще и в другом отношении. В воде, текущей медленно, кристаллики льда, образовавшиеся на поверхности, не увлекаются поперечными течениями вглубь, а, слипаясь, образуют ледяной покров реки. Напротив, в быстром потоке кристаллики льда постоянно уносятся вглубь, облепляя встречные предметы

и образуя ледяные заторы, которые стесняют течение реки и вызывают разливы. Быстрая Ангара долго не замерзает, несмотря на сильные морозы, зато образует огромные заторы; между тем ее приток Иркут, текущий медленно, замерзает при первых же легких морозах. Иногда подобное различие наблюдается на разных участках одной и той же реки: где уклон велик, течение быстро, там ледостав бывает поздний и бурный; где он мал, течение спокойно, там замерзание наступает рано.

Уместно отметить здесь, что борьба с заторами посредством разрушения ледяных скоплений динамитом не всегда рациональна. Она не только бывает бесполезна, потому что заторы тотчас образуются вновь, но и вредна,—препятствуя образованию сплошного ледяного покрова, т. е. устранению главной причины заторов. Целесообразно, наоборот, принимать меры к тому, чтобы река скорее затянулась льдом на большой площади поверхности (разбрасывание хвороста на реке и т. п.).

**130.** «Нет, быть может, другого вопроса, по поводу которого высказывалось бы столько недоумения, как по вопросу о причине понижения температуры с высотой»,—писал лет сорок назад председатель лондонского метеорологического общества Арчибальд. Слова его можно повторить и сейчас, потому что в наши дни тоже не часто приходится слышать правильное объяснение этого явления.

Обычно при объяснении довольствуются указанием, что атмосфера весьма слабо нагревается лучами Солнца, а получает свое тепло от нагретой земной поверхности путем теплопроводности.

«Земля нагревается главным образом солнечными лучами. Через воздух эти лучи проходят свободно и не нагревают его. Но, падая на поверхность земли, лучи отдают свою теплоту земле. Уже от земли нагревается и воздух, прилегающий к земле. Поэтому понятно, что верхние слои воздуха холоднее, чем нижние».

Такой ответ дал несколько лет назад один из наших научно-популярных журналов на вопрос своего читателя: «Почему вверху большой мороз?»

Однако в точно таких же условиях находится и вода в кастрюле, подогреваемой на примусе: вода получает

теплоту через теплопроводность от нагретого дна посуды, а тем не менее верхние слои имеют ту же температуру, как и нижние. Причина, конечно, в перемешивании нагреваемой снизу жидкости, в так называемой конвекции. Если бы атмосфера была жидкой, то при подогревании снизу она имела бы одинаковую температуру внизу и вверху. В атмосфере газообразной также имеют место течения, обусловленные нагреванием: холодные верхние слои опускаются вниз, вытесняя оттуда теплые,—но все же температура не выравнивается. Почему?

На этот вопрос в некоторых солидных руководствах (например, в учебнике технической физики Лоренца<sup>\*)</sup>) находим следующий ответ, представляющийся весьма правдоподобным. Воздух, поднимаясь вверх, затрачивает для совершения этой работы энергию, которую он заимствует из своего теплового запаса; каждый килограмм воздуха, поднимаясь в восходящем токе на 427 м, должен поэтому терять эквивалентное количество теплоты—в данном случае 1 ккал. Считая удельную теплоемкость воздуха равной около 0,25 ккал/(кг·град), узнаем, что поднятие на 100 м должно сопровождаться изменением температуры на 1° С. Примерно такое понижение и наблюдается в действительности.

Несмотря на удовлетворительное количественное согласие, изложенное сейчас объяснение совершенно ошибочно. Оно основано на грубо неправильном представлении, будто воздух в восходящем потоке совершает такую-то работу. Воздух этот столь же мало совершает работы, сколько и всплывающая в воде пробка. Пробка не охлаждается, поднимаясь со дна озера на его поверхность, не она совершает работу, а над ней совершается работа. Точно так же поднимающийся воздух выносится вверх опускающимся холодным течением, которое и совершает работу его поднятия; работа эта выполняется за счет энергии падения холодной массы воздуха. Да и кроме того, разве охлаждается выстреленная вверх пуля, действительно совершающая работу своего поднятия? Нисколько: уменьшение ее кинетической энергии сопровождается увеличением потенциальной; баланс

---

<sup>\*)</sup> Не следует путать этого автора с его однофамильцем, знаменитым голландским физиком, основателем электронной теории.

энергии соблюдается без превращения механической энергии в тепловую.

Теперь будет понятна ошибочность еще и другого объяснения холода в высоких слоях атмосферы: молекулы восходящего воздушного течения замедляют свое движение по мере поднятия, а ведь уменьшение скорости молекул и есть не что иное, как понижение температуры. Это тоже ошибка, на которой спотыкались даже иные из подлинных исследователей, хотя от нее предостерегал еще Максвелл в своей «Теории теплоты».

«Тяжесть,—писал он,—не оказывает никакого влияния на распределение температуры в столбце воздуха». Не следует упускать из виду, что тяжесть сообщает всем молекулам газа строго одинаковое перемещение, не внося в их взаимное расположение никакого изменения: здесь происходит параллельный перенос всех частиц. Значит, движение одной молекулы относительно другой не меняется под действием тяжести, как не меняется оно при переносе сосуда с газом на другое место. Тепловое движение молекул остается ненарушенным, а следовательно, не может измениться и температура газа.

Истинная причина охлаждения восходящих токов воздуха заключается в так называемом адиабатном его расширении. Поднимаясь в верхние, более разреженные слои атмосферы, попадая в область пониженного давления, воздух расширяется, совершая работу этого расширения за счет своего теплового запаса. Такое изменение состояния газа, когда он меняет свое давление без заимствования энергии извне (и без отдачи ее вовне), называется адиабатным.

Количественная сторона явления такова. Если температура воздуха близ земной поверхности  $T_0$ , а на высоте  $h$  она равна  $T_h$ , соответствующие же барометрические давления  $P_0$  и  $P_h$ , то понижение температуры на высоте  $h$  равно

$$T_0 - T_h = T_0 [(P_0/P_h)^{(k-1)/k} - 1].$$

Здесь  $k$  — отношение теплоемкости газа при постоянном объеме к теплоемкости его при постоянном давлении: для воздуха  $k=1,4$  и, следовательно,  $(k-1)/k=0,29$ .

Вычислим в качестве примера понижение температуры воздуха на той высоте 5,5 км, где барометрическое давление вдвое ниже, чем у земной поверхности.

Ради простоты будем рассматривать случай восхождения воздуха сухого, не содержащего влаги. Имеем

$$T_0 - T_h = T_0(2^{0,29} - 1) = 0,22T_0,$$

откуда

$$T_h = 0,78T_0.$$

Если близ земной поверхности температура  $17^\circ \text{C}$ , или  $290 \text{ K}$ , то

$$T_h = 0,78 \cdot 290 = 226 \text{ K}.$$

Это составляет  $-49^\circ \text{C}$ , т. е. около  $1^\circ \text{C}$  на каждые  $100 \text{ м}$  поднятия.

Присутствие водяных паров, от которых воздух почти никогда не бывает свободен<sup>\*)</sup>, изменяет приведенный расчет: понижение температуры при подъеме на каждые  $100 \text{ м}$ , равное для сухого воздуха одному градусу, уменьшается почти на полградуса для воздуха, насыщенного парами.

Итак, перемешивание воздушных масс при нагревании атмосферы снизу не может уравнивать их температуры: воздух, поднимающийся вверх, вследствие адиабатного расширения охлаждается; воздух, опускающийся вниз, вследствие адиабатного сжатия нагревается. В итоге верхние слои имеют более низкую температуру, нежели лежащие близ земной поверхности.

**131.** Следя за ходом нагревания с часами в руках, легко убедиться, что нагревание воды на последние десять градусов длится всегда дольше, чем нагревание ее на первые десять градусов; и это несмотря на то, что количество нагреваемой воды постепенно уменьшается вследствие испарения. Объясняется загадка так: тепло, выделяемое пламенем, расходуется не только на усиленное испарение воды, но и на потери тепла водою вследствие излучения. При высоких температурах ( $90\text{—}100^\circ \text{C}$ ) вода излучает больше энергии, чем при низких ( $10\text{—}20^\circ \text{C}$ ). Поэтому, несмотря на равномерное подведение тепла к воде, температура ее повышается тем медленнее, чем сильнее вода нагрелась.

---

<sup>\*)</sup> Изредка случаи полного отсутствия влаги в воздухе все же наблюдаются. Я наблюдал такое явление в Средней Азии в июне 1931 г.: в Аулие-Ата мой карманный гигрометр дважды показывал ноль влажности.

**132.** Мы склонны недооценивать температуру таких, казалось бы, скромных источников тепла, как пламя обыкновенной свечи. Для многих поэтому является неожиданностью, что температура пламени свечи около  $1600^{\circ}\text{C}$  (как установил Лумер на основании закона смещения Вина).

**133.** «Потому что пламя свечи недостаточно горячо для этого»,— отвечают обыкновенно. Но температура пламени свечи, мы знаем, около  $1600^{\circ}\text{C}$ , т. е. на сотню градусов выше температуры плавления железа. Значит, пламя свечи достаточно горячо—и все же железо не удастся таким пламенем довести до расплавления.

Причина та, что одновременно с получением тепла от пламени гвоздь теряет тепло путем излучения. Чем выше поднимается температура нагреваемого предмета, тем сильнее и излучение: потеря тепла растет; наступает, наконец, момент, когда потеря и приход тепла уравновешиваются,—и дальнейшее повышение температуры прекращается.

Если бы гвоздь целиком уместился в пламени свечи, точнее в самой горячей его части, то наивысшая температура гвоздя при нагревании равнялась бы температуре пламени; тогда гвоздь расплавился бы. Но так как обычно в пламени помещается только часть гвоздя и выступающие части беспрепятственно излучают тепло, то равенство притока и потери тепла наступает значительно раньше, чем гвоздь нагреется до температуры свечи и даже до температуры плавления железа.

Значит, гвоздь не плавится на свече не оттого, что пламя недостаточно горячо, а оттого, что оно недостаточно велико—не окружает гвоздь со всех сторон.

**134.** Количество теплоты, расходуемое для нагревания воды на один градус, не строго одинаково при различных температурах. При нагревании от  $0$  до  $27^{\circ}\text{C}$  количество это постепенно уменьшается, а начиная с  $27^{\circ}\text{C}$ —возрастает. Чтобы определение калории было точно, необходимо поэтому указать, при какой температуре началось нагревание на один градус.

По международному соглашению точное определение калории таково: калория—это количество теплоты, необходимое для повышения температуры грамма воды от  $14,5$  до  $15,5^{\circ}\text{C}$ . Такая калория, как установлено измерениями, равна среднему значению калории,



измеренной для температурного интервала от 0 до  $100^{\circ}\text{C}$ , — чем и объясняется выбор температуры для «15-градусной» калории. Калория, измеренная для промежутка  $0-1^{\circ}\text{C}$ , меньше 15-градусной на 0,8%.

**135.** Легче всего нагреть водяной пар (удельная теплоемкость —  $0,46 \text{ ккал}/(\text{кг} \cdot \text{град})$ ), затем лед (удельная теплоемкость —  $0,505 \text{ ккал}/(\text{кг} \cdot \text{град})$ ), а больше всего тепла требуется для нагревания жидкой воды.

**136.** На вопрос о количестве теплоты, необходимой для нагревания  $1 \text{ см}^3$  меди на один градус, нередко ошибочно отвечают: требуется 0,1 кал, потому что такова удельная теплоемкость меди. Забывают при этом, что удельная теплоемкость относится не к единице объема, а к единице массы — не к  $1 \text{ см}^3$ , а к 1 г.

Для нагревания на один градус  $1 \text{ см}^3$  меди (плотность —  $9 \text{ г}/\text{см}^3$ ) требуется не 0,1 кал, а 0,9 кал.

**137.** а) Из твердых тел больше всех требует теплоты для своего нагревания металл литий: его удельная теплоемкость, равная  $1,04 \text{ ккал}/(\text{кг} \cdot \text{град})$ , — вдвое больше, чем у льда.

б) Из жидкостей наибольшей удельной теплоемкостью обладает не вода, как многие привыкли думать, а жидкий водород:  $6,4 \text{ ккал}/(\text{кг} \cdot \text{град})$ . Сжиженный аммиак также обладает теплоемкостью большей, чем вода (хотя и не намного).

в) Наибольшего количества теплоты для своего нагревания из всех тел природы — твердых, жидких и газообразных — требует водород. Его удельная теплоемкость в газообразном состоянии (при постоянном давлении) равна 3,4, а в сжиженном, как уже было сказано, —  $6,4 \text{ ккал}/(\text{кг} \cdot \text{град})$ . Гелий в газообразном состоянии обладает более высокой удельной теплоемкостью ( $1,25 \text{ ккал}/(\text{кг} \cdot \text{град})$ ), нежели вода.

**138.** Вот данные об удельной теплоте сгорания (в  $\text{ккал}/\text{кг}$ ) перечисленных в задаче пищевых продуктов: мясо — 1797, рыба — 836, яйца — 1649, молоко — 668.

**139.** Из числа металлов, твердых при обычной температуре, наиболее легкоплавким считают так называемый металл Вуда — сплав олова (4 части), свинца (8 частей), висмута (15 частей) и кадмия (4

части); он плавится при  $70^{\circ}\text{C}$ . Существует еще более легкоплавкий сплав, так называемый металл Липовица, отличающийся от вудовского меньшим содержанием кадмия (3 части вместо 4-х); он плавится при  $60^{\circ}\text{C}$ .

Однако эти сплавы не занимают первых мест в ряду легкоплавких металлов. Металл галлий плавится при еще более низкой температуре—при  $30^{\circ}\text{C}$ , т. е. буквально тает во рту. Галлий—31-й элемент таблицы Менделеева, открытый более полувека назад, а еще ранее предсказанный Менделеевым как «эка-алюминий».

Галлий находит себе практическое применение главным образом для замены ртути в термометрах. Плавясь при  $30^{\circ}\text{C}^{*)}$ , он кипит только при  $2300^{\circ}\text{C}$ , т. е. бывает жидким в широких температурных границах, от 30 до  $2300^{\circ}\text{C}$ . Так как существуют сорта кварцевого стекла, плавящиеся при  $3000^{\circ}\text{C}$ , то изготовление галлиевого термометра технически осуществимо. Галлиевые термометры для температур до  $1500^{\circ}\text{C}$  уже изготавливаются.

**140.** Платина с температурой плавления  $1800^{\circ}\text{C}$  давно потеряла первое место в ряду тугоплавких металлов. Известны металлы, температуры плавления которых выше, чем для платины на 500—1000 градусов и более. Это иридий ( $2350^{\circ}\text{C}$ ), осмий ( $2700^{\circ}\text{C}$ ), тантал ( $2800^{\circ}\text{C}$ ), вольфрам ( $3400^{\circ}\text{C}$ ).

Вольфрам является самым тугоплавким из всех известных металлов (он применяется для нитей накала электрических лампочек).

**141.** Стальные брусья при высокой температуре теряют значительную часть своей прочности. При  $500^{\circ}\text{C}$  сопротивление стали на разрыв вдвое меньше, чем при  $0^{\circ}\text{C}$ ; при  $600^{\circ}\text{C}$ —втрое меньше; при  $700^{\circ}\text{C}$ —почти в 7 раз меньше. (Более точные данные: если прочность при  $0^{\circ}\text{C}$  принята за 1, то прочность при  $500^{\circ}\text{C}$  равна 0,45; при  $600^{\circ}\text{C}$ —0,3; при  $700^{\circ}\text{C}$ —0,15.) Поэтому при пожаре стальные сооружения рушатся под действием собственной тяжести.

**142.** а) Если бы вода в бутылке замерзла, стекло растрескалось бы под давлением расширяющегося льда. Однако при указанных условиях вода

---

<sup>\*)</sup> Расплавленный галлий может быть переохлажден почти на 10 градусов, т. е. оставаться жидким даже при  $20^{\circ}\text{C}$ .

в бутылке замерзнуть не может. Для ее замерзания требуется не только понижение температуры до  $0^{\circ}\text{C}$ , но и отнятие скрытой теплоты плавления в количестве 80 калорий на каждый грамм замораживаемой воды. Между тем окружающий бутылку лед имеет температуру  $0^{\circ}\text{C}$  (он тает), и, следовательно, тепло не будет переходить от воды ко льду: при равенстве температур такой переход невозможен. А раз нет отнятия тепла от воды при  $0^{\circ}\text{C}$ , то вода останется в жидком состоянии. Опасаться за целостность бутылки поэтому не приходится.

б) Вода не замерзнет ни в той бутылке, которая во льду, ни в той, которая в воде. Раз температура в обоих случаях равна  $0^{\circ}\text{C}$ , то вода в бутылке охладится до  $0^{\circ}\text{C}$ , но не замерзнет, потому что не может отдать окружающей среде скрытой теплоты плавления: при равных температурах не происходит перехода тепла.

**143.** Так как удельный вес льда при  $0^{\circ}\text{C}$  равен 0,917, то при обычных условиях лед на воде плавает. Но при нагревании воды удельный вес ее уменьшается. При  $100^{\circ}\text{C}$  он равен 0,96, в такой воде кусок тающего льда все еще будет плавать. Продолжая нагревать воду (под повышенным давлением), мы при  $150^{\circ}\text{C}$  доведем удельный вес ее до 0,917: в этой воде лед может находиться ниже уровня поверхности, не опускаясь на дно и не всплывая. При  $200^{\circ}\text{C}$  мы будем иметь воду с удельным весом 0,86, т. е. воду, которая легче льда—лед в такой горячей воде должен тонуть.

Надо заметить, что лед, который мы наблюдаем при обычных условиях, есть лишь один из видов твердой воды; при других условиях (при другом давлении) образуются иные виды льда со свойствами, отличными от обычных. При опытах английского физика Бриджмена над свойствами тел под весьма высоким (до 30 000 ат) давлением было найдено шесть различных видов льда: их обозначают номерами: лед I, лед II и т. д. Оказывается, лед I легче воды на 10—14%. Остальные пять видов льда плотнее воды: лед II—на 22%, лед III—на 3%, лед IV—на 12%, лед V—на 8%, лед VI—на 12%.

Значит, из шести известных видов льда только один может плавать на воде, все прочие в ней тонут.

**144.** То, что в трубах подвалов вода замерзает часто не в морозные дни, а в оттепель, многим представляется совершенно необъяснимым. Это озадачивающее явление находит себе, однако, естественное объяснение в плохой теплопроводности почвы.

Тепло проходит через землю так медленно, что минимум температуры наступает в почве позднее, чем на поверхности земли; чем глубже, тем опоздание больше. Часто случается поэтому, что за время морозов почва на глубине пролегания водопроводных труб, а также подземные помещения не успевают охладиться ниже нуля,—и вода в таких трубах еще не замерзает; лишь потом, когда над землей наступает уже оттепель, под землю проникают отголоски морозов. Самая низкая температура под землей совпадает во времени с повышением температуры воздуха над землей: трубы замерзают, когда над землей уже оттепель.

**145.** Противоречие между объяснением явления и результатом расчета произошло оттого, что преувеличен был размер поверхности, по которой лезвие конька соприкасается со льдом. Соприкосновение со льдом происходит не по всей поверхности, ограниченной контуром опоры, а лишь в выступающих точках, совокупная площадь которых, по-видимому, не превышает  $0,1 \text{ см}^2$  (т. е.  $10 \text{ мм}^2$ ). При таком условии давление веса конькобежца ( $60 \text{ кг}$ ) составляет не меньше  $60 : 0,1 = 600 \text{ кгс/см}^2$ , т. е. не меньше величины того порядка, при котором осуществляется требуемое теорией понижение температуры таяния льда.

Точно так же, когда сани, весящие с кладью полтонны, опираются полозьями на снег, площадь действительного соприкосновения полозьев со снегом не превышает  $0,5 \text{ см}^2$ ; получается давление свыше  $1000 \text{ ат}$ .

Если мороз очень силен, то давление коньков и полозьев оказывается недостаточным для понижения температуры таяния льда на необходимое число градусов, и тогда катание на коньках, как и езда на санях, затрудняются: из-за отсутствия водяной смазки заметно возрастает трение.

**146.** Точка таяния льда понижается на  $1/130$  градуса с повышением внешнего давления на одну атмосферу. Не надо думать, однако, что под достаточным давлением можно заставить лед таять при сколь угодно

низкой температуре. Понижение точки таяния льда с давлением имеет границу: более чем на 22 градуса понизить ее нельзя. Это наступает при давлении в 2200 ат.

Следовательно, лед ни под каким давлением не может плавиться при температуре ниже  $-22^{\circ}\text{C}$ . Кататься с легкостью на коньках при морозе сильнее  $-22^{\circ}\text{C}$  невозможно. Это объясняется тем, что под давлением свыше 2200 ат лед превращается в особое видоизменение, более плотное, чем обыкновенный лед, и, следовательно, занимающее меньший объем: давление уже не помогает ему переходить в жидкое состояние.

**147.** «Сухим льдом» называют в технике замерзшую углекислоту. Если жидкую углекислоту, заключенную в баллоне под большим давлением (70 ат), выпускать в воздух, то она испаряется так интенсивно, что остаток ее замерзает (под действием холода при испарении), образуя рыхлую снегообразную массу. Спрессованная в плотную массу, она превращается в сплошное тело, весьма похожее на лед.

Замечательная особенность углекислого «льда» та, что при нагревании он не тает в жидкость, а превращается сразу в газ, минуя жидкое состояние. Это представляет большое удобство при пользовании углекислым «льдом» для охлаждения продуктов: тая, он не смачивает и даже не увлажняет продуктов. Отсюда и название «сухой лед» (рис. 103, 104).



Рис. 103. Слева: жидкая углекислота в закрытом толстостенном баллоне; над ней — ее пары. Правее: когда кран открыт, жидкость вследствие понижения давления вскипает. Вверху справа: баллон наклонен, чтобы вылить углекислоту в мешок, подвязанный к крану. Внизу справа: мешок окружается конденсированными парами углекислоты, которая внутри него замерзает (в. 147).



Рис. 104. Из мешка с углекислотой высыпается снегообразная масса; будучи спрессована она дает «сухой лед» (в. 147).

Другое преимущество углекислого «льда» перед обыкновенным состоит в том, что сухой лед холодит гораздо сильнее обыкновенного — раз в пятнадцать. Испарение его, к тому же, крайне медленно; вагон с фруктами, охлаждаемый сухим льдом, может находиться в дороге по десять дней без смены запаса твердой углекислоты\*).

**148.** Большинство людей убеждено, что водяной пар белого цвета, и очень удивляются, слыша, что это неверно. В действительности водяной пар совершенно прозрачен, невидим и, следовательно, не имеет вовсе цвета. Тот белый туман, который в обыденной жизни называют «паром», представляет собой не пар в физическом смысле слова, а воду, распыленную в мелкие капли. Облака также состоят не из водяного пара, а из мельчайших водяных капелек.

**149.** Раньше закипит вода сырая, так как она содержит в растворе воздух. Чтобы разъяснить,

---

\*<sup>1</sup> Пользуясь шариками сухого льда, американцы пересылают мороженое в простых бумажных пакетах, причем продукт бывает в пути до 40 часов. Холодящее действие сухого льда, помимо его низкой температуры ( $-80^{\circ}\text{C}$ ), обусловлено еще и тем, что образующийся при его возгонке газ также довольно холоден ( $0^{\circ}\text{C}$ ): обволакивая сухой лед, газовый покров этот замедляет таяние. Для продуктов углекислый газ совершенно безвреден: к тому же он значительно уменьшает пожарную опасность, препятствуя распространению огня.

С 1933 г. производство сухого льда налажено в Ленинграде.

почему присутствие растворенного воздуха ускоряет кипение, надо войти в некоторые подробности.

Кипение, в отличие от испарения, состоит в появлении пузырей пара внутри нагреваемой жидкости. Это становится возможным только тогда, когда давление пара достигает величины, не меньшей, нежели давление атмосферы на поверхность, передающееся по закону Паскаля внутрь.

Известно, что при  $100^{\circ}\text{C}$  давление насыщающего водяного пара равно атмосферному. Это относится, однако, только к тому случаю, когда пар насыщает пространство над плоской поверхностью воды. Давление насыщенного пара внутри пузырька, образовавшегося в воде, должно быть меньше атмосферного — меньше, чем близ плоской водяной поверхности при той же температуре. Причина та, что молекулы, покидающие вогнутую поверхность жидкости, легко захватываются ею вновь. Значит, уже при сравнительно небольшом числе освободившихся молекул внутри пузырька наступает такое состояние, когда число еже-секундно освобождающихся молекул равно числу захватываемых. Это и есть состояние насыщения, когда данное пространство заключает при данной температуре наибольшее количество пара, — состояние, при котором давление пара наибольшее. Ясно, что наибольшее давление внутри пузырька меньше, чем над плоской поверхностью воды, где оно равно атмосферному. Чем водная поверхность кривее, т. е. чем меньше радиус пузырька, тем ниже максимальное давление пара. Например, внутри пузырька радиусом  $0,01\text{ мкм}$  давление насыщающего пара при  $100^{\circ}\text{C}$  равно  $750\text{ мм рт. ст.}$  вместо  $760\text{ мм рт. ст.}$

Отсюда следует, что кипение воды, вообще говоря, должно наступать не при теоретических  $100^{\circ}\text{C}$ , а при более высокой температуре, т. е. когда пар в воде создаст более высокое давление, равное атмосферному. Вода, из которой предварительным кипячением выгнан весь растворенный в ней воздух, запаздывает поэтому с кипением: кипение начинается позднее; зато, начавшись, оно протекает очень быстро, с большим выделением пара и быстро доводит воду до нормальной температуры кипения ( $100^{\circ}\text{C}$ ) вследствие усиленного расхода теплоты на парообразование.

Иначе протекает кипение в воде сырой, содержащей в растворе воздух. Так как растворимость газов

с повышением температуры уменьшается, то избыток воздуха должен из нагреваемой воды выделиться. Он и выделяется в виде пузырьков. Первые пузырьки, появляющиеся в нагреваемой сырой воде, заключают не водяной пар, а воздух. С внутренней их поверхности начинают затем освобождаться и молекулы водяного пара. Надо помнить, что всего более затруднено появление в воде первых, самых мелких пузырьков пара, так как давление насыщенного пара в мельчайших пузырьках особенно понижено. Когда трудности рождения миновали, т. е. когда пузырьки так или иначе уже появились, дальнейший процесс образования в них пара значительно облегчается, и пузырьки быстро разрастаются. Этим и объясняется то, что сырая вода, содержащая в растворе воздух, не запаздывает с кипением, как вода кипяченая.

Воду, из которой по возможности удален растворенный в ней воздух, удалось (Максвеллу) при известных условиях перегреть под нормальным давлением до  $180^{\circ}\text{C}$ . При еще более тщательном удалении воздуха можно было бы, вероятно, нагреть воду еще сильнее, оставляя ее жидкой. Это дало повод одному физика (Грове) утверждать, что «никто еще не наблюдал кипения вполне чистой, не содержащей воздуха воды».

**150.** Пар, нагретый до  $100^{\circ}\text{C}$ , может отдавать воде тепло только при условии, что температура воды ниже  $100^{\circ}\text{C}$ . С момента, когда температуры воды и пара сравнялись, переток тепла от пара к воде прекращается. Отсюда следует, что вода может быть нагрета 100-градусным паром до  $100^{\circ}\text{C}$ , но получить от такого пара количество теплоты, необходимое для перехода в парообразное состояние, вода не может.

Значит, 100-градусным паром можно довести воду до температуры кипения, но нельзя довести до состояния кипения: вода будет оставаться в жидком виде.

**151.** Факт, описанный в задаче, верный сам по себе, часто неправильно объясняется. Причину того, что жар кипящего чайника не ощущается рукой, видят в расходе теплоты на поддержание кипения. Теплота эта заимствуется от стенок чайника — в частности от дна — и понижает его температуру. Когда



же кипение прекращается, отлив теплоты также прекращается, и рука начинает ощущать жар.

Объяснение это неправильно. Оно не объясняет того, что прикосновение руки к боковым стенкам чайника болезненно, а к дну — проходит безнаказанно. Кроме того, оно не верно и по существу: дно чайника не может вследствие испарения охладиться ниже температуры воды в нем; вода же в чайнике имеет в это время около  $100^{\circ}\text{C}$  — температура достаточная, чтобы обжечь руку.

Истинная причина явления та, что влага, покрывающая ладонь (пот), приходит при соприкосновении с дном чайника в так называемое сфероидальное состояние; дно чайника в первые моменты после снятия с огня достаточно для этого нагрето. Когда же дно охладится ниже  $150^{\circ}\text{C}$ , сфероидальное состояние не осуществляется, и жар становится ощутительным.

Опыт удастся только в том случае, если дно чайника гладко и не закопчено: загрязнение и шероховатость металлической поверхности мешают возникновению сфероидального состояния.

**152.** Причина того, что жареная пища приятнее на вкус, нежели вареная, заключается не только в прибавлении жира, но главным образом в физических особенностях процессов жарения и варки. Ни вода, ни жир не нагреваются выше температуры их кипения. Но вода кипит при  $100^{\circ}\text{C}$ , жир — при  $200^{\circ}\text{C}$  (хозяйки хорошо знают, как сильны ожоги горячим жиром). Следовательно, жарение происходит при более высокой температуре, чем варка. Более же высокое нагревание вызывает в органических веществах пищи изменения, улучшающие их вкус. Поэтому жаркое вкуснее вареного мяса, яичница вкуснее вареных яиц и т. д.

**153.** Вынутое из кипятка яйцо влажно и горячо. Вода, испаряясь с горячей поверхности яйца, охлаждает скорлупу, и рука не ощущает жара. Так происходит лишь в первые мгновения, пока яйцо не обсохнет, после чего его высокая температура становится ощутительной.

**154.** Никакого влияния на термометр ветер оказать не может (если термометр сух), хотя многим и кажется, что ветер должен его охлаждать. Думающие

так смешивают действие ветра на наш организм с действием его на прибор. Мороз в ветреную погоду переносится нами гораздо хуже, чем в тихую. Это объясняется тем, что ветер быстро сгоняет слои воздуха, нагреваемые нашим телом, заменяя их холодными, и удаляя насыщенные влагой слои, прилегающие к телу. То и другое вызывает усиленный расход тепла нашим телом, а следовательно, и резкое ощущение холода.

На термометр же ветер никакого действия произвести не может, показания термометра в морозный день не меняются оттого, стоит ли погода тихая, или дует сильный ветер.

**155.** Когда переводчик обратился ко мне с просьбой разъяснить выражение «принцип холодной стены», я убедился, что ни в одном из трех десятков имеющихся у меня под рукой русских и иностранных курсов физики принцип этот не упоминается. Мне вспомнилось, однако, что о нем говорилось в том старинном учебнике, в который я часто заглядывал, когда был школьником. Это объемистый французский учебник Гано, переведенный и изданный Павленковым. Теперь он стал книжной редкостью, но можно найти перевод более поздней переработки этого учебника (Гано-Маневрие «Полный курс физики»). Параграф о принципе холодной стены в нем уцелел. Вот он:

«Принцип Уатта, или принцип охлажденной стенки. Предположим, что у нас есть два сосуда (рис. 105): *A*, содержащий воду при  $100^{\circ}\text{C}$ , и *B*, содержащий воду при  $0^{\circ}\text{C}$ . Пока они не сообщаются, упругость паров в них не одинакова: в *B*—4,6 мм рт. ст., в *A*—760 мм рт. ст. Но когда кран *C* открывается, пар из *A* поступает в *B* и там тотчас превращается в воду; поэтому пар в сосуде *A* не может иметь давления больше, чем в *B*.

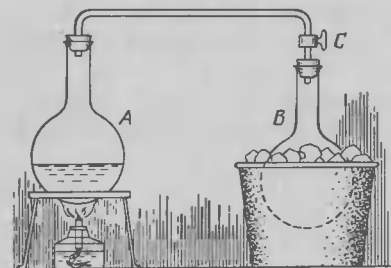


Рис. 105. Опыт для пояснения «принципа холодной стены» (в. 155).

Происходит перегонка из *A* в *B* без увеличения упругости (пара в *B*). Можно формулировать следующий принцип, установленный впервые Уаттом:

„Если два резервуара, заключающие одну и ту же жидкость при различных температурах, сообщаются между собою, то в них устанавливается одинаковая упругость паров, равная максимальной упругости при более низкой из обеих температур”.

Читателю, которому известен поучительный физический приборчик, называемый «криофором», знаком и принцип холодной стены, так как действие прибора основано именно на этом начале. Прибор состоит из двух полых стеклянных шаров, соединенных трубкой (рис. 106). В приборе имеется немного воды с паром над ней; воздух изнутри выгнан. Перелив воду в верхний шар, погружают нижний в охлаждающую смесь. Согласно «принципу холодной стены», над водою в верхнем сосуде должно установиться низкое давление того сосуда, который погружен в охлаждающую смесь. Под пониженным давлением вода закипает, но образующийся пар конденсируется в холодном нижнем шаре — и кипение происходит так энергично, что вследствие усиленной потери тепла на парообразование вода в верхнем шаре замерзает, хотя он и не окружен льдом.

Уатт воспользовался этим принципом для устройства своего холодильника: отработавший пар из цилиндра сам устремляется в холодильник и там конденсируется. До Уатта, в машине Ньюкомена, для конденсирования отработавшего пара впрыскивали в цилиндр холодную воду. При этом приходилось охлаждать не только самый пар, но прежде всего стенки цилиндра, без чего конденсация не происходила; между тем при следующем ходе поршня в охлажденный цилиндр впускался горячий пар, первые порции которого конденсировались на стенках до тех пор, пока цилиндр не приобретал температуры пара в котле. Отсюда ясно, как невыгоден был такой способ конденсации: он требовал большого расхода пара и большого количества холодной воды, иначе говоря, лишнего

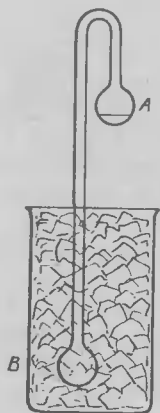


Рис. 106. Криофор; когда охлаждают нижний сосуд, вода в верхнем сосуде замерзает (в. 155).

расхода угля. Вот почему до-уаттовские машины имели такой невероятно низкий коэффициент полезного действия (0,3%). Уатт, в числе других улучшений паровой машины, придумал холодильник, основанный на открытом им „принципе холодной стены”: пар сам покидает цилиндр, оставляя его стенки горячими, и конденсируется вне его, в холодильнике».

Читателя, вероятно, интересует, как мог этот принцип, имеющий, казалось бы только техническое применение, понадобиться в астрономии. Между тем ему принадлежит веское слово в вопросах, связанных с вращением ближайших к Солнцу планет — Меркурия и Венеры.

Меркурий движется вокруг Солнца так, что его «сутки» равны его «году»: он неизменно обращен к Солнцу одной и той же своей стороной. На этой непрерывно озаряемой Солнцем стороне планеты стоит вечный день и страшный зной; на другой, всегда обращенной к мраку мирового пространства, — вечная ночь и сильнейший холод, мороз, близкий к температуре мирового пространства, к  $-264^{\circ}\text{C}^{*)}$ . На холодной стороне Меркурия атмосфера должна сгуститься и замерзнуть, даже если она состоит из водорода. Но согласно принципу Уатта, к этой «холодной стене» планеты должна притечь атмосфера с дневной стороны, где установится то низкое давление, которое господствует над сжиженной атмосферой холодной стороны. Перетекающая часть атмосферы при низкой температуре тоже сгустится в жидкость — и так будет продолжаться до тех пор, пока на холодной стороне Меркурия не соберется атмосферная оболочка всей планеты. Следовательно, Меркурий не может обладать газообразной атмосферой: это неизбежно вытекает из принципа холодной стены при равенстве периодов вращения планеты вокруг оси и обращения вокруг Солнца.

По вопросу о том, какова продолжительность вращения Венеры, мнения астрономов расходятся. Одни считают, что для этой планеты существует такое

---

\*) О температуре мирового пространства см. в. 196. — Значительная вытянутость орбиты Меркурия обуславливает на границе областей вечного дня и вечной ночи существование промежуточной зоны, куда Солнце заглядывает в течение некоторой части года. Это обстоятельство, однако, не меняет дальнейших выводов.

же равенство продолжительности «суток» и «года», как и для Меркурия. Другие считают период вращения Венеры, ее «сутки», гораздо короче ее «года». Принцип холодной стены склоняет весы спора в сторону короткого периода вращения, так как непосредственными наблюдениями установлено присутствие у Венеры атмосферы: при равенстве «суток» и «года» атмосферу Венеры постигла бы участь атмосферы ее соседа Меркурия.

Принцип холодной стены разрушает и догадки Герберта Уэллса об атмосфере Луны, высказанные в остроумном его романе «Первые люди на Луне». Романист допускает, что атмосфера Луны ночью замерзает, а днем тает и испаряется, становится вновь газообразной. Однако одновременное существование на одной половине Луны сжиженного газа, а на другой — того же вещества в состоянии газообразном, как мы уже знаем, невозможно. «Должна происходить,— писал об этом проф. О. Д. Хвольсон,— непрерывная дистилляция воздуха, и нигде и никогда он не может достигнуть сколько-нибудь заметной упругости».

**156.** Весьма распространено мнение, что березовые дрова гораздо «жарче» хвойных и особенно осиновых. Это верно, если сравнивать равные объемы тех и других дров: березовое полено при сгорании дает больше тепла, чем осиновое таких же размеров. Но в физике и технике при оценке теплоты сгорания топлива сравнивают не объемы, а массы. Так как березовая древесина раза в полтора плотнее осиновой, то не следует удивляться, что калорийность березовых дров оказывается одинаковой с калорийностью осиновых. Вообще килограмм древесины, независимо от породы, развивает при сгорании одинаковое количество теплоты (если только процент содержания в них влаги одинаков).

Итак, береза кажется нам «жарче» осины только потому, что в обиходе мы сравниваем неодинаковые массы этих горючих веществ: берем березовой древесины больше, чем осиновой.

Любопытно, что соотношение цен на дрова довольно близко отвечает отношению плотностей различных пород. Покупая дрова, мы приобретаем поэтому на каждый рубль одно и то же число калорий, независимо от породы. Когда же такого соответствия

цен случайно нет, то нередко выгоднее оказывается покупка осиновых дров, чем березовых.

Однако если разные породы дров при одинаковой массе равноценны в смысле количества теплоты, выделяемой при горении, то они все же не вполне равноценны как топливо. Для паровых котлов важно в топливе не только его теплота сгорания, но и быстрота сгорания. Есть заводы (например, стекольные), где быстро горящие осиновые и сосновые дрова предпочтительнее, нежели дрова всех других пород. Напротив, в наших комнатных печах медленно горящие дрова тяжелых пород греют лучше быстро сгорающих более легких пород.

**157.** Ошибочно полагать, что сильное действие взрывчатых веществ обусловлено огромным количеством заложенной в них энергии, т. е. их исключительно высокой удельной теплотой сгорания, которая для многих взрывчатых веществ, напротив, поразительно мала по сравнению с теплотой сгорания промышленных видов горючего. А именно,

при сжигании 1 кг	получается
черного дымного пороха	700 кал
пироксилинового	960 »
кордита	1200—1400 »

Между тем, теплота сгорания

керосина, бензина	11000 кал
нефти	10500 »
угля донецкого и кузнецкого	7000 »
дров сухих	3100 »

Эти данные нельзя, впрочем, непосредственно сопоставлять с предыдущими: надо принять в расчет то, что взрывчатые вещества при сгорании потребляют свой собственный кислород, топливо же заимствует его из окружающего воздуха. Относя число калорий к массе горючего, следует включить в него также и массу потребляемого кислорода. Эта добавочная масса раза в 2—3 больше, нежели масса самого топлива. Так, 1 кг угля потребляет при сгорании 2,2 кг кислорода (теоретически; на практике же вдвое больше), 1 кг нефти — 2,8 кг кислорода, и т. п.

Но и соответственно исправленные цифры теплоты сгорания топлива все же превосходят теплоту сгорания взрывчатых веществ. Топить печи порохом было бы

невыгодно, так как он дает втрое меньше тепла, нежели каменный уголь.

Естественно возникает вопрос: если взрывчатые вещества заключают в себе столь умеренные количества энергии, то чем же следует объяснять тогда их страшное разрушительное действие, их совершенно исключительную силу? Единственно, лишь быстротой сгорания, т. е. тем, что сравнительно небольшое количество энергии проявляет себя в ничтожно малый промежуток времени. Сгорая, взрывчатые вещества образуют сразу много газов, которые, будучи стеснены в небольшой зарядной камере, оказывают на орудийный снаряд давление до 4 тыс. атмосфер.

Если бы порох горел медленно, то за время, пока снаряд скользя в канале орудия, успела бы сгореть лишь небольшая доля заряда; газов образовалось бы немного, напор их был бы невелик и скорость снаряда незначительна. На самом же деле порох сгорает в орудии почти мгновенно. Менее чем в сотую долю секунды он успевает полностью сгореть, а образовавшиеся газы — выбросить снаряд с огромной силой.

**158.** Это не вопрос-шутка, а вполне реальная задача из области физики. При горении развивается тепло, освобождается энергия. Сколько же джоулей энергии развивает горящая спичка в секунду?

Другими словами, какова мощность горящей спички в ваттах? Ничего шуточного в постановке вопроса, как видите, нет.

Не надо думать, что энергия спички до смешного мала. Легко убедиться, что она вовсе не ничтожна. Вот расчет. Спичка весит около 100 мг, или 0,1 г (это можно определить прямым взвешиванием, а при отсутствии чувствительных весов — измерением ее объема, принимая плотность спичечной соломки  $0,5 \text{ г/см}^3$ ). Теплоту сгорания древесины примем равной 3000 кал/г. Можно определить по часам, что спичка сгорает секунд за 20. Значит, из 300 калорий ( $300 \cdot 0,1$ ), развивающихся при сгорании целой спички, в одну секунду появляется 30:20, т. е. 1,5 кал/г. Каждая малая калория отвечает 4,2 джоуля; следовательно, мощность горящей спички равна

$$4,2 \cdot 1,5 = 6,3 \text{ Вт (ватта)}.$$

Значит, горящая спичка по мощности превосходит 50-ваттную электрическую лампочку.

Сходным образом можно рассчитать, что папироса развивает при курении мощность около 20 Вт<sup>\*)</sup>.

**159.** Устранение с платья жирных пятен нагреванием жидкостей уменьшается с повышением температуры. «Поэтому если температура в различных частях жидкого пятна различна, то жир стремится двигаться от нагретых мест к холодным. Приложим к одной стороне полотна нагретое железо, а к другой — хлопчатую бумагу, тогда жир перейдет в хлопчатую бумагу» (Максвелл «Теория теплоты»).

Материал, впитывающий жир, надо, следовательно, помещать на стороне, противоположной утыгу.

**160.** Растворимость огромного большинства твердых тел в воде с повышением ее температуры увеличивается; например, сахар в воде при 0° С растворяется в количестве 64%, а при 100° С — в количестве 83%. Поваренная соль, однако, не принадлежит к таким веществам — ее растворимость в воде почти не зависит от температуры: при 0° С растворяется 26%, при 100° С — 28%. В 40-градусной и в 70-градусной воде растворяется строго одинаковое количество поваренной соли, именно 27%.

---

<sup>\*)</sup> Данные для расчета: масса табака 0,5 г, удельная теплота сгорания 3000 кал/г, время, в течение которого выкуривается папироса, 5 мин.



### ВОПРОСЫ

**161. Эхо.** Укажите физическую несообразность в следующих строках старинного (1799 г.) стихотворения «Эхо»:

Я чаю, эхо, ты мне в роце отвечаешь ... — чаешь.

Конечно, ты вело меня с полей сюда ... — да!

Мне долго говорить с тобою невозможно ... — можно!

Нет, нет! Пойду искать овечку я к ручью ... — чью?

(Е. С. Урусова)

**162. Звук грома.** Можно ли определить расстояние до грозового разряда, наблюдая молнию и гром?

**163. Звук и ветер.** Чем объясняется, что ветер усиливает звук?

**164. Давление звука.** С какой приблизительно силой давят звуковые волны на барабанную перепонку?

**165. Почему дверь заглушает звук?** Хорошо известно, что дерево проводит звук лучше, нежели воздух: вспомним опыт с постукиванием по торцу длинного бревна — звуки эти можно услышать, приложив ухо к другому концу бревна.

Почему же разговор, происходящий в соседней комнате, заглушается, когда дверь в эту комнату закрыта?

**166. Звуковая линза.** Может ли существовать преломляющая чечевица для лучей звука?

**167. Преломление звука.** Когда звук вступает из воздуха в воду, приближается ли звуковой луч к перпендикуляру падения или от него удаляется?

**168. Шум в раковине.** Почему шумят чашка или большая раковина, если их приложить к уху?

**169. Камертон и резонатор.** Если звучащий камертон поставить на деревянный ящик, звук заметно усиливается.

Откуда берется в этом случае избыточная энергия?

**170. Куда деваются волны звука? Куда девается энергия звуковых колебаний, когда звук более не слышен?**

**171. Видимость лучей света.** Случалось ли Вам видеть лучи света?

**172. Восход Солнца.** Свет пробегает от Солнца до Земли за 8 минут с небольшим. Как отражается это на моменте восхода Солнца?

**173. Тень проволоки.** Почему в солнечный день на мостовой хорошо видна тень от уличного фонаря, но тень проволок, на которых он подвешен, не видна или видна очень слабо (рис. 107)?

**174. Тень облака.** Что больше: облако или его полная тень (рис. 108)?



Рис. 107. Почему проволока не отбрасывает тени (в. 173)?



Рис. 108. Что больше: облако или его полная тень (в. 174)?

**175. Чтение при лунном свете.** Можно ли при свете полной луны читать книгу?

**176. Черный бархат и белый снег.** Что светлее: черный бархат в солнечный день или чистый снег в лунную ночь?

**177. Звезда и свеча.** Что освещает сильнее: звезда первой величины или свеча с расстояния 500 м?

**178. Цвет лунной поверхности.** Луну мы видим белой; в телескоп поверхность ее кажется словно гипсовой. Астрономы утверждают, однако, что поверхность ее — темно-серая.

Как примирить это противоречие?

**179. Почему снег белый?** Почему снег белый, хотя составлен из прозрачных ледяных кристалликов?

**180. Блеск начищенного сапога.** Почему блестит начищенный сапог?

**181. Число цветов в спектре и радуге.** Сколько цветов в солнечном спектре и в радуге?

**182. Радуга.** Некто утверждает, что в полдень 22 июня он видел в Москве радугу на небе.

Возможно ли это?

**183. Сквозь цветные стекла.** Какого цвета кажутся красные цветы через зеленое стекло?

А синие — через то же стекло?

**184. Изменение цвета золота.** Когда золото имеет цвет серебра?

**185. Дневное и вечернее освещение.** Почему ситец, лиловый при дневном освещении, кажется черным при вечернем электрическом свете?

**186. Цвет неба.** Почему небо днем голубое, а при закате Солнца — красное?

**187. Искусственное затмение Солнца.** Один из советских изобретателей получил патент на конструкцию трубы, которая должна дать возможность видеть звезды и другие объекты близ краев солнечного диска, не дожидаясь момента полного солнечного затмения. Вот описание изобретения:

«Все сооружение представляет собою трубу длиной в 35—50 м, которая состоит из каркаса из алюминиевых стержней (для легкости), скрепленных между собою, как это показано на рис. 109, так что они образуют небольшие четырехугольные рамы. В рамы вставляются стекла, которые с внутренней стороны густо окрашиваются черной краской так, чтобы они абсолютно не пропускали свет внутрь трубы.

На верхнем конце трубы укрепляется металлический диск, который заменяет собой Луну. Диск должен заслонить собою Солнце так, как это бывает при

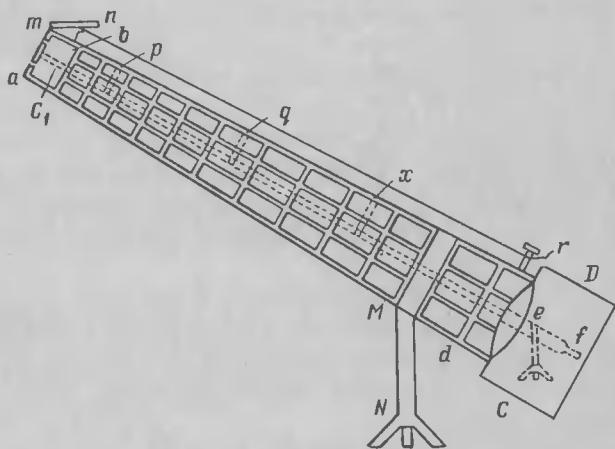


Рис. 109. Прибор для создания условий полного солнечного затмения (в. 187).

полном солнечном затмении. Он подвижно укреплен на стержне, который равен длине самой трубы и передвигается в вертикальном направлении, регулируя местоположение диска. Стержень прикреплен в трех местах к остоу трубы ( $p$ ,  $q$ ,  $x$ ) для устранения возможности его отклонения и колебания. После наблюдений верхний конец трубы накрывается металлическим алюминиевым диском  $mn$  (для защиты внутренней части от атмосферных осадков и прочего) при помощи пружины и проволоки, которая другим концом закрепляется за выступ  $O$ . Труба может вращаться, как телескоп, и можно вести наблюдения при любом положении Солнца на небе. Она укреплена на подставке  $MN$ .

Телескоп  $ef$  для ведения наблюдений помещен в темной камере  $CD$ . Как известно, со дна глубоких колодезв днем, при полном солнечном свете, можно увидеть на небе звезды, что доступно на поверхности Земли только после захода Солнца. Явление это происходит потому, что в колодезь не проникают лучи от освещенной Солнцем атмосферы, которые и мешают видеть днем звезды с поверхности Земли.»

«Аналогично этому получится и в описанной трубе, которая не пропускает света и в нижний конец ее не проникают лучи от освещенной атмосферы. Вверху же находится диск, который заслоняет Солнце. В промежутке между диском и верхним концом трубы сосредоточено то пространство, в котором должны наблюдаться явления, происходящие вблизи так называемого видимого положения Солнца.»

Какого Вы мнения об этом изобретении?

**188. Красный сигнал.** Почему в железнодорожной практике для сигнала остановки выбран красный цвет?

**189. Преломление и плотность.** Как зависит показатель преломления света от плотности среды?

**190. Две линзы.** Из вопросов Эдисоновой викторины:

«Показатель преломления одного стекла 1,5, другого 1,7. Из того и другого выточено по двояковыпуклой линзе. Обе линзы геометрически одинаковы. В чем разнятся они оптически?

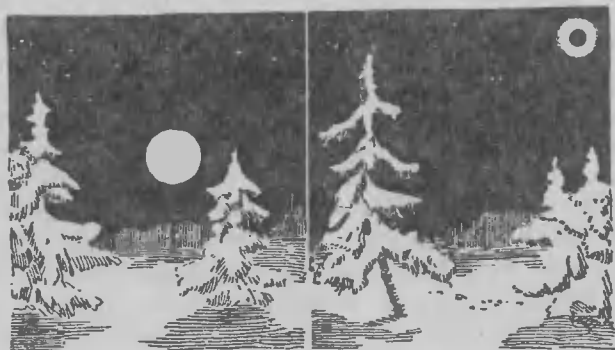


Рис. 110. Когда выгоднее изучать поверхность Луны: когда Луна стоит высоко или когда она близ горизонта (в. 191)?

Какое действие каждая из них произведет на луч, параллельный оптической оси, если их погрузить в прозрачную жидкость с показателем преломления 1,6?»

**191. Светила близ горизонта.** Луна близ горизонта видна более крупной, чем высоко в небе (рис. 110). Почему же на таком увеличенном диске никогда не замечают новых подробностей?

**192. Луна из проколотого картона.** Почему проколотый листок тонкого картона действует подобно лупе (рис. 111)?

**193. Солнечная постоянная.** Солнечной постоянной, называется количество энергии, ежеминутно приносимой солнечными лучами одному квадратному сантиметру, выставленному на наружной границе земной атмосферы перпендикулярно к лучам Солнца.

Где солнечная постоянная больше: зимою на тропике или летом на полярном круге?

**194. Чернее всего.** Что чернее всего?

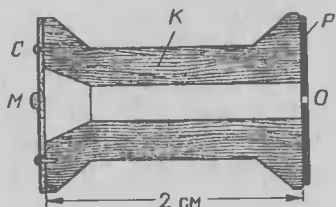


Рис. 111. Луна из деревянной катушки (в. 192). Объект приклеивают к прозрачному целлулоидному кругу *C* и рассматривают через тонкий прокол *O* в картонном кружке *P*. Внутренность катушки вычернена тушью.

**195. Температура Солнца.** Как вычислили температуру солнечной поверхности?

**196. Температура мирового пространства.** Что такое температура мирового пространства?

Какую температуру должны принять тела, помещенные в мировом пространстве?

#### ОТВЕТЫ НА ВОПРОСЫ 161—196

**161.** В стихотворении чередуются двусложные эхо («чаешь», «можно») с односложными («да», «чью»). Стихотворец не задумывался над тем, возможно ли в природе подобное чередование длинных и коротких эхо, и руководствовался, по-видимому, лишь правилами стихосложения. С точки зрения физики такое явление невозможно. Двусложное эхо указывает на вдвое большее удаление источника звука от отражающей преграды, нежели эхо односложное. Для человека, остающегося на месте, такие изменения расстояния невозможны.

В самом деле: когда мы слышим односложное эхо? Вообразите, что Вы находитесь от отражающей преграды на расстоянии 33 м. Хлопните в ладоши: звук пробежит до преграды 33 м, затем такой же обратный путь, и Вы услышите эхо через  $66:330=0,2$  с, потому что звук пробегает в секунду (в воздухе) 330 м. Звук хлопанья так короток, что успевает прекратиться меньше чем за 0,2 с, т. е. прежде, чем приходит эхо. Звук и эхо в этом случае слышны раздельно, не сливаясь. Так как односложные слова мы произносим примерно за 0,2 с, то односложное эхо можно слышать на расстоянии 33 м от преграды. Эхо же двусложного слова при таком удалении от преграды частью сольется с произносимым словом.

Легко рассчитать, что двусложное эхо воспринимается четко лишь при удалении от преграды не менее чем на 66 м.

Обращаясь к стихотворению, видим, что при произнесении слова «отвечаешь» эхо донесло только последние два слога — «чаешь», все остальные слились с произносимым словом. Значит, пастух находился от преграды на расстоянии около 60—70 м. Но если так, то при произнесении слова «сюда» эхо должно было откликнуться двумя слогами, а не одним.

**162.** Гром доносится не обычными звуковыми волнами, а особыми так называемыми взрывными волнами, отличающимися весьма значительными амплитудами колебаний. Взрывная волна во многом отлична от звуковой и только в конце своего недолговечного существования распадается на звуковые волны. Прежде всего взрывные волны распространяются заметно скорее звука, причем скорость их не постоянна, а быстро убывает по мере того, как взрывная волна изменяет свое строение и разрушается. Опыты с распространением взрывных волн в трубах показывают, что скорость их достигает 12—14 км/с, т. е. превышает нормальную скорость звука раз в 40.

Молния порождает взрывные волны, которые расходятся в атмосфере сначала быстрее звука. В этой стадии они воспринимаются ухом, как треск. Сильные, резкие, без предварительных раскатов, удары грома, которые мы слышим сразу после вспышки молнии (иногда даже одновременно с ней), обязаны своим происхождением не успевшей распасться взрывной волне. Они свидетельствуют о близости грозового разряда, так как только на близком расстоянии взрывная волна сохраняет свою первоначальную структуру.

Второй род громового удара, сопровождающийся характерными раскатами, попеременным усилением и ослаблением звука, наблюдается спустя некоторый промежуток времени после молнии и говорит об отдаленности их источника. Но совершенно ошибочно распространенное убеждение, будто по числу секунд, протекающих между молнией и громом, можно вычислить расстояние до грозового разряда (умножив число секунд на скорость звука). Ошибочно потому, что воздушная волна, приносящая звуки грома, не распространялась все время со скоростью звука, а пробежала первую часть расстояния быстрее звука и только конечную часть пути прошла со скоростью звука.

Сказанное о звуке грома не относится к звукам орудийного выстрела: взрывная волна при выстреле из пушки превращается в нормальную звуковую уже в двух метрах от орудия; поэтому определение скорости звука с помощью стрельбы из пушек вполне возможно.



**163.** Приводим относящиеся сюда соображения из книги Лакура и Аппеля «Историческая физика»:

«Известно, что в направлении, по которому дует ветер, звуки слышатся лучше, чем в противоположном. При этом обыкновенно удовлетворяются объяснениями, что в направлении ветра к скорости звука прибавляется скорость ветра. Что это объяснение недостаточно, легко видеть, если припомнить, что движение воздуха со скоростью 10 м/с ощущается как довольно сильный ветер: но распространяется ли звук вместо 330 м/с со скоростью 340 м/с или 320 м/с, смотря по тому, движется ли он по ветру или против него,—это не может, очевидно, иметь значительного влияния на силу звука.

Английский физик Джон Тиндаль объяснил это явление следующим образом. Скорость ветра на высоте почти всегда бывает больше, чем непосредственно у поверхности земли. Вследствие этого поверхности волн, которые в спокойном воздухе должны быть шаровыми (штриховые линии рис. 112), изменяют свои формы, распространяясь в направлении ветра (направление стрелки) быстрее, чем у поверхности земли. Поэтому они принимают формы, обозначенные на рисунке сплошными линиями. А так как распространение звука в каждой точке происходит перпендикулярно к поверхности волны, то звук, исходящий из точки *A* в направлении *AC*, не достигнет наблюдателя, находящегося в точке *D*, но пройдет над ним в направлении *Aa*, и наблюдатель в точке *D* не услышит звука. Напротив того, звук, выходящий по направлению *AB*, распространяется по линии *Ab*, которая повсюду перпендикулярна к поверхности волны. Звук, следовательно, будет услышан наблюдателем в точке *b*; все звуки, исходящие из *A* по направлению ниже *AB*, будут отклонены подобным же образом и достигнут земной поверхности в различных точках между *A* и *b*. Эта часть земной поверхности получит больше звуков, чем собственно следовало бы, а именно,—все звуки, которые при безветренной погоде распространялись бы по всему пространству над *AB*.»

Итак, причина усиления звука при ветре кроется не в изменении скорости звуковых волн, а в изменении их формы (рис. 113, 114) (в конечном счете зависящем, впрочем, от изменения скорости).

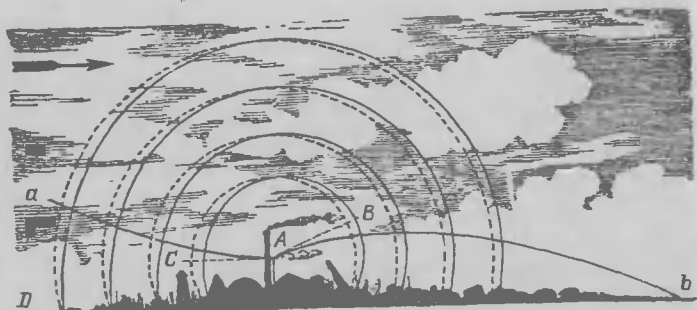


Рис. 112. Как ветер изменяет форму звуковых волн (в. 163).

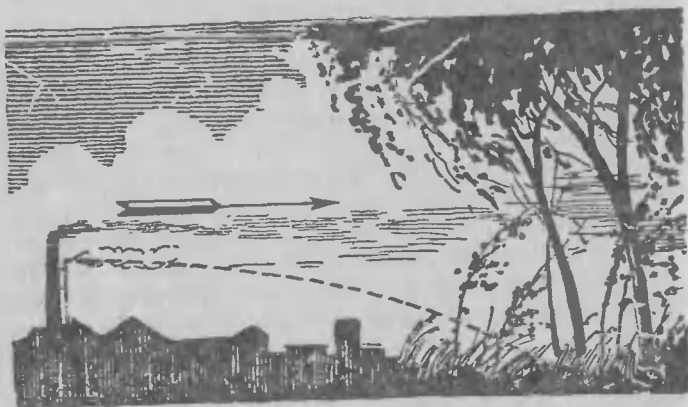


Рис. 113. Как действует на звук попутный ветер (в. 163).

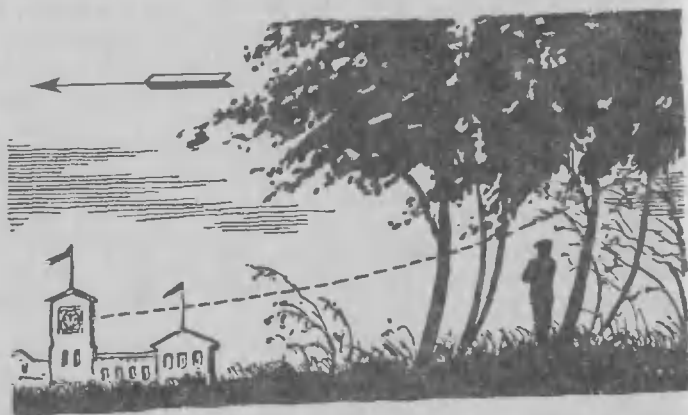


Рис. 114. Как действует на звук встречный ветер (в. 163).

**164.** Давление воздушных волн в  $5 \cdot 10^{-8}$  Н/см<sup>2</sup> дает уже ощутимый звук. При громких звуках давление усиливается в сотни и тысячи раз. Но все же давление звука чрезвычайно мало.

Вычислено, например, что шум улицы большого города оказывает на барабанную перепонку давление  $(1 \div 2) \cdot 10^{-4}$  Н/см<sup>2</sup>, т. е. всего 0,00001—0,0005 ат.

**165.** Дверь заглушает звук, как ни странно, потому, что дерево быстрее проводит звук, чем воздух. При переходе из воздуха в дерево, т. е. в среду, быстрее проводящую звук, луч звука удаляется от перпендикуляра падения. Существует поэтому предельный угол падения для звуковых лучей, проникающих из воздуха в дерево, и угол этот (соответственно большому показателю преломления) весьма невелик.

Отсюда следует, что значительная часть звуковых волн, падающих из воздуха на поверхность дерева, должна отражаться назад в воздух, не проникая в дерево. В итоге через дерево проходит из воздуха сравнительно небольшой процент звуковых волн, падающих на поверхность раздела обеих сред. Сказанным и объясняется заглушающее действие двери.

**166.** Устроить преломляющую линзу для звука вполне возможно. Такой линзой может служить полушар из проволоочной сетки, заполненный пухом — веществом, замедляющим движение звука. Этот полушар будет действовать на лучи звука, как собирательная линза. На рис. 115 видна звуковая диафрагма из листа картона, поставленная впереди линзы и способствующая выделению тех звуковых лучей, которые сосредоточиваются линзой в фокусе  $F$ . В точке  $S$  помещают источник звука (свисток), а в  $F$  — чувствительное к звуку пламя. Так обставлял опыт проф. Н. А. Гезехус.

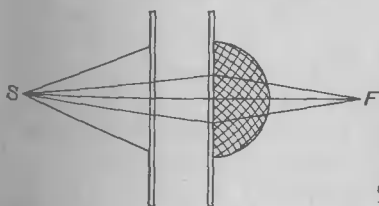


Рис. 115. Звуковая линза из пуха (в. 166).

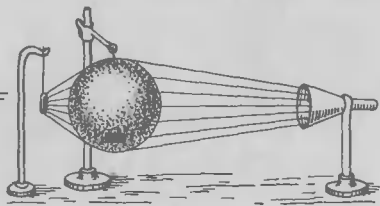


Рис. 116. Звуковая углекислая линза (в. 166).

Тиндаль устраивал звуковую линзу иным образом. «Мы составим такую чечевицу,— писал он,— наполнив тонкий шар каким-нибудь газом, который плотнее воздуха. Вот, например, шар из коллодиума (рис. 116), наполненный углекислым газом; стенки его так тонки, что легко уступают каждому толчку, ударяющему их, и передают толчок заключающемуся внутри газу. Затем я вешаю мои карманные часы близ чечевицы, сзади которой на расстоянии около 1,5 м помещаю мое ухо, вооруженное стеклянной воронкой.

Двигая головой в разные стороны, я скоро найду место, в котором тикание часов звучит особенно громко. Это место есть «фокус» чечевицы. Если я отодвину мое ухо от этого фокуса, сила звука ослабевает; если ухо остается в фокусе, но самый шар сдвигается со своего места, тиканье также ослабевает; когда шар снова ставят на место, тиканье получает прежнюю силу. Значит, чечевица дает возможность ясно слышать тиканье часов, между тем как оно совершенно не слышно для невооруженного уха.»

**167.** Если станем рассуждать по аналогии с лучом света, то получим неверный ответ на вопрос задачи, так как свет распространяется в воде медленнее, чем в воздухе, а звук, напротив, значительно (в 4 раза) быстрее. Поэтому звуковой луч, вступая в воду из воздуха, удаляется от перпендикуляра падения.

По той же причине для прохождения звука из воздуха в воду существует предельный угол, равный в данном случае всего  $13^\circ$  (соответственно большому значению показателя преломления, который равен отношению скоростей распространения звука в обеих средах). Из рис. 117 видно, как мал конус  $AOB$ , включающий все направления, следуя которым звук может проникнуть в воду. Звуковые лучи, лежащие за пределами конуса  $AOB$ , отражаются от поверхности воды, не проникая в нее (полное внутреннее отражение звука).

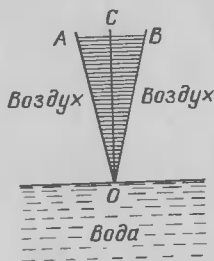


Рис. 117. Преломление звука в воде (в. 167).

**168.** Шум, который мы слышим, приставив к уху чашку или крупную раковину, происходит вследствие того, что раковина является резонатором, усиливающим многочисленные шумы в окружающей нас обстановке, обычно нами не замечаемые из-за их слабости. Этот смешанный звук напоминает гул моря — что и подало повод к различным легендам, сложившимся вокруг шума раковины.

**169.** Когда колебания камертона передаются резонатору, звук становится громче, но зато длится меньше. В итоге — количество энергии, излучаемое звучащими камертоном и резонатором, одинаково. Никакого избытка энергии не получается.

**170.** Когда звук замирает, энергия звуковых волн превращается в энергию теплового движения молекул воздуха и стен. Если бы воздух в комнате не обладал внутренним трением, а стены были бы абсолютно упруги, то раз порожденный звук не замирал бы никогда: всякая нота звучала бы в комнате вечно. В комнате обычных размеров звуковые волны отражаются от стен 200—300 раз, передавая им при каждом отражении долю энергии, и наконец поглощаются целиком, повышая температуру стен. Нагревание это, конечно, неуловимо мало. Чтобы таким путем породить одну калорию теплоты, певец должен был бы петь без перерыва в течение 2—3 суток.

**171.** Многие люди, даже получившие школьное образование, убеждены, что им не раз случалось видеть лучи света. Такие очевидцы будут весьма изумлены, узнав, что лучей света они ни разу не видели и видеть не могли по той простой причине, что световые лучи вообще невидимы. Каждый раз, когда нам кажется, что мы видим лучи, мы в действительности видим нечто другое — видим тела, освещенные световыми лучами. Свет, делающий все видимым, совершенно невидим сам. Очень выпукло писал об этом Джон Гершель, сын великого астронома и сам выдающийся астроном и физик:

«Свет, хотя и является причиной зрения, сам по себе невидим. Говорят, правда, что солнечный луч виден, когда он проходит в темную комнату сквозь отверстие в стене, или когда в облачном небе световые

полосы или лучи прорываются в промежутки туч, расходясь из (невидимого) места Солнца, как из точки, в которой сходятся перспективно все параллельные линии. Но то, что мы в этих случаях видим, есть не свет, а бесчисленные частицы пыли или тумана, отражающие небольшую часть света, подобно тому, как в густом тумане выпуклое стекло фонаря словно изливает обширный световой конус, в сущности состоящий из освещенной части тумана.

Месяц виден благодаря солнечному свету, озаряющему его. Там, где нет месяца, мы не видим ничего, хотя мы убеждены, что, когда в своем движении он дойдет до места, на которое мы смотрим, мы его увидим, и что если бы наши глаза могли быть перенесены на место Луны (в какой бы части неба она ни находилась, только бы не была заслонена), мы оттуда увидели бы Солнце. Следовательно, в каждом таком месте постоянно есть солнечный свет, хоть и невидимый как объект. Он существует тут в виде процесса.

То, что справедливо относительно Солнца, столь же справедливо и относительно звезд; поэтому, когда мы смотрим на небо темною ночью, то хотя и убеждены, что все пространство беспрестанно перекрещивается во всех направлениях линиями, вдоль которых пробегает свет, и что все темное пространство вокруг нас (вне земной тени), так сказать, залито солнечным светом, мы, однако, видим только мрак, исключая тех направлений, по которым линия нашего зрения встречает звезду.»

Сказанному как будто противоречит тот факт, что мы ясно видим лучи света, испускаемые звездами и вообще световыми точками, а, прищурив глаза, различаем луч света, протягивающийся к нам от далекого светила. И то, и другое, однако, заблуждение. То, что мы считаем лучами звезд, на самом деле есть следствие лучистого расположения волокон хрусталика нашего глаза. Если, по совету Леонардо да Винчи, будем смотреть на звезды через маленькое отверстие, проколотое острой иглой, мы никаких лучей у звезд не увидим; они покажутся яркими пылинками, потому что в таком случае в глаз пропускается через центральную часть хрусталика тонкий световой пучок и лучистое строение хрусталика проявиться не может. Что же касается луча, видимого

прищуренными глазами, то это — следствие дифракции света в ресницах.

**172.** Из того, что световой луч затрачивает 8 минут на пробег от Солнца до Земли, не следует делать заключения, что при мгновенном пробеге мы увидели бы восход Солнца на 8 минут раньше. Лучи, которые поступают в глаз, когда мы видим восходящее Солнце (т. е. когда вращающаяся Земля погружает наше место нахождения в залитое Солнцем пространство), покинули Солнце уже 8 минут назад, и нам не приходится ожидать 8 минут, пока они пробегут расстояние от Солнца до Земли. Поэтому при мгновенном распространении света восход Солнца замечался бы нами в тот же самый момент, что и теперь, а не на 8 минут раньше.

**173.** Длина тени, отбрасываемой проволокой при солнечном освещении, определяется пересечением общих касательных, проведенных к окружности солнечного шара и к кругу сечения проволоки. На рис. 118 видно, что угол  $A$  встречи касательных равен тому углу, под каким земному наблюдателю виден диск Солнца, т. е.  $0,5^\circ$ .

Отсюда легко определить длину тени проволоки: она равна диаметру проволоки, умноженному на  $2 \cdot 57$ , так как предмет, видимый под углом в  $1^\circ$ , удален на 57 своих поперечников. Если толщина проволоки, на которой подвешен фонарь, равна 0,5 см, то длина тени составит

$$0,5 \cdot 114 = 57 \text{ см}$$

— расстояние, значительно меньшее, чем высота фонаря над мостовой. Поэтому тень (полная) от проволоки не достигает мостовой.

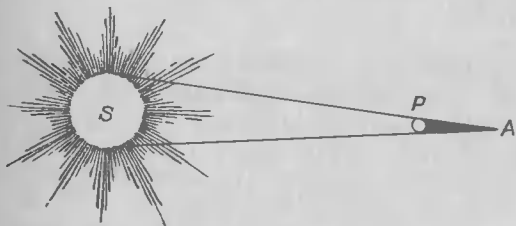


Рис. 118. Почему тень  $PA$  от проволоки  $P$  очень коротка (в. 173)?

Тень же самого фонаря (в пространстве) значительно длиннее, соответственно большому поперечнику. Если поперечник фонаря 30 см, то длина отбрасываемой им в пространстве тени равна

$$0,3 \cdot 114 = 34 \text{ м.}$$

Эта тень всегда должна достигать мостовой, так как фонарь подвешивается на высоте не более 5—10 м.

**174.** Облако, как и фонарь в предыдущем вопросе, отбрасывает суживающийся к земле конус полной тени (а не расширяющийся, как часто утверждают). Этот конус, ввиду значительных размеров облака, весьма велик. Если поперечник облака — только 100 м, то длина тени — свыше 11 км. Интересно вычислить величину укорочения тени на земле по сравнению с величиной отбрасывающего ее облака.

Возьмем пример: облако плавает на высоте 1000 м и лучи Солнца встречают почву под углом  $45^\circ$ ; длина части конуса тени между облаком и почвой равна  $1000\sqrt{2} \approx 1400$  м. Стороны угла в  $0,5^\circ$  расходятся в таком расстоянии от вершины на  $1400/115$ , т. е. около 12 м. Если облако само меньше 12 м, оно совсем не отбросит на землю полной тени. При больших размерах облака в указанных условиях дает на земле полную тень, которая на 12 м короче соответствующего протяжения облака.

Для облаков значительной величины такая разница относительно невелика, и практически тень облака, обрисовывающаяся на земле, мало отличается по размерам от самого облака. Поэтому можно считать их одинаковой величины, хотя обычно думают, что тень больше облака. Это дает возможность легко определять размеры облаков в длину и в ширину.

**175.** Лунный свет субъективно воспринимается как довольно сильный, и потому на поставленный в задаче вопрос многие отвечают утвердительно. Кто, однако, пробовал читать книгу при освещении полной Луны, тот мог убедиться, что различать текст при таком свете очень трудно, хотя в иных романах и рассказывается о подобном чтении. Для свободного чтения обыкновенного книжного шрифта требуется освещен-



ность не менее 40 люксов\*), а для мелкого шрифта, так называемого «петита» — не менее 80 люксов. Между тем, освещенность в полнолуние при безоблачном небе — всего только одна десятая доля люкса. (Полная Луна дает такое освещение, как одна свеча с расстояния 3 м.) Ясно, что лунное освещение далеко не достаточно для чтения книжного шрифта без напряжения.

Склонны переоценивать мы также свет, посылаемый небом в белые ночи. Освещенность в полночь в Ленинграде в разгар белых ночей — около 1/2 люкса. Писать и читать «без лампы» Пушкин мог поэтому не в полночь, а часов в 10 вечера или в 2 часа ночи, когда освещенность достигает 30—40 люксов.

**176.** Ничто, казалось бы, не превосходит черного бархата в черноте и белого снега — в белизне. Однако эти давнишние классические образцы черного и белого, темного и светлого, предстают совершенно иными, когда к ним подходят с беспристрастным физическим прибором — фотометром. Тогда оказывается, что, например, самый черный бархат под лучами солнца светлее, чем самый чистый снег в лунную ночь.

Причина та, что черная поверхность, какой бы темной она ни казалась, не поглощает полностью всех падающих на нее лучей видимого света. Даже сажа и платиновая чернь — самые черные краски, какие нам известны, — рассеивают около 1—2% падающего на них света. Остановимся на цифре 1% и будем считать, что снег рассеивает все 100% падающего на него света (что, безусловно, преувеличено\*\*). Известно, что освещение, даваемое Солнцем, в 400 000 раз сильнее освещения Луны. Поэтому 1% солнечного света, рассеиваемый черным бархатом, в тысячи раз интенсивнее 100% лунного света, рассеиваемого снегом. Другими словами, черный бархат при солнечном свете во много раз светлее снега, озаренного Луной.

Сказанное относится, конечно, не только к снегу, но и к самым лучшим белилам (наиболее светлые из

---

\*) 1 люкс — освещенность, создаваемая 1 свечой с расстояния 1 м (если лучи света падают перпендикулярно к освещаемой поверхности).

\*\*) Свежевыпавший снег рассеивает только около 80% падающего на него света.

них — литопон — рассеивают 91% падающего на них света). Так как никакая поверхность, если она не раскалена, не может отбрасывать больше света, чем на нее падает, а Луна посылает в 400 000 раз меньше света, нежели Солнце, то немыслимо существование такой белой краски, которая при лунном свете была бы объективно светлее самой черной краски в солнечный день.

**177.** Обыкновенная свеча светит в сотни тысяч раз ярче, чем звезда: надо удалить свечу на 500 м, чтобы освещение, даваемое ею, сравнялось с освещением звезды первой величины. Значит, в тех условиях, какие указаны в вопросе, оба источника дают одинаковую освещенность (а именно 0,000 004 люкса).

**178.** Луна рассеивает только 14-ю долю того света, который падает на ее поверхность. Поэтому астрономы с полным правом называют поверхность нашего спутника серой. Причина того, что Луна тем не менее представляется нам с Земли белой, понятно объяснена Тиндалем в его лекциях о свете:

«Свет, падающий на тело, разделяется на две части, из которых одна отражается от его поверхности (рассеивается). Этот отраженный свет сохраняет тот цвет, какой имели падающие лучи. Если падающий свет был белый, то и отражающийся от поверхности будет белым. Солнечный свет, например, отраженный даже от черного предмета, остается белым. Самый черный дым из трубы, когда он освещается снопом солнечного света, проникающим в темную комнату сквозь отверстие в ставне, отражает на всем протяжении белый свет от своих мельчайших частиц. Луна представляется нам, по выражению поэта,

„В бархат одетая, загадочно прекрасная...“

Но если бы Луна действительно была обтянута самым черным бархатом, она и тогда сияла бы на небе серебристым диском.»

Большую роль играет, конечно, и контраст с темным небом, на фоне которого даже слабые источники света кажутся яркими.

**179.** Снег имеет белый цвет по той же причине, по какой кажется белым толченное стекло и вообще всякие измельченные прозрачные вещества.

Растолките лед в ступке или наскребите его ножом — и у Вас получится порошок белого цвета. Цвет этот обусловлен тем, что лучи света, проникая в мелкие кусочки прозрачного льда, не проходят сквозь них, а отражаются внутрь на границах льдинок и воздуха (полное внутреннее отражение). Поверхность же, беспорядочно рассеивающая во все стороны падающие на нее лучи, воспринимается глазом как белая.

Значит, причина белого цвета снега — его раздробленность. Если промежуток между снежинками заполнить водой, снег утрачивает белый цвет и становится прозрачным. Такой опыт нетрудно проделать: если Вы насыплете снега в банку и нальете туда воды, снег на Ваших глазах из белого сделается бесцветным, прозрачным.

**180.** Ни черная вязкая вакса, ни щетка не заключают как будто ничего такого, что могло бы создавать блеск. Поэтому блеск начищенного сапога представляет для многих своего рода загадку.

Чтобы разгадать ее, надо уяснить себе, чем отличается блестящая полированная поверхность от матовой. Обычно думают, что полированная поверхность «гладка», а матовая — «шероховата». Это не верно: шероховаты и та, и другая поверхности. Абсолютно гладких поверхностей не существует. Если бы мы могли рассматривать полированную поверхность в микроскоп, мы увидели бы картину вроде той, какую представляет под микроскопом лезвие бритвы; для человека, уменьшенного в десять миллионов раз, поверхность гладко отполированной пластинки казалась бы холмистой местностью (рис. 119).

Неровности, углубления, царапины имеются на всякой поверхности — матовой и полированной. Все дело в размерах этих неровностей. Если они меньше длины волны падающего на них света, то лучи



Рис. 119. Для человека, уменьшенного в 10 000 000 раз, полированная пластинка была бы холмистой местностью (в. 180).

отражаются «правильно», т. е. сохраняя углы взаимного наклона, какие они имели до отражения. Такая поверхность дает зеркальные изображения, она блестит, и мы называем ее полированной. Если же неровности больше длины волны падающего света, то лучи разбрасываются ею неправильно, без сохранения первоначальных углов взаимного наклона; такой «рассеянный» свет не дает ни зеркальных изображений, ни бликов, и мы называем поверхность матовой.

Отсюда следует, между прочим, что поверхность может быть полированной для одних лучей и матовой для других. Для лучей видимого света, средняя длина волны которых равна 0,5 мкм (0,0005 мм), поверхность с неровностями менее указанного размера будет полированной; для лучей инфракрасных, с более длинной волной, она тоже, конечно, полированная; но для ультрафиолетовых, имеющих более короткую волну, она — матовая.

Возвратимся к прозаической теме нашей задачи: почему начищенный сапог блестит? Непокрытая ваксой поверхность кожи имеет бугристое строение с неровностями, более значительными по размерам, чем длина волн видимого света: она матовая. Вязкое вещество ваксы, наносимое тонким слоем на шероховатую поверхность кожи, сглаживает ее неровности и укладывает торчащие ворсинки. Растирание щетками, удаляя излишки ваксы на выступах и заполняя промежутки, уменьшает неровности до таких размеров, при которых бугры становятся меньше длины волн видимых лучей и поверхность из матовой превращается в блестящую.

**181.** Общая уверенность, что в солнечном спектре и в радуге семь цветов — одно из рутинных заблуждений, всеми повторяемое и никем не проверяемое. Если ленту спектра рассматривать без предвзятой мысли, внушаемой учебниками, то можно различить только пять основных цветов:

красный, желтый, зеленый, голубой, фиолетовый.

Они не имеют резких границ, а переходят один в другой постепенно, так что, кроме перечисленных основных цветов, различаются еще следующие промежуточные оттенки:

красно-желтый (оранжевый),  
желто-зеленый,  
зелено-голубой,  
фиолетово-голубой (синий).

Значит, в солнечном спектре либо пять цветов, если ограничиться только основными, либо девять, если брать также и промежуточные.

Почему же установился обычай насчитывать семь цветов?

Ньютон первоначально различал только пять. Описывая свой знаменитый опыт (в «Оптике»), он говорит: «Спектр оказался окрашенным и притом так, что часть наименее преломленная была красною; верхняя же, наиболее преломленная часть у конца окрашена в фиолетовый цвет. Пространство между этими крайними цветами имело желтую, зеленую и голубую окраску.»

Но впоследствии, стремясь создать соответствие между числом цветов спектра и числом основных тонов музыкальной гаммы. Ньютон добавил к пяти перечисленным цветам спектра еще два. Это необоснованное пристрастие к числу семь представляет собой, в сущности, отголосок астрологических верований\*) и древнего учения о «музыке сфер» (как и поговорка о «седьмом небе»).

Что же касается радуги, то здесь не может быть и речи о различении семи цветов; не удастся заметить даже и пяти оттенков. Обычно мы видим в радуге только три цвета, именно: красный, зеленый и фиолетовый; иногда едва различается желтый; в других случаях радуга включает довольно широкую белую полосу.

---

\*) Английский физик Хаустен в книге «Свет и цвета» пишет по этому поводу следующее:

«Семь планет (древние причисляли к планетам также Солнце и Луну) считались божествами, и эта идея проходила красною нитью через всю средневековую астрологию; влияние Солнца на урожай и на погоду было настолько очевидно, что казалось естественным допустить влияние других планет на человеческие дела, быть может, не столь очевидное, но не менее важное ... Подразделение месяца на недели было сделано в честь планет. И, несомненно, благодаря тем же семи планетам число семь получило священный характер в библии, в алхимии было семь основных металлов, в октаве — семь нот, в спектре — семь цветов.»

В той же книге (изданной в 1926 г. по-русски) читатель найдет подробное описание знаменитого опыта Ньютона с призмами и ряд интересных исторических сведений.



Черного цвета будет, как легко понять, также и синий цветок, рассматриваемый через зеленое стекло.

Профессор М. Ю. Пиотровский, физик, художник и тонкий наблюдатель природы, делает по этому поводу ряд интересных замечаний в своей книге «Физика в летних экскурсиях»:

«Наблюдая цветник через красное стекло, мы легко заметим, что чисто красные цветы, например герань, представляются нам столь же яркими, как чисто белые; зеленые листья кажутся совершенно черными с металлическим блеском; синие цветы (аконит, «рыцарские шпоры») черны до такой степени, что их на черном фоне листьев едва можно найти; цветы желтые, розовые, сиреневые представляются более или менее тусклыми.»

«Взяв зеленое стекло, мы видим необычайно яркую зелень листьев; на ней еще более ярко выступают белые цветы; несколько бледнее — желтые и голубые; красные представляются густо черными; сиреневые и бледно-розовые — тусклыми, серыми, так что, например, светло-розовые лепестки шиповника оказываются темнее, чем его густо окрашенные листья.»

«Наконец через синее стекло красные цветы снова кажутся черными; белые — яркими; желтые — совершенно черными; голубые, синие — почти столь же яркими, как и белые.

Отсюда нетрудно понять, что красные цветы посылают нам, действительно, гораздо больше красных лучей, чем всяких других, желтые — приблизительно одинаковое количество красных и зеленых, но очень мало синих; розовые и пурпуровые — много красных и много синих, но мало зеленых, и т. д.»

**184.** Чтобы золото утратило свой характерный желтый цвет, надо рассматривать его в свете, из которого желтые лучи исключены. Ньютон достигал этого тем, что задерживал желтый цвет спектральной ленты, а все прочие пропускал дальше, соединяя их затем с помощью собирающей чечевицы. «Если, — писал он, — до входа в чечевицу задержать желтые лучи, то золото (освещенное прочими лучами) кажется белым, как серебро.»

**185.** В свете электрической лампочки гораздо меньше синих и зеленых лучей, чем в свете Солнца. Поэтому лиловый ситец, освещенный электрической

лампой, не посылает в глаз почти никаких лучей — единственные лучи, которые этот ситец способен посылать, им самим не получают. А всякая поверхность, не посылающая глазу лучей света, представляется нам черной.

**186.** Солнце заливает земную атмосферу белым светом, но в наш глаз, когда мы озираем небо, попадают только те лучи, которые рассеиваются молекулами воздуха и взвешенными в нем мельчайшими пылинками. Молекулы же воздуха и пылинки рассеивают, т. е. отбрасывают, лучи с короткими волнами — именно синие, голубые; более длинные волны «обтекают» мелкие частицы и следуют дальше. Поэтому в свете, рассеиваемом воздухом, преобладают лучи синие, а в свете, прошедшем сквозь атмосферу, имеется избыток красных лучей.

Днем мы получаем от неба рассеиваемые им лучи, и потому видим небо синим или голубым. Утром же и вечером, при восходе или закате Солнца, в наш глаз попадают лучи, прошедшие сквозь толщу воздуха, — и небо близ горизонта мы видим красного цвета. Точно так же во время полного лунного затмения Луна окрашивается в красноватый цвет лучами, прошедшими через земную атмосферу.

Различные оттенки вечернего неба известный американский метеоролог объясняет следующим образом:

«Цвет неба зависит от относительной яркости доходящих до наблюдателя различных цветных лучей, а эта яркость, в свою очередь, зависит от рассеяния, которое обуславливается размером и числом пылевых частиц в атмосфере ... Если эти частицы сравнительно немногочисленны и малы, то цвет неба бывает голубым. Напротив, когда увеличивается их число и размеры (например, в сухие ветреные дни) или увеличиваются только размеры (вследствие гигроскопичности частиц при увеличении влажности атмосферы), — тогда лучи с короткой волной ослабляются более значительно, и небо принимает цвет, отвечающий большей длине волны: зеленый, желтый, даже красный. Наконец, если частицы настолько велики, что отбрасывают лучи всех цветов, небо делается беловатым.

После сказанного понятно, почему вечером и утром небо часто бывает окрашено в различные цвета: близ горизонта — в красный, повыше — в оранжевый и желтый, еще выше — в зеленый и голубовато-зеленый.



Здесь сказывается влияние высоты, а следовательно, и уменьшения числа и размеров пылинок в тех атмосферных слоях, которые пронизываются солнечными лучами, прежде чем они достигнут от границ атмосферы до рассматриваемой части неба и отсюда до глаза наблюдателя.»

Цвет вечернего неба, заметим кстати, является одним из местных признаков предстоящей погоды. Красное вечернее небо указывает на то, что в ближайшие сутки дождя не будет. Желтый или зеленоватый оттенок близ западного горизонта увеличивает шансы на хорошую погоду. Если же вечернее небо покрыто однородным серым налетом, вероятно дождь\*).

**187.** Идея изобретения основа на наивном заблуждении, будто достаточно заслонить солнечный диск непрозрачным кружком, чтобы создать обстановку солнечного затмения. Другая ошибка изобретателя состоит в уверенности, будто со дна глубоких колодцев видны на небе звезды при свете Солнца. То и другое неверно теоретически и не подтверждается опытом.

Почему при обычных условиях мы не различаем никаких объектов — звезд, лучей короны — непосредственно у края Солнца? Не столько потому, что яркий свет Солнца ослепляет нас, сколько потому, что атмосфера рассеивает падающие на нее лучи света, и в этом сиянии теряется слабый свет короны и звезд. При отсутствии атмосферы мы на черном небе при ярком свете Солнца видели бы и звезды, и солнечную корону. Каждая частица озаренной Солнцем атмосферной оболочки Земли является нам как бы звездой, испускающей более яркий свет, нежели подлинные звезды, и сквозь эту сплошную сияющую завесу лучи звезд не пробиваются. Такова причина невидимости звезд днем.

Для наблюдателя, помещающегося на дне глубокого колодца, имеют место те же условия: вся толща атмосферы, залитая солнечным светом, по-прежнему простирается между его глазом и звездами, делая их неразличимыми: лучи звезд смешиваются с более яркими лучами, рассеиваемыми частицами воздуха. Надо удивляться, как могла сложиться легенда о видимости звезд днем со дна колодцев и высоких

---

\*). См. В. Гэмфриз «Народные приметы и парадоксы погоды».

заводских труб. Никаких прямых свидетельств, удостоверяющих подобные факты, в литературе не имеется: все авторы, писавшие об этом, от Аристотеля до Джона Гершеля, ссылаются на показания третьих лиц. Когда же Гумбольдт опрашивал берлинских трубочистов, случалось ли им видеть днем звезды со дна высоких труб, он не получил ни одного утвердительного ответа \*).

Обратимся теперь к искусственному солнечному затмению. Заслонив Солнце кружком, но продолжая оставаться на дне воздушного океана, мы, правда, защищаем глаза от прямых солнечных лучей,—но небо над кружком по-прежнему залито светом, и частицы воздуха продолжают, как и раньше, рассеивать лучи, перебивая свет звезд и солнечной короны. Другое дело, когда заслоняющий экран помещается за пределами плотной части атмосферы, как мы имеем в случае затмения Солнца Луною: тогда лучи Солнца задерживаются этим экраном раньше, чем они достигают воздушной оболочки Земли. Рассеивание лучей света в затененном участке атмосферы тем самым предупреждается, да и то не вполне—в область тени проникают и частью достигают наблюдателя лучи, рассеиваемые окружающими светлыми областями; оттого даже в момент полного солнечного затмения никогда небо не бывает так густо черно, как в полночь.

Несостоятельность идеи рассматриваемого изобретения теперь, полагаю, ясна для читателя.

**188.** Красные лучи, как лучи с большей длиной волны, рассеиваются частицами, взвешенными в воздухе, слабее, нежели лучи иных цветов. Лучи

---

\*) Это верно для всех неподвижных звезд, но не для всех планет, яркость которых, особенно Венеры, может в известные периоды значительно превосходить яркость звезд. Один из моих корреспондентов, кавказский пастух, писал мне, что из глубокого ущелья он неоднократно наблюдал днем две звезды, усиленно подчеркивая при этом, что видел только две звезды, по-видимому, всякий раз одни и те же. У меня нет основания подвергать сомнению справедливость этого свидетельства. Надо думать, что корреспондент мой видел Венеру и Юпитер в пору их значительной яркости, когда Венера имеет звездную величину минус 4,4, а Юпитер—минус 2,5. Это значит, что Венера была ярче звезд первой величины в 140 раз, Юпитер—в 25 раз. Такие яркие светила могут выделиться и на сияющем фоне неба (Венера бывает видна днем невооруженному глазу даже при обычных условиях).

красного цвета проникают поэтому дальше, нежели всякие другие. А возможно более дальняя видимость сигнала остановки является на транспорте обстоятельством первостепенной важности: чтобы успеть остановить поезд, машинист должен начать торможение на значительном расстоянии от препятствия.

На большей прозрачности атмосферы для длинноволновых лучей основано, между прочим, употребление астрономами инфракрасного светофильтра для фотографирования планет (в особенности Марса). Подробности, незаметные на обычном фотоснимке, отчетливо выступают на фотографии, снятой через стекло, которое пропускает только инфракрасные лучи; в последнем случае удастся заснять саму поверхность планеты, между тем как на обыкновенном снимке фотографируется лишь ее атмосферная оболочка.

Другая причина выбора красного цвета для сигнала остановки заключается в большей чувствительности нашего глаза к этой окраске, нежели к синей или зеленой.

**189.** Часто приходится слышать, что показатель преломления вещества тем больше, чем оно плотнее. Утверждают, что «при переходе луча из среды менее плотной в среду более плотную он приближается к перпендикуляру падения». Так нередко и бывает, но далеко не всегда.

Известно, что отношение показателей преломления двух сред обратно отношению скоростей света в этих средах. Поэтому интересующий нас вопрос можно поставить и в другой форме, более удобной для рассмотрения:

Верно ли, что скорость света тем меньше, чем плотнее среда, в которой он распространяется?

Уже из сопоставления трех сред — пустоты, воздуха и воды — ясно, что подобной простой зависимости не существует. Если плотность воздуха принять за единицу, то плотность этих трех сред выразится числами:

пустота	0,
воздух	1,
вода	770.

Если же принять скорость света в воздухе за единицу, то скорости света в рассматриваемых средах будут таковы:

в пустоте	1,
в воздухе	1,
в воде	0,75.

Ожидаемой зависимости, как видим, нет. Мало того, существуют вещества одинаковой плотности, в которых свет распространяется с различной скоростью (т. е. показатели преломления этих веществ различны). Таковы хлороформ и цинковый купорос в надлежащем разбавлении. И наоборот, можно назвать вещества с одинаковым показателем преломления, но различной плотности: стекло вдвое плотнее кедрового масла, но скорость света в них одинакова (стеклянная палочка в кедровом масле не видна).

В одном лишь случае имеет место обратная пропорциональность между показателем преломления и плотностью: когда речь идет об одной и той же среде при различных температурах или давлении. Во всех прочих случаях правило неприменимо, и ему не место в учебниках физики.

**190.** Линзы одинаковых размеров и формы, но отличающиеся показателем преломления (1,5 и 1,7), разнятся между собой длиной главного фокусного расстояния; линза с бóльшим показателем имеет более короткое фокусное расстояние (в данном случае — на 28%).

Погруженные в жидкость с показателем преломления 1,6, стекла будут действовать на лучи света различно: линза с показателем 1,5, т. е. меньшим, чем у жидкости, будет действовать как слабо рассеивающая линза, а линза с бóльшим показателем — как слабо собирающая.

**191.** Новые детали различаются в объекте лишь в том случае, когда они рассматриваются под бóльшим углом зрения. Если бы поэтому Луна, находясь близ горизонта, усматривалась под бóльшим углом зрения, нежели тот, под каким она видна высоко в небе, мы безусловно заметили бы на диске ее близ горизонта новые подробности. Но угловая величина Луны, когда она близ горизонта, несколько не больше, чем когда она высоко в небе. Луна ведь не приближается к наблюдателю, видящему ее у горизонта; напротив, легко сообразить, что в таком положении она даже несколько дальше от наблюдателя, чем когда висит высоко в небе.

Хотя нет нужды касаться здесь вопроса о том, чем обусловлено кажущееся увеличение светил близ горизонта, не излишне будет отметить попутно, что в этом никакой роли не играет атмосферная рефракция, на которую часто ссылаются при рассмотрении этого явления. Насколько распространено это ошибочное представление, видно хотя бы из следующих воспоминаний М. П. Чехова о его знаменитом брате-писателе:

«Как-то раз, когда в летний, тихий, безоблачный вечер солнце красным громадным кругом приблизилось к горизонту, среди нас возник вопрос, почему, когда солнце садится, то бывает красное и гораздо больших размеров, чем днем. После долгих дебатов решили, что в такие моменты солнце уже всегда находится под горизонтом, но так как воздух представляет собою для него то же, что и стеклянная призма для свечи, то, преломляясь сквозь призму воздуха, солнце становится для нас видимым из-под горизонта уже потерявшим свою естественную окраску и гораздо больших размеров.»

Не более правильны, чем это дилетантское объяснение, те соображения, которые напечатаны были в одном ленинградском научно-популярном журнале. Привожу их дословно:

«Солнце и Луна кажутся на горизонте большими, чем когда они высоко стоят на небе, потому, что на горизонте преломление света атмосферой сильно меняется с небольшой даже высотой поднятия. Кроме того, преломление света на горизонте самое большое. Результатом всего этого и получается Солнце и Луна на горизонте в виде большого красного диска.»

В действительности рефракция не только не увеличивает, но даже, напротив, уменьшает вертикальный диаметр светила близ горизонта, сообщая дискам Солнца и Луны вид эллипса (рис. 121).

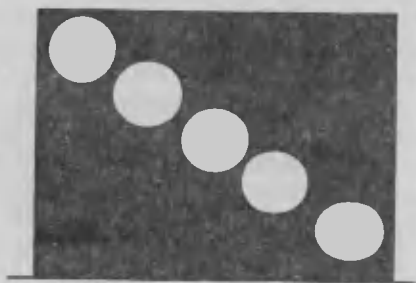


Рис. 121. Сжатие солнечного диска близ горизонта действием атмосферной рефракции (в. 191).

Настоящая причина увеличения светил у горизонта окончательно еще не выяснена, но какова бы она ни была, она нисколько не связана с атмосферной рефракцией.

Переходя к нашей задаче, мы должны подчеркнуть, что наблюдаемое близ горизонта увеличение светил не имеет ничего общего с тем, которое дает телескоп или микроскоп. Оптические приборы так изменяют направление лучей, вступающих в глаз, что изображение на сетчатке увеличивается. В этом и состоит сущность увеличивающего действия оптических инструментов: они не увеличивают самих объектов, не приближают их (все это лишь фигуральные выражения), а увеличивают изображения объектов, рисующиеся на сетчатке. Изображение растягивается на большое число нервных окончаний; участки, попадающие без инструмента на одно и то же нервное окончание и оттого сливающиеся в неразличимую точку, оказываются благодаря прибору на разных нервных окончаниях и воспринимаются расчлененно.

Всего этого не происходит при том кажущемся увеличении, которое мы наблюдаем, рассматривая светила у горизонта; Луна не рисуется на сетчатке увеличенной, и потому никаких новых подробностей различить на ее мнимо-увеличенном диске нельзя.

**192.** Мелкий объект, рассматриваемый через тонкий прокол в листке картона, представляется нам явно увеличенным; это увеличение не кажущееся (как увеличение солнечного диска близ горизонта), потому что благодаря подобному приспособлению удастся различить в объекте новые подробности. Действие малого отверстия все же отличается от действия лупы.

Линза изменяет ход лучей так, что на сетчатке глаза получается увеличенное изображение объекта. Маленькое отверстие также обуславливает появление на сетчатке увеличенного изображения, но не изменением направления лучей, а задержкой тех лучей, которые делают изображение на сетчатке глаза неясным. Тем самым отверстие дает возможность значительно приблизить объект к зрачку без ущерба для отчетливости зрения. Другими словами, отверстие играет роль диафрагмы.

Совсем заменить линзу, однако, маленькое отверстие не может: линза использует гораздо больше света

и дает изображения, несравненно более яркие, чем прокол.

Лупа, которая изображена на рис. 111, сделана из деревянной катушки *K* (внутри катушка вычернена тушью). Объект приклеивается к прозрачному целлулоидному кругу *C* в точке *M* и рассматривается на расстоянии 2 см через тонкий прокол *O* в картонном кружке *P*. Так как расстояние ясного зрения для нормального глаза равно 25 см, то предмет должен быть виден под углом зрения, в 12,5 раза большим, чем при рассматривании без лупы. Иными словами, мы имеем в этом случае линейное увеличение в 12,5 раза. Увеличение это, однако, полезно лишь при условии яркого освещения.

**193.** Солнечная постоянная на всех широтах земного шара и во все времена года одна и та же (1,9 ккал в минуту). Солнце посылает одинаковое количество энергии в течение круглого года на любой квадратный сантиметр, выставленный вне атмосферы под прямым углом к лучам. Различия в климате и временах года обусловлены лишь тем, что разные части земной поверхности и одна и та же часть ее в различное время года наклонены не под одинаковым углом к солнечным лучам.

Сантиметровый квадратик, поставленный под прямым углом к лучам Солнца, всегда и всюду на Земле получил бы одинаковое число калорий — зимой и летом, на полюсе и на экваторе. Но перпендикулярных к лучам квадратиков в полярных странах нет; на экваторе они бывают только два дня в году, остальное время поверхность экваториальной зоны составляет с лучами Солнца угол, близкий к прямому, — в отличие от полярной области, где угол, составляемый солнечными лучами с земной поверхностью, гораздо острее.

**194.** Черной называем мы такую поверхность, которая, будучи освещена, не посылает в наш глаз никаких лучей света. Таких тел в природе, строго говоря, не существует: все так называемые черные краски (сажа, платиновая чернь, окись меди и др.) отбрасывают некоторую часть озаряющего их света.

Что же чернее всего?

Ответ довольно неожиданный: чернее всего — дыра.

Не всякая, конечно, дыра, а дыра при определенных условиях. Например, дырочка в закрытом ящике,

зачерненном внутри; или еще проще — отверстие в жестянке от керосина, когда из нее вынута пробка.

Окрасьте какой-нибудь ящик самой густой черной краской снаружи и внутри; сделайте в его стенке небольшую дырочку — она всегда будет казаться Вам чернее стенок, будет выделяться на их фоне. Причина та, что пучок лучей света, проникающий через отверстие внутрь ящика, частью поглощается зачерненными стенками, частью отражается; но отраженная часть попадает не обратно в дырочку, а снова на зачерненную внутреннюю поверхность: здесь она вторично отчасти поглощается, отчасти отражается и т. д. Прежде чем остаток лучей выйдет из отверстия, свет, проникающий в ящик, претерпевает столь многократные отражения и поглощения, что ослабляется до неспособности действовать на наш глаз.

Числовая иллюстрация поможет лучше ощутить, в какой прогрессии ослабевает интенсивность светового пучка при многократном отражении. Допустим ради простоты, что черная краска, покрывающая стенки нашего ящика изнутри, поглощает 90% падающего на нее света, а остальные 10% — рассеивает. Тогда после первого отражения пучок будет нести только 0,1 первоначальной энергии; после второго —  $0,1 \cdot 0,1$ , т. е. 0,01; после третьего —  $0,1 \cdot 0,01$ , т. е. 0,001 и т. д.

Легко подсчитать, какова окажется интенсивность пучка после двадцатого, например, отражения: она уменьшится в 1 с 20-ю нулями раз и составит

0,00000000000000000001

долю первоначальной. Практически это равносильно отсутствию света, так как свет столь ничтожной интенсивности не воспринимается нашим глазом. Если первоначальный пучок лучей исходил от Солнца и давал освещенность в 100 000 люксов, то после двадцатого отражения мы будем иметь освещенность всего

0,0000000000000001 люкса.

Известно, что освещенность от звезды 6-й величины (самой слабой звезды, различимой невооруженным глазом) равна 0,00000004 люкса. Следовательно, лучи, выходящие из отверстия ящика после 20-го отражения, никакого действия на глаз произвести не могут.

Теперь понятно, что отверстие в закрытом сосуде или ящике должно быть действительно чернее всякой



черной краски. Такой ящик с отверстием называется моделью абсолютно черного тела или искусственным абсолютно черным телом.

**195.** Вычисление температуры солнечной поверхности основано на законе излучения так называемого абсолютно черного тела, т. е. воображаемого тела, поглощающего 100% падающей на него лучистой энергии (все черные тела природы, даже сажа, не абсолютно черны: они рассеивают некоторую часть падающих на них лучей). Физический закон, установленный Стефаном, гласит, что энергия, излучаемая абсолютно черным телом, пропорциональна четвертой степени его температуры (по шкале Кельвина).

Тело (абсолютно черное), нагретое, например, до 2400 К (2127° С) излучает энергии больше, чем при 800 К (527° С), в 3<sup>4</sup>, т. е. в 81 раз.

Чтобы вычислить на этом основании температуру поверхности Солнца, будем исходить из допущения, что земной шар мало отличается от абсолютного черного тела и что на всей земной поверхности господствует средняя температура 17° С, или 290 К. То, что в действительности различные места земной поверхности имеют неодинаковую температуру, отклоняющуюся от средней в обе стороны, несущественно влияет на результат расчета (как и то, что Земля — не абсолютно черное тело).

Геометрически можно вычислить, что солнечный диск занимает одну 188 000-ю часть полной небесной сферы<sup>\*)</sup>. Вообразим Землю помещенной в центре шаровой оболочки радиусом 150 000 000 км (расстояние от Земли до Солнца), — оболочки, испускающей с каждой

<sup>\*)</sup> Вычисления подобного рода можно делать следующим образом. Угловой диаметр Солнца (средний) равен 0,53°; следовательно, диск Солнца занимает на небе  $\frac{1}{4} \pi \cdot 0,53^2 = 0,2206$  кв. градуса. Сколько же квадратных градусов на полной шаровой поверхности?

Радиус в 57,3 раза длиннее дуги в 1°; значит, в радиусе 57,3 таких дуг, а на шаровой поверхности

$$\frac{1}{4} \pi \cdot 57,3^2 = 41252 \text{ кв. градусов.}$$

Разделив 41252 на 0,2206, узнаем, во сколько раз поверхность полной сферы больше видимой поверхности Солнца.

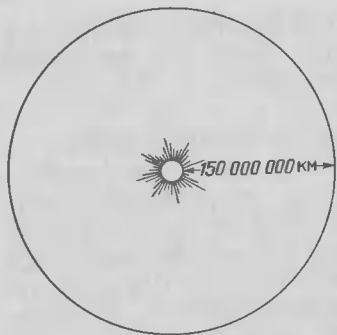


Рис. 122. К расчету температуры Солнца (в. 195).

единицы своей поверхности столько же энергии, как Солнце (рис. 122). Другими словами, заполним мысленно все небо солнцами; их окажется 188 000. Земля получала бы только от этой сияющей оболочки не столько энергии, сколько фактически сейчас получает, а больше в 188 000 раз.

Легко понять, что Земля должна была бы тогда принять температуру окружающей ее раскаленной сферы,

т. е. температуру Солнца: при установившемся тепловом равновесии все тела принимают одинаковую температуру. Мы должны заключить также, что Земля в этих условиях излучает столько же энергии, сколько получает (иначе она не была бы в тепловом равновесии с сияющей оболочкой, а либо нагревалась бы, либо охлаждалась).

Так как Земля получала бы всю ту энергию, какую излучает раскаленная оболочка, то излучения Земли и этой оболочки были бы одинаковы. Но оболочка излучает столько же, сколько Солнце; поверхность Земли излучала бы, значит, как Солнце, а в то же время в 188 000 раз больше, чем теперь. Температура (в кельвинах) пропорциональна корню четвертой степени из излучения; если излучение в 188 000 раз больше, то получается, что температура больше в  $\sqrt[4]{188\,000}$ , т. е. в 20,8 раза. Умножив 290 К (температуру земного шара) на 20,8, получаем около 6000 К. Такова была бы температура Земли. А так как температура ее равнялась бы тогда солнечной, то тем самым устанавливается и температура поверхности Солнца: около 6000 К, или около 5700° С.

Это рассуждение, напоминающее своими вспомогательными построениями доказательство геометрической теоремы, может служить примером того обходного пути, который ведет физиков от теории к познанию фактов, недоступных непосредственному опыту.

**196.** Многие, не задумываясь употребляют выражение «температура мирового пространства» в беспечной уверенности, что смысл этих слов им

известен и понятен. Они твердо убеждены, что температура мирового пространства равна  $-273^{\circ}\text{C}$  и что всякое тело в межпланетном пространстве, за пределами земной атмосферы, должно охладиться до абсолютного нуля.

Ни то, ни другое не верно. Надо помнить, во-первых, что пространство, не заполненное веществом, не может обладать никакой температурой. Термин «температура мирового пространства» имеет условный, а не буквальный смысл. Во-вторых, если бы все тела в мировом пространстве приобретали температуру  $-273^{\circ}\text{C}$ , то той же участи подлежал бы и земной шар, который представляет собой тело в мировом пространстве; между тем, температура поверхности Земли на 290 градусов выше абсолютного нуля.

Что же следует разуметь под выражением «температура мирового пространства»?

Это та температура, которую приняло бы абсолютно черное тело (см. ответ на в. 195), заслоненное от лучей Солнца и планет, т. е. нагреваемое только излучением звезд. К определению этой температуры подходили раньше разными путями и получали для нее разнообразные значения. Пулье считал наиболее вероятным значение  $-142^{\circ}\text{C}$ ; Фрелих, на основании других соображений, получил значение  $-129^{\circ}\text{C}$ . Наиболее же надежный результат дает расчет, основанный на измерении лучеиспускания звезд и на законе Стефана. Вычисление производится по той же знакомой читателю схеме, по которой определена была температура Солнца.

Установлено измерением, что совокупное излучение всех звезд половины небесной сферы в 5 000 000 раз меньше солнечного. Если бы небесный свод сиял, как Солнце, то излучение его было бы больше звездного в

$$\frac{5\,000\,000 \cdot 188\,000}{2} = 470\,000\,000\,000 \text{ раз.}$$

Земля, нагревая только лучами звезд, излучала бы энергии меньше, нежели Солнце, в 470 000 000 000 раз, а так как абсолютная температура пропорциональна корню четвертой степени из излучения, то температура Земли была бы меньше температуры солнечной поверхности в

$$\sqrt[4]{470\,000\,000\,000} = 700 \text{ раз.}$$

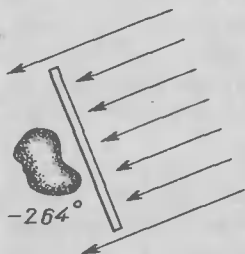


Рис. 123. Тело, помещенное в мировом пространстве на расстоянии 150 млн. км от Солнца и заслоненное от его лучей, приняло бы температуру  $-264^{\circ}\text{C}$  (в. 196).

Мы знаем, что абсолютная температура поверхности Солнца равна  $6000\text{ K}$ , поэтому Земля нагревалась бы звездами на  $6000:700$ , т. е. всего на  $9$  градусов выше абсолютного нуля, или до  $-264^{\circ}\text{C}$ . Это и есть температура мирового пространства (рис. 123).

В действительности, планета наша имеет среднюю температуру гораздо выше  $9\text{ K}$ , а именно  $290\text{ K}$ . Причина та, что Земля нагревается не только звездным светом, но и лучами Солнца. При отсутствии Солнца на земном шаре господствовал бы мороз в  $-264^{\circ}\text{C}$ .

Понятно теперь, что и всякий предмет, находящийся в межпланетном пространстве, но не заслоненный от солнечных лучей, примет температуру не  $-264^{\circ}\text{C}$ , а более высокую. Какую именно — зависит от теплопроводности этого тела, от его формы и от свойств его поверхности. Вот ряд примеров (заимствую их из книги проф. Оберта «Пути к звездоплаванию»), показывающие, до какой температуры должны нагреваться различные тела при указанных условиях.

а) Шарик диаметром  $1\text{ см}$  из металла, хорошо проводящего тепло, помещенный на расстоянии  $150$  миллионов километров от Солнца, в мировом пространстве нагревается до  $+12^{\circ}\text{C}$  (рис. 124).

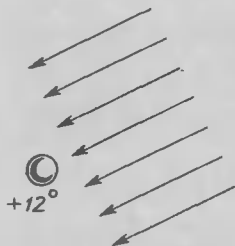


Рис. 124. Металлический сантиметровый шарик, освещаемый Солнцем на расстоянии  $150$  млн. км, нагрелся бы до  $+12^{\circ}\text{C}$  (в. 196).

б) Длинная тонкая проволока круглого сечения, помещенная там же перпендикулярно к лучам Солнца, нагреется до  $+29^{\circ}\text{C}$  (рис. 125). (Та же проволока, поставленная параллельно солнечным лучам, нагреется значительно меньше.) Всякое иное тело вытянутой формы, помещенное поперек солнечных лучей, должно принять температуру между  $+12$  и  $+29^{\circ}\text{C}$ .

в) Тонкая металлическая пластинка, помещенная перпендикулярно к солнечным лучам, нагрее-

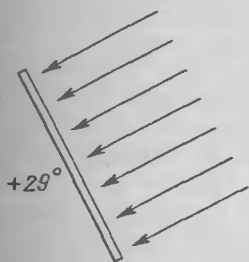


Рис. 125. Тонкая проволока, подставленная перпендикулярно лучам Солнца, нагрелась бы при тех же условиях до  $+29^{\circ}\text{C}$  (в. 196).

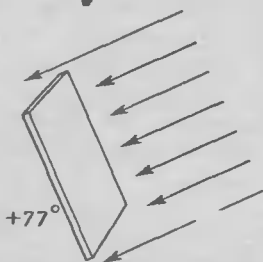


Рис. 126. Металлическая пластинка в такой же обстановке приобрела бы температуру  $+77^{\circ}\text{C}$  (в. 196).

ется в межпланетном пространстве (на расстоянии Земли) до  $77^{\circ}\text{C}$  (рис. 126). Если теневая сторона пластинки светлая и полированная, а обращенная к Солнцу — черная и матовая, то температура ее достигает  $+147^{\circ}\text{C}$ .

Можно спросить, почему же подобный металлический лист на земной поверхности никогда так значительно не нагревается? Потому, что на Земле лист окружен воздухом, и воздушные течения (конвекция) уносят часть тепла, препятствуя его накоплению. На Луне, где атмосфера отсутствует, подобная температура достигается: мы знаем, как значительно нагреваются в течение лунного дня экваториальные части Луны. Если односторонне зачерненную пластинку повернуть темной поверхностью от Солнца, а полированной — к Солнцу, температура установится более низкая:  $-38^{\circ}\text{C}$ .

Соображения эти практически важны для учета температурных условий в кабине стратостата и особенно для звездоплавания. Пикар во время первого своего подъема на высоту 16 км в кабине, окрашенной наполовину в черный цвет, наполовину в белый, очутился (вследствие неисправности поворотного механизма) обращенным черной стороной к Солнцу; и хотя вне алюминиевой кабины стоял мороз в  $55^{\circ}\text{C}$ , ученый жестоко страдал от жары.

В том, что температура тел при солнечном сиянии может достигать высоких значений даже при весьма низкой температуре окружающей среды, имели случай убедиться участники экспедиции на Южный полюс

1928—1930 гг. «Любопытно отметить, что при обычно низкой температуре воздуха, редко выше  $-18^{\circ}\text{C}$ , — пишет Байрд, — наш актинометр (прибор для измерения энергии солнечного излучения) показывал температуру иногда около  $46^{\circ}$  выше нуля Цельсия.» Этим пользуются и для промышленных целей. В Ташкенте устроен (геофизиком К. Г. Трофимовым) собиратель солнечного тепла, который — без всяких линз и зеркал — повышает температуру до  $200^{\circ}\text{C}$ . В Самарканде тем же способом вода доводилась до кипения лучами Солнца, несмотря на то, что температура воздуха была на 14 градусов ниже нуля.

Поразительно высокой температуры может достигнуть в мировом пространстве тело, обладающее избирательным поглощением, т. е. поглощающее не все падающие на него лучи (как абсолютно черные тела), а лишь лучи определенной длины волны. Вычислено, например (французским астрономом Фабри), что тело, поглощающее только синие лучи с длиной волны 0,004 мм, помещенное в мировом пространстве на орбите Земли, приобрело бы температуру около  $2000^{\circ}\text{C}$ : платина, покрытая слоем такого вещества, расплавилась бы под действием солнечных лучей. Возможно, что подобными свойствами вещества объясняется свечение комет при их приближении к Солнцу.

**197. Магнитный сплав.** Существует ли металл, намагничивающийся сильнее железа?

**198. Деление магнита.** Намагниченная спица разломана на мелкие части. Какой из полученных обломков окажется намагничен сильнее — находившийся ближе к концам спицы, или ближе к середине?

**199. Железо на весах.** На чувствительных весах уравновешены железный брусок и медная гиря (см. рис. 127). Учитывая действие земного магнетизма, можно ли признать массы бруска и гири строго равными?

**200. Электрическое и магнитное притяжение и отталкивание.**

а) Легкий бузиновый шарик притягивается палочкой. Значит ли это, что палочка наэлектризована? А если бузиновый шарик от палочки отталкивается?

б) Железная палочка притягивает стальную иглу. Значит ли это, что палочка намагничена? А если иголка от палочки отталкивается?



Рис. 127. Задача о железном бруске на весах (в. 199).

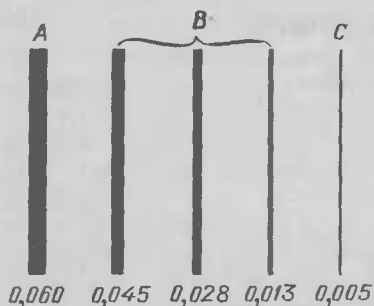


Рис. 128. Толщина нитей накала *B* по сравнению с толщиной человеческого волоса *A* и нити паутинны *C* (в. 206).

**201. Электроемкость человеческого тела.** Как приблизительно велика электроемкость человеческого тела?

**202. Сопротивление нитей накала.** Электрическое сопротивление нити накала в нагретом состоянии иное, чем в холодном. Как велика эта разница, например, для 50-ваттной пустотной лампы?

**203. Электропроводность стекла.** Проводит ли стекло электрический ток?

**204. Вред от частого включения электрических лампочек.** Для некоторых родов электрических лампочек вредно частое выключение. Почему?

**205. Яркость электрических лампочек.** Какой силы свет дает газонаполненная электрическая лампа в 50 ватт?

**206. Нить накала.** Нити накала электрической лампочки, когда она не под током, настолько тонки, что едва различаются невооруженным глазом (рис. 128).

Почему же они заметно утолщаются под током?

**207. Длина молнии.** Какой длины молния?

**208. Смертельный ток.** Для человека, безусловно, смертелен ток силою уже в 0,1 А. Ток осветительной сети (в комнатной проводке) в несколько раз сильнее 0,1 А. Почему же он не всегда убивает человека?

**209. Длина отрезка.** Отрезок был измерен дважды. В первый раз для его длины было получено значение 42,27 мм, во второй—42,29 мм.

Какова истинная длина отрезка?

**210. Почему вода долбит камень?** Как объясняете Вы то, что «капля долбит камень»?

Ведь чтобы оставить хотя бы ничтожный след на поверхности камня, надо действовать на нее телом, твердость которого больше твердости камня. Но вода не тверже камня,—как же может она «долбить» его?



**211. Назначение «Дубинушки».** Для чего поют «Дубинушку» при работе на ручном копре (рис. 129).

Какая опасность угрожала бы рабочим, если бы они работали на копре молча?

**212. Два города.** Из викторины Эдисона:

«Два города, расположенные на разных берегах реки в миле (1,6 км) друг от друга, остались после стихийного бедствия без взаимного сообщения. Как восстановили бы Вы связь между этими городами, не пользуясь услугами электричества? Переправиться через эту реку для человека невозможно.»

**213. Бутылка на дне океана.** На глубине 1 км затонула в море незакупоренная бутылка. Как изменится вместимость бутылки под давлением воды — увеличится или уменьшится?

**214. Плитки Иогансона.** Для точных измерений употребляются в технике стальные бруски, называемые «плитками Иогансона»<sup>\*)</sup>. Приложенные

друг к другу плитки эти (рис. 130), хотя они не намагничены и ничем не скреплены, держатся вместе очень прочно. Почему?

**215. Свеча в закрытой банке.** Вот взятое из детского (инострального) журнала описание опыта, цель которого — продемонстрировать атмосферное давление:

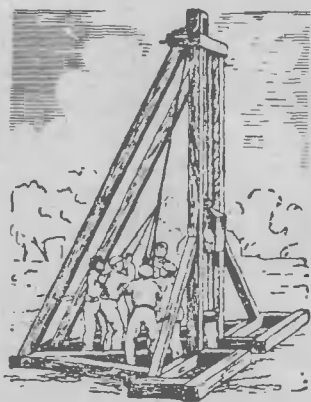


Рис. 129. Для чего поют «Дубинушку» (в. 211)?

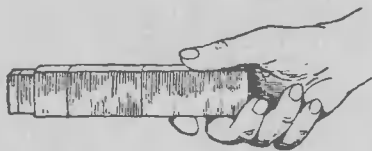


Рис. 130. Почему эти бруски держатся вместе (в. 214)?

<sup>\*)</sup> В СССР плитки Иогансона изготавливаются ленинградским заводом «Красный инструментальщик», самостоятельно освоившим это производство, несмотря на то, что секрет изготовления строго охранялся шведским заводом Иогансона (ныне приобретенным Фордом).

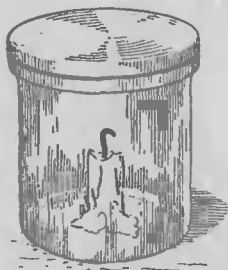


Рис. 131. Опыт со свечой в банке (в. 215).

«Горящий огарок свечи укрепляют на дне стеклянной банки и, когда пламя погорит некоторое время, накрывают банку крышкой, проложив между их краями увлажненное резиновое кольцо. Пламя тускнеет и вскоре гаснет (рис. 131). Попробуйте тогда оторвать крышку от банки—это удастся Вам лишь при значительном усилии.

Причину явления легко понять. Пламя потребляет кислород, запас которого в герметически закрытой банке ограничен. Когда он расходуется весь, пламя гаснет. Оставшаяся часть воздуха, заняв больший объем, разрежается и давит слабее. Избыток наружного давления и прижимает так сильно крышку к банке.»

Находите ли Вы это объяснение правильным?

**216. Хронология термометрических шкал.** Какой термометр появился раньше: Цельсия, Фаренгейта или Реомюра?

**217. Изобретатели термометров.** Какой национальности были Цельсий, Реомюр и Фаренгейт?

**218. Масса земного шара.** Из научно-популярной книжки:

«На основании некоторых измерений ученые узнали, что плотность всего земного шара равна приблизительно  $5\frac{1}{2}$ ; объем же его известен, так как измерен его поперечник. Умножая этот объем на  $5\frac{1}{2}$ , ученые и нашли, чему равна масса Земли.»

Правильно ли указан здесь путь, каким определена была масса земного шара?

**219. Движение солнечной системы.** В одном из сборников физических задач имеется следующая:

«Астрономы считают, что наша Солнечная система летит со скоростью около 17 км в секунду по направлению к созвездию Лиры. Какие явления можно было бы заметить на Земле, если бы это движение было не равномерным, а ускоренным или замедленным?»

Дайте ответ.

**220. К полету на Луну.** После прочтения мною доклада о ракетных полетах в мировом пространстве мне было высказано молодым астрономом такое возражение:

«Вы упускаете из виду существенное обстоятельство, делающее достижение Луны в ракетном корабле совершенно безнадежным предприятием. Масса ракеты — по сравнению с массой небесных тел — исчезающе мала, а ничтожные массы получают огромные ускорения под действием сравнительно малых сил, которыми при других условиях можно было бы пренебречь. Я имею в виду притяжение планет — Венеры, Марса, Юпитера. Оно, конечно, крайне невелико, но ведь масса ракеты практически равна нулю, и для такой массы действие таких небольших сил должно быть чрезвычайно ощутимо. Они породят огромные ускорения — ракета будет метаться в мировом пространстве по самым фантастическим путям, откликаясь на притяжение каждого, сколько-нибудь массивного тела, и в своем блуждании никогда на Луну не попадет.»

Ваше мнение, читатель?

**221. Человек в среде без тяжести.** Вот еще одно возражение против осуществимости межпланетных перелетов. Астроном, разбирая (в известном сборнике «Успехи и достижения современной науки и техники») условия пребывания человека в среде без тяжести, высказал следующее соображение:

«Наш организм очень чутко реагирует на всякое нарушение в этом отношении. Попробуйте побывать некоторое время с опущенной головой или с поднятыми вверх ногами. Наступающие расстройства кровообращения бывают очень серьезны. Если так действует изменение направления силы тяжести, то как же должно действовать ее отсутствие?»

Что скажете Вы о логике этого довода?

**222. Третий закон Кеплера.** Третий закон Кеплера формулируется в разных руководствах различно. В одних утверждается, что квадраты времен обращения планет и комет относятся как кубы их средних расстояний от Солнца. В других — что они относятся как кубы больших полуосей их орбит.

Какая формулировка правильна?

**223. Вечное движение.** Если бы планеты обращались вокруг Солнца по строго круговым орбитам, они не совершали бы, очевидно, никакой механической работы, так как не удалялись бы от притягивающего их тела. Дело не меняется и при эллиптической орбите, например для случая обращения Земли вокруг Солнца. Действительно, переходя из точек эллипса, близких к Солнцу, к точкам, более удаленным от него, Земля затрачивает энергию на преодоление притяжения Солнца; но расход этот возвращается полностью, когда Земля приходит в прежнее место. В итоге, кружась вокруг Солнца, Земля не расходует энергии, и такое движение может длиться неопределенно долго.

Мы приходим к заключению, что обращение планет представляет собой пример подлинного вечного движения. Но если так, то почему же физика утверждает, что вечное движение невозможно?

**224. Человеческий организм и тепловая машина.** Укажите основания, дающие право рассматривать живой человеческий организм как тепловую машину.

**225. Свечение метеоров.** Почему светятся метеоры?

**226. Туманы в фабричных районах.** В фабрично-заводских районах туманы бывают чаще, чем в окружающих лесистых или земледельческих местностях. (Лондонские туманы вошли в поговорку.)

Чем это объяснить?

**227. Дым, пыль и туман.** Какая разница между туманом, дымом и пылью?

**228. Скорость молекул воды.** Где молекулы движутся быстрее: в водяном паре при  $0^{\circ}\text{C}$ , в жидкой воде при  $0^{\circ}\text{C}$  или во льду при  $0^{\circ}\text{C}$ ?

**229. Тепловое движение при  $-273^{\circ}\text{C}$ .** Какова приблизительно скорость теплового движения молекул водорода при  $-273^{\circ}\text{C}$ ?

**230. Абсолютный нуль.** Достижим ли абсолютный нуль?

**231. Вакуум.** Что такое вакуум?

**232. Средняя температура всего вещества.** Какова по приблизительной оценке средняя температура вещества во всем мире?

**233. Десятимиллионная доля грамма.** Можно ли видеть невооруженным глазом одну 10-миллионную долю грамма вещества?

**234. Число Авогадро.** Если взять какое-либо вещество в количестве одного моля, т. е. такое число его граммов, которое равно молекулярной массе этого вещества (например, 2 г водорода или 32 г кислорода), то во взятой порции всегда окажется одно и то же число молекул, именно — 66 с 22 нулями ( $66 \cdot 10^{22}$ ). Число это носит в физике название «постоянная Авогадро».

Вообразите, что имеется такое число не молекул, а булавочных головок. Вы желаете заказать ящик для вмещения этой кучи головок. Высота ящика назначена Вами в 1 км.

Каковы приблизительно будут размеры его основания?

Поместился ли бы такой ящик в пределах Ленинграда?

**235. Литр спирта в океане.** Если в океан вылить литр спирта, то молекулы спирта распределятся по всей водной массе Мирового океана.

Сколько приблизительно понадобится зачерпнуть в океане литров воды, чтобы выловить одну молекулу спирта?

**236. Расстояние между молекулами.** Во сколько приблизительно раз среднее расстояние между молекулами водорода при  $0^\circ \text{C}$  и нормальном давлении больше поперечника самой молекулы?

**237. Масса атома водорода и масса Земли.** Укажите «на глаз», как велик неизвестный член пропорции

$$\frac{\text{масса атома водорода}}{x} = \frac{x}{\text{масса земного шара}}?$$

**238. Величина молекулы.** Какой приблизительно величины были бы молекулы, если бы все тела на Земле увеличились линейно в миллион раз?

**239. Электрон и Солнце.** Чему приблизительно равен  $x$  в пропорции

$$\frac{\text{«диаметр» электрона}}{x} = \frac{x}{\text{диаметр Солнца}}?$$

**240. Весомость энергии.** Как надо понимать утверждение новейшей физики, что энергия обладает массой?

**241. Школьная механика и теория относительности.** Как надо смотреть на школьную механику в свете современного учения об относительности?

Остается ли она в силе?

**242. Литр и кубический дециметр.** Что больше: литр или кубический дециметр?

**243. Вес паутиной нити.** Сколько примерно должна была бы весить паутиная нить длиной от Земли до Луны?

Можно ли такой груз удержать в руках? А увезти на телеге?

**244. Бутылки и пароходы.**

а) Два парохода идут по реке в одну сторону с различными скоростями. В тот момент, когда они поровнялись, с каждого парохода была брошена в воду бутылка. Спустя четверть часа пароходы повернули обратно и с прежними скоростями направились к покинутым бутылкам.

Который из пароходов дойдет до бутылки раньше — быстрый или медленный?

б) Решить ту же задачу при условии, что пароходы первоначально шли навстречу один другому.

**245. Приседание на весах.** Стоя на платформе уравновешенных десятичных весов, человек присел. Куда качнулась платформа в момент приседания — вниз или вверх?

**246. Затяжной прыжок.** Я получил ряд писем с выражением недоумения по поводу затяжного прыжка мастера парашютного спорта Евдокимова, поставившего мировой рекорд 1934 г. Евдокимов падал в течение 142 с с нераскрытым парашютом и, лишь пролетев 7900 м, дернул за кольцо. Это никак не согласуется с законами свободного падения тел. Нетрудно убедиться, что если парашютист свободно падал 7900 м, то он должен был затратить не 142 с, а всего лишь 40 с. Если же он свободно падал 142 с, то должен был бы пролететь не 7,9 км, а около 100 км.

Как разрешается противоречие?

**247. Два шара.** Один из двух одинаковых шаров катится по наклонной плоскости, другой — по краям

двух параллельных треугольных досок. Угол наклона и высота, с которой началось движение, в обоих случаях одинаковы.

Который из шаров раньше достигнет конца наклонного пути?

**248. Сверхускоренное падение.** Вообразите, что на доске, могущей скользить отвесно вниз в прорезях двух стоек, имеются:

- 1) цепь, прикрепленная концами к доске;
- 2) маятник, отведенный в сторону от положения равновесия;

- 3) открытый флакон с водой, прикрепленный к доске.

Что произойдет с этими предметами, если доска станет скользить вниз с ускорением  $g_1$ , большим ускорения  $g$  свободного падения?

**249. Распространение жизни в мировом пространстве.** В стабильном учебнике для 9-го года обучения «Основы эволюционного учения» излагается теория переноса зародышей через мировое пространство давлением световых лучей и, между прочим, сообщается:

«Аррениус подсчитал, что для передвижения живых зародышей потребовалось бы 20 дней, чтобы зародыши попали на Землю с Марса, 14 месяцев — с Нептуна».

Цитата явно ошибочна. Почему?

**250. На эскалаторе.** Эскалатор на одной из станций Московского метрополитена поднимается от уровня станции до входа за 1 мин 20 с. Пассажир, взбираясь по ступеням неподвижного эскалатора, может пройти тот же путь за 4 мин.

За сколько времени поднимается от станции до входа пассажир, если он будет взбираться по ступеням поднимающегося эскалатора?

#### ОТВЕТЫ НА ВОПРОСЫ 197—241

**197.** Металл, намагничивающийся при равных прочих условиях сильнее, чем железо, существует. Это сплав, называемый пермиваром и состоящий из никеля (45%), кобальта (25%) и железа (30%). Магнитная проницаемость пермивара вдвое больше, чем железа.

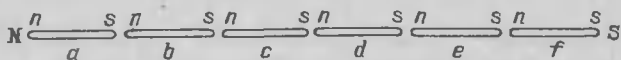


Рис. 132. Какой обломок намагниченной спицы сильнее притягивает (в. 198)?

**198.** Так как сила магнита заметно убывает с приближением к нейтральной линии, то можно ожидать, что обломки, взятые из середины магнита, будут намагничены весьма слабо. Это, однако, не оправдывается: части, взятые ближе к середине, оказываются намагниченными сильнее.

Причину нетрудно понять, если представить себе длинный магнит разрезанным поперек на несколько частей (рис. 132). Каждая из частей представляет собою магнетик с двумя полюсами, ориентированными, как показано на рисунке. Если бы магнетик *a* был сильнее магнетика *b* (как кажется естественным ожидать), то южный полюс *s* магнетика *a* с избытком уравновесил бы действие северного полюса *n* магнетика *b*, и вообще все южные полюсы отдельных магнетиков северной половины нашего магнита уничтожили бы действие северных полюсов — и в итоге остался бы некоторый избыток действия южного магнетизма. Короче говоря, на этом конце нашего магнита был бы не северный полюс, а южный. Противоречия не получится при допущении, что сила отдельных магнетиков возрастает с приближением к нейтральной линии.

**199.** «Земной шар — гигантский магнит; чашка с железом должна бы поэтому притягиваться Землей сильнее, чем чашка с медной гирей, и, следовательно, масса гири не будет равна массе железного бруска».

Рассуждая так, упускают из виду огромные размеры земного шара по сравнению с размерами бруска и вытекающие отсюда следствия. Магнит ведь не только притягивает железо, но одновременно и отталкивает его: если приблизить к куску железа северный полюс, то на ближайшем к нему конце железного куска возникает южный полюс, притягиваемый северным полюсом магнита, а на дальнем конце — северный полюс, отталкиваемый северным полюсом магнита. Из двух сил — притягивающей и отталкивающей — преобладает первая, так как расстояние между разноименными полюсами меньше, чем между одно-



именными. Южный полюс магнита также производит на железо два противоположных действия, но и в этом случае притяжение сильнее отталкивания.

Так происходит, если действует магнит обычных размеров. В случае исполинского магнита, каким является земной шар, дело меняется. Железный брусок, лежащий на весах, в поле земного магнетизма тоже получает два полюса — но тут нельзя уже утверждать, что один полюс притягивается ближайшим магнитным полюсом Земли сильнее, чем другой: разница в расстояниях так ничтожна, что практически никакого различия в силе взаимодействия обнаружить не может. Что значит расстояние между полюсами железного бруска (несколько сантиметров или дециметров) по сравнению с расстоянием от них до магнитного полюса Земли (несколько тысяч километров)?

Итак, железный брусок, уравновешенный на весах, по массе равен гилям. Влияние на точность взвешивания земной магнетизм оказывать не может.

По той же причине намагниченная железная полоска на пробке, положенной в воду, не плывет по направлению к ближайшему магнитному полюсу Земли, а только поворачивается, располагаясь в плоскости магнитного меридиана: две равные, противоположно направленные параллельные силы не могут сообщить телу поступательного движения, а способны лишь повернуть его вокруг оси.

**200.** а) То, что бузиновый шарик притягивается палочкой, не является верным признаком наэлектризованного состояния палочки. Ненаэлектризованная предварительно палочка также притянет к себе легкий шарик, если он наэлектризован. Притяжение доказывает, что либо палочка, либо шарик наэлектризованы. Напротив, если между шариком и палочкой мы замечаем отталкивание, можно с уверенностью заключить, что наэлектризованы оба тела: отталкивать друг от друга могут только два одноименно наэлектризованных тела.

б) Подобным же образом обстоит дело и с магнитами. Если железная палочка притягивает иголку, то утверждать, что палочка намагничена, нельзя: ненамагниченное железо также притягивает иголку, если последняя намагничена.

**201.** Когда человек помещается так, что тело его не находится в соседстве с заземленным проводником (удалено, например, от стен комнаты), то электрическая емкость его равна 30 «сантиметрам». Это значит, что электроемкость человеческого тела при указанных условиях равна емкости шарообразного проводника радиусом 30 см.

**202.** В то время как для угольного волоска сопротивление уменьшается с повышением температуры, для нити металлической имеет место обратное: сопротивление ее увеличивается, и притом весьма значительно. Нить 50-ваттной пустотной лампы в накаливаемом состоянии представляет сопротивление в 12—16 раз большее, чем холодная.

**203.** Стекло не всегда изолятор: в накаливаемом состоянии оно становится проводником электричества. Если нагревать на спиртовке участок стеклянной палочки или трубки длиной 1—1,5 см, включенной в цепь городского электроосветительного тока, то спустя некоторое время, когда стекло достаточно нагреется, через цепь будет проходить ток. Включенная в цепь электролампочка засветится.

**204.** Частое включение и выключение вредно для лампочек с вольфрамовым волоском. Металлическая нить накала в холодном состоянии поглощает следы газа, оставшиеся в колбочке лампы после откачки. В накаливаемом состоянии нить снова выделяет поглощенный газ; вырываясь из нити, газ разрушает ее.

**205.** Распространено мнение, будто газонаполненные («полуваттные») лампы расходуют по полватта на каждую свечу; обычно считают поэтому, что 50-ваттная газонаполненная лампа дает силу света в 100 свечей.

Это неверно: «Никогда,— утверждает пояснительная записка к общесоюзному стандарту,— «ваттные» лампы даже лучших зарубежных фирм не потребляли ватт на среднюю сферическую международную свечу, так же как никогда «полуваттные» лампы не потребляли на свечу полуватта». 50-ваттная газонаполненная лампа при напряжении в 110—120 вольт дает всего лишь 38, самое большее—43 свечи, и то только пока лампа нова; к концу службы сила ее света падает до 30 свечей.

Термин «полуваттная» лампа является поэтому крайне неудачным, вводящим в заблуждение. В настоящее время специалисты от него отказались, заменив термином «газополная», в отличие от ламп «пустотных» (прежних «ваттных»).

**206.** Безусловно верно, что в накалинном состоянии нити накала кажутся раздувшимися в десятки раз. Но никак нельзя приписывать столь значительное утолщение нити тепловому расширению. Коэффициент расширения металлов измеряется сотысячными долями; поэтому увеличение поперечника при повышении температуры до 2000°С может составить всего несколько процентов, т. е. значительно меньше, чем мы замечаем.

В действительности нити накала вовсе и не утолщаются больше чем на несколько процентов. Наблюдаемое утолщение в десятки раз — иллюзия зрения: вследствие так называемой иррадиации белые участки кажутся нам всегда больше их истинных размеров. Чем ярче предмет, тем большей величины он нам представляется. Так как яркость накалинной нити в лампочке весьма велика, то и кажущееся утолщение ее очень значительно: нить, истинный поперечник которой составляет всего около 0,03 мм, кажется нам толщиной не менее миллиметра, т. е. как бы раздувается раз в 30.

**207.** О размере молний редко кто имеет правильное представление. Длина их измеряется не метрами, а километрами. Наблюдался случай, когда молния имела в длину 49 км.

**208.** Сила тока в осветительной сети достигает 0,5 А, но — только до тех пор, пока в цепь не включилось человеческое тело. Включение последнего значительно понижает силу тока, так как сопротивление нашего тела весьма велико: оно колеблется от сотни до нескольких десятков тысяч омов, т. е. может далеко превосходить сопротивление всей телеграфной линии Москва — Ленинград. Введение в цепь столь значительного сопротивления, естественно, понижает силу тока в ней, и он становится почти безвредным для организма.

Случается, что ток напряжением до 5000 вольт не причиняет человеку никакого вреда — так велико бывает

в некоторых случаях сопротивление человеческого тела. Но большой оплошностью было бы заключать отсюда, что можно безбоязненно подставлять свое тело действию тока осветительной сети (110 вольт). Следует помнить, что сопротивление человеческого тела не есть величина постоянная; она колеблется в зависимости от многих причин, предусмотреть которые невозможно. Поэтому и ток сравнительно невысокого напряжения может неожиданно оказаться весьма вредоносным. Установить определенный вольтаж, превысив который ток становится опасным,—нельзя.

**209.** Многие привыкли к мысли, что истинная длина измеряемой величины есть средне-арифметическое результатов отдельных измерений. Поэтому на поставленный нами вопрос чаще всего приходится слышать уверенный ответ: истинная длина отрезка равна

$$\frac{42,27 + 42,29}{2} = 42,28 \text{ мм.}$$

Это неверно: полученная таким образом величина является лишь наиболее вероятным значением длины отрезка, а никак не подлинной его длиной. Какова истинная длина—установить по этим данным невозможно; она может, конечно, равняться наиболее вероятной длине, но может и отличаться от нее.

**210.** Чистая вода, падая на камень, не оставляет на его поверхности ни малейшего следа, сколько бы лет или тысячелетий ни длился такой процесс. Совокупность большого числа нулей не составляет величины больше нуля; поэтому огромная длительность падения воды на камень сама по себе никакого действия не производит. И если бы падающая вода была абсолютно свободна от примесей, она не «долбила» бы камень. Но вода в природе всегда содержит в большем или меньшем количестве твердые частицы (например, кварцевого песка), способные оставлять следы. Как ни слабы эти следы, они, налагаясь один на другой в течение весьма большого периода времени, производят заметные разрушения.

Следовательно, не вода долбит камень, а те твердые незаметные для глаза частицы, которые она несет с собою.

**211.** Обычно думают, что «Дубинушка» определяет лишь надлежащий ритм работы, обеспечивая согласное напряжение сил и правильную периодичность работы и отдыха. «Профессор Герман,— читаем мы в «Лекциях по практической механике» профессора Н. Б. Делоне,— приводит следующее наблюдение: 4 работника поднимали за 4 рукоятки бабу в 50 кг и опускали ее. Всякий раз поднимали на высоту 1,25 м. Производили 34 подъема в минуту: но при этом после каждых 260 секунд работы следовал отдых в 260 секунд. Получалась высокая работа:  $A = 178\,520 \text{ кгс} \cdot \text{м}$ . У нас вместо 260 секунд служит песня «Дубинушка».»

Теперь копры старого устройства уже не употребляются. Песня сложилась для прежней системы копров, где спуск бабы производился освобождением веревки. При работе такого копра песня играет более важную роль, чем одно лишь регулирование наивыгоднейшего ритма. Она предохраняет рабочих от серьезной опасности. Вспомним, что вес бабы всегда должен быть меньше веса тянущих ее рабочих—иначе она при падении потянет их вверх. Что же может произойти, если рабочие выпустят из рук веревку не все одновременно? Тогда легко может оказаться, что баба перевесит рабочих, держащих веревку, и те, кто не успели вовремя ее выпустить, будут увлечены вверх. Им грозит опасность расшибиться либо при ударе о стойки копра, либо при неизбежном падении с высоты (а чаще всего—от обеих причин).

Итак, песня «Дубинушка» определяла сигналом «сама пойдет» тот ответственный момент работы, когда все должны разом освободить веревку, чтобы не быть стремительно поднятыми тяжелой бабой на верхушку копра. В современных ручных копрах баба, дойдя до высшей точки своего подъема, автоматически освобождается от привязи и сама падает вниз. Здесь опасности быть вздернутым вверх нет, и песня утрачивает указанное выше значение.

**212.** Можно предложить разные способы решения этой, надо признать, довольно туманно сформулированной Эдисоновой задачи. Если речь идет об установлении между городами возможности переговариваться, то простым выходом из положения является устройство оптического телеграфа—световой сигнализации, дневной или ночной. Если же желательно

пересылать через реку почтовые или иные грузы. то возможно устроить подвесную дорогу, перебросив с одного берега на другой конец легкой бечевки с помощью ракеты достаточного калибра.

**213.** Может казаться совершенно бесспорным, что вместимость бутылки не должна несколько измениться, так как давление жидкости с равной силой передается на наружную и на внутреннюю поверхности стеклянной оболочки. Между тем, такое заключение оказывается неверным: бутылка сожмется, и вместимость ее уменьшится. Читатель поймет основания такому утверждению, если проследит за следующим рассуждением знаменитого физика Г. А. Лоренца в его «Курсе физики». Рассматривая давление газа на полый шар, он пишет:

«Безразлично, каким именно образом производить давление на внутреннюю поверхность шара. Представим себе поэтому, что для осуществления давления мы вводим в полость шара ядро из такого же вещества, как и стенки, и настолько хорошо к ним прилегающее, что оно образует с ними одно целое. Если теперь произведем на наружную поверхность давление  $p$ , то такое же давление возникает и во всех точках внутри шара: стенки будут с обеих сторон подвержены одинаковому давлению. Но все измерения тела уменьшаются при этом в отношении, которое можно вычислить по коэффициенту сжимаемости. Мы приходим к следующему заключению:

Если полый шар или сосуд произвольной формы подвергается с наружной и внутренней стороны давлению  $p$ , то объем полости уменьшается настолько же, насколько уменьшился бы объем ядра из того же вещества, заполняющего полость, если бы мы подвергли его такому же давлению.»

Сделаем примерный расчет. Объем тела при всестороннем сжатии уменьшается под действием давления  $p$  на

$$\Delta V = V \frac{3(1-2k)}{E} p,$$

где  $k$  — коэффициент растяжения,  $E$  — модуль упругости.

Для стекла  $k=0,3$ ,  $E=6 \cdot 10^{10}$  (единицах СИ). Поэтому в случае стеклянной бутылки вместимостью 1 л,

или  $10^{-3} \text{ м}^3$ , уменьшение полости под давлением водяного столба в 1000 м ( $10^7 \text{ Н/м}^2$ ) равно

$$10^{-3} \cdot 10^7 \cdot \frac{3(1-0,6)}{6 \cdot 10^{10}} = 0,2 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3 = 0,2 \text{ см}^3.$$

Парадоксальный факт уменьшения вместимости сосуда под давлением, одинаково распространяющимся на внешнюю и внутреннюю поверхности, представляется обычно настолько невероятным, что многие не мирятся с ним даже и ознакомившись с его обоснованием. Поэтому не лишним будет, пожалуй, привести здесь ход рассуждений из превосходного курса «Общей физики» Эд. Эдзера — по существу тот же, что у Лоренца, но высказанный в несколько иной форме:

«Изменение внутреннего объема сосуда, производимое действием равномерно сжимающей силы, отнесенной к единице площади,  $f$ , приложенной внутри и снаружи сосуда (назовем эту силу напряжением), можно определить, сравнивая полый сосуд со сплошным сосудом того же материала и тех же самых размеров, который подвергается внешнему равномерно сжимающему напряжению  $f$ . Полый сосуд можно мысленно превратить в сплошной, заполняя его сплошным ядром того же материала, как и стенки. Так как сжимающее напряжение действует равномерно во всей толще твердого тела, то величина сжатия каждой частицы будет пропорциональна этому напряжению  $f$ . Ядро сплошь заполняет оболочку, и оно сжато той же силой, как и сама оболочка. Значит, деформация оболочки обусловлена лишь действием напряжения  $f$  (действующим снаружи и изнутри — от ядра). Итак, деформация оболочки не зависит от того, действует ли на ее внутреннюю поверхность давление, исходящее от ядра или от наполняющей ее жидкости, и поэтому уменьшение емкости сосуда в точности равно уменьшению объема ядра.»

Отмеченный факт приходится учитывать при точных измерениях, например при определении модуля объемной упругости жидкости прибором Ренью.

**214.** При появлении плиток Иогансона их способность прочно держаться вместе объясняли давлением атмосферы. Предполагали, что между приложенными друг к другу гладкими поверхностями нет

воздуха. Взгляд этот пришлось оставить, когда измерена была сила, необходимая для отрыва одной плитки от другой, и выяснилось, что сила эта равна 3—6 кгс/см<sup>2</sup> и более. Атмосферное давление не может противодействовать такой силе.

Истинная причина слипания плиток кроется в молекулярном сцеплении между тесно прилегающими стальными поверхностями, где всегда имеются следы влаги. Прилегающие грани отшлифованы настолько тщательно, что, примкнутые друг к другу, они нигде не отстоят одна от другой более чем на 0,2 мкм (0,0002 мм)\*). Абсолютно сухие поверхности, впрочем, не слипаются; но достаточно ничтожных следов влаги (она берется из воздуха), чтобы плитки слиплись очень крепко: бруски сечением 1×3,5 см разъединяются лишь при усилии 30 и более килограммов и выдерживают удары, не распадаясь.

**215.** Объяснение опыта неправильно. Взамен кислорода, потребляемого при горении, появляется углекислый газ — по одной молекуле углекислого газа на каждую молекулу кислорода. Одинаковое число молекул всегда занимает при равном давлении одинаковый объем (закон Авогадро). Значит, потребление кислорода само по себе не может изменить объема газа, находящегося в банке.

Истинная причина наблюдаемого явления другая — не химическая, а физическая. Воздух внутри банки действительно разрежается при горении свечи, но не вследствие потребления кислорода, а вследствие нагревания. Часть расширяющегося газа удаляется наружу, пока не установится равенство давлений холодного наружного воздуха и теплого внутри банки. Когда свеча из-за недостатка кислорода гаснет, воздух в банке остывает, давление его уменьшается, и избыток наружного давления прижимает крышку.

Всем известное видоизменение этого опыта, при котором стакан с горящей бумажкой опрокидывается

---

\*) На заводе «Красный инструментальщик» изготавливаются плитки с еще большей точностью — 0,1 мкм! Потребность в столь точных измерительных приборах обусловлена исключительной точностью, с какой обрабатываются теперь детали многих машин. Если при обработке даже крупного вала 60-сильного челябинского трактора не допускается отклонение свыше 0,01 мм (вал весит около полутонны), то какова должна быть точность обработки частей более тонких механизмов!



над тарелкой с водой и вбирает в себя воду, также нередко ошибочно объясняется потреблением кислорода. Оно приводится зачастую методистами природоведения в качестве доказательства сложного состава воздуха. Такие авторы утверждают даже, что вода в стакане «всегда поднимается до  $1/5$  высоты, соответственно содержанию кислорода в воздухе», хотя такого постоянства никто не наблюдал и наблюдать не мог.

Настолько распространено это заблуждение, показывает следующий поучительный факт. Историк естествознания Фр. Даннеман в своем труде «Естественные науки в их развитии и взаимной связи» (1910 г.) пишет:

«Рис. 133 изображает всасывающую свечу Филона. В сосуде *a* находятся вода и горящая свеча. Над ними опрокинут сосуд *d*. „Вода,— говорит Филон,— тотчас начинает подниматься. Происходит это оттого, что воздух в *d* выгоняется движением огня. Вода поднимается в объеме, отвечающем объему выгнанного воздуха.»

Что всегда исчезает одно и то же количество воздуха, ускользнуло от наблюдения древнего физика. Тем не менее мы имеем здесь уже один из тех опытов, которые в XVIII веке сделаны были Шееле и другими для доказательства того, что воздух составлен из двух различных газов.»

Как видим, верное по существу объяснение древнего физика объявляется здесь неправильным; а то, что ему противопоставляется, фактически и теоретически неверно.

Что же касается упомянутых Даннеманом опытов Шееле, то старинный химик обставлял их иначе, чем Филон,—именно так, что газообразной углекислоты взамен удаляемого кислорода не появлялось, она либо поглощалась, либо же вовсе не получалось: а продуктом реакции было тело твердое (например, при горении фосфора).

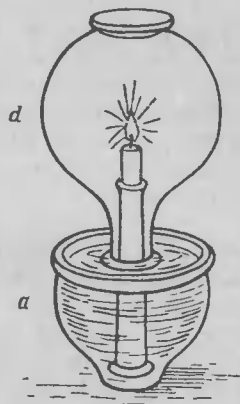


Рис. 133. Опыт Филона с горящей свечой (в. 215).

**216.** Из трех термометров — Цельсия, Реомюра и Фаренгейта — первым был изобретен термометр Фаренгейта в начале XVIII века. За ним появились термометры Реомюра (1730 г.) и Цельсия (1740 г.).

**217.** Так как термометр Фаренгейта получил распространение в Англии и Америке, а Цельсия — во Франции, то многие привыкли считать Фаренгейта англичанином, а Цельсия — французом. На самом деле Фаренгейт — немец, живший в Данциге, Цельсий — шведский астроном, Реомюр — французский естествоиспытатель.

**218.** Во многих популярных книгах (а иной раз и в учебниках) можно встретить именно такое изложение хода определения массы земного шара: сначала нашли среднюю плотность земного шара, а затем умножением этой плотности на объем нашей планеты определили ее общую массу.

Но как найдена была средняя плотность Земли? Ведь плотность глубинных слоев земного шара невозможно определить непосредственно. В действительности ход исследования был как раз обратный: сначала была определена масса Земли, а затем по массе и объему была вычислена средняя ее плотность. Масса Земли найдена была из опыта, установившего величину силы, с которой два тела массами по 1 г каждое притягиваются друг к другу, если расстояние между ними 1 см. Зная, что Земля, центр которой удален от поверхности на 6400 000 м, притягивает 1 кг массы с силой 9,8 Н и что сила притяжения прямо пропорциональна произведению притягивающихся масс и обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними, можно вычислить массу Земли, не зная ее средней плотности.

Расчет несложен. Одно тело массой 1 кг притягивается другим телом той же массы на расстоянии 1 м с силой  $6,7 \cdot 10^{-11}$  Н. Следовательно, масса  $M$  земного шара, если бы центр его находился на расстоянии 1 м от тела массой 1 кг, притягивала бы этот килограмм с силой  $M(6,7 \cdot 10^{-11})$  Н.

На расстоянии же земного радиуса (шар притягивается так, как если бы вся его масса была сосредоточена в центре), т. е. на расстоянии 6400 000 м, сила притяжения убывает в  $6400\,000^2$  раз и равна

$$\frac{6,7M}{(6,4)^2} \cdot 10^{-23} \text{ Н.}$$

Известно, однако, что сила притяжения Землей массы 1 кг, расположенного на поверхности Земли, равна

$9,8 \text{ Н} \approx 10 \text{ Н}$ . Поэтому можно записать следующее равенство:

$$\frac{6,7M}{(6,4)^2} \cdot 10^{-23} \text{ Н} = 10 \text{ Н},$$

откуда

$$M = \frac{(6,4)^2}{6,7} \cdot 10^{24} \text{ кг}.$$

Выполнив вычисления, находим, что масса земного шара примерно равна  $6 \cdot 10^{24} \text{ кг}$ .

**219.** На вопрос этой интересной задачи составитель задачника физики дает следующий ответ:

«В случае движения ускоренного все тела казались бы более тяжелыми на стороне земного шара, обращенной к созвездию Лиры, и более легкими — на противоположной».

Ответ был бы верен, если бы сила, которая приводит в движение небесные тела, не оказывала никакого действия на предметы, находящиеся на них. Но мы знаем природу той единственной силы, которая способна вызвать ускоренное движение планетной системы: это — тяготение. Тяготение же сообщает всем телам одинаковые по величине ускорения. Планеты и все тела на них должны были бы двигаться в каждый момент с одинаковой скоростью — иначе говоря, находились бы в покое одни относительно других. Значит, никакого изменения веса предметов не наблюдалось бы. По явлениям, происходящим на самой Земле, не только невозможно обнаружить, движется ли наша планета по отношению к звездам ускоренно или равномерно, но нельзя установить, движется ли она поступательно.

**220.** Возражение совершенно неосновательно, хотя и представляется весьма веским. Безусловно верно, что с астрономической точки зрения масса ракеты может быть приравнена нулю. Но именно поэтому возмущающее действие на нее планет также равно нулю. Ведь взаимное притяжение двух тел прямо пропорционально произведению их масс; если одна из масс равна нулю, то притяжение равно нулю, как бы массивно ни было другое тело. При отсутствии массы нет и притяжения.

К тому же заключению можно прийти и другим путем. Вообразим два тела, массы которых  $M$  и  $m$ . Сила их взаимного притяжения равна

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

где  $G$  — постоянная тяготения, а  $r$  — расстояние между телами. Ускорение  $a$ , приобретаемое массой  $m$  под действием силы  $F$ , равно

$$a = \frac{F}{m} = G \frac{M}{r^2}.$$

Мы видим, что ускорение притягиваемого тела зависит не от его массы ( $m$ ), а от массы притягивающего тела. Отсюда следует, что под действием притяжения планет ракета должна приобретать ускорение (значит, и перемещение) точно такое же, как и самое массивное тело, например земной шар. А известно, как ничтожно возмущающее действие планетных притяжений на земной шар.

Итак, пилот ракетного корабля сможет направлять его бег на Луну, ни мало не беспокоясь о притяжении Венеры, Марса или Юпитера.

**221.** Логическая сила довода, приведенного в вопросе, выяснится для читателя, если попробуем применить подобные умозаключения в другой области. Что, например, сказали бы Вы о таком рассуждении:

«Об употреблении алкоголя. Наш организм очень чутко реагирует на всякое нарушение в этом отношении. Попробуйте выпить целый литр спирта или смеси спирта с коньяком. Наступающие расстройства нервной деятельности бывают очень серьезны. Если так действует изменение дозы или состава спиртных напитков, то как же должно действовать полное воздержание от них?»

Нелогичность вывода заметна здесь сразу. Станным образом она не всем бросается в глаза, когда та же ошибка облекается в форму, приведенную в вопросе. На лекциях по звездоплаванью мне часто приводили этот довод против возможности существования человека в среде без тяжести; многим почему-то представляется убедительным заключение, что раз человек, вися вниз головой, погибает, то он должен погибнуть и при полном отсутствии тяжести. Из того,

что тяжесть бывает вредна, делают вывод, что отсутствие тяжести тоже вредно, и считают это логичным.

В действительности пребывание человека в условиях невесомости должно быть совершенно безвредно для его организма. Не вдаваясь в подробности (читатель найдет их в моей книге «Межпланетные путешествия»), укажу хотя бы на то, что перемена положения нашего тела из вертикального в горизонтальное — лежание на кровати — ощущается как отдых. А ведь при горизонтальном положении тела тяжесть должна совершенно иначе действовать на движение крови в сосудах кровеносной системы, чем при вертикальном. Это показывает, что влияние веса крови на ее обращение, очевидно, ничтожно.

**222.** Обе формулировки тождественны: большая полуось орбиты и есть не что иное, как среднее расстояние планеты от Солнца. Она является арифметическим средним не только между ближайшим и дальнейшим расстоянием планеты от Солнца, но и между всеми расстояниями планеты от Солнца в течение целого ее обхода по орбите. Если (рис. 134) Солнце находится в фокусе  $F_1$  и планета последовательно занимает положения  $a, b, c, d$  и т. д., то среднее расстояние планеты от Солнца получится, если сложить все расстояния  $F_1a, F_1b, F_1c, F_1d$  и т. д. от фокуса  $F_1$  до каждой точки орбиты и разделить сумму на число этих расстояний. Нетрудно доказать, что частное равно половине большой оси.

Вот доказательство. Пусть взято на орбите  $n$  положений планеты; имеем, следовательно,  $n$  расстояний. Соединим каждое местонахождение планеты с другим фокусом  $F_2$ . Сумма расстояний каждой точки от фокусов равна большой оси  $2a$  эллипса — таково свойство этой кривой. Следовательно,

$$aF_1 + aF_2 = 2a,$$

$$bF_1 + bF_2 = 2a,$$

$$cF_1 + cF_2 = 2a$$

и т. д.

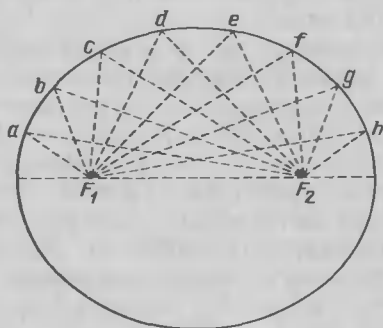


Рис. 134. Как найти среднее расстояние планеты от Солнца (в. 222)?

Сложив правые и левые части равенств, получаем

$$(aF_1 + bF_1 + cF_1 + \dots) + (aF_2 + bF_2 + cF_2 + \dots) = 2\tilde{a}n.$$

Если число  $n$  бесконечно велико, то ввиду симметричности фигуры эллипса оба выражения в скобках равны, а каждое из них представляет собой сумму всех расстояний планет от фокуса (т. е. от Солнца); обозначим эту сумму через  $S$ . Имеем

$$2S = 2\tilde{a}n,$$

откуда

$$S/n = \tilde{a}.$$

Но  $S/n$  есть среднее расстояние планеты от Солнца,  $\tilde{a}$  — большая полуось орбиты. Значит, среднее из всех расстояний планеты от Солнца равно большой полуоси орбиты.

**223.** Физика вовсе не утверждает, что вечное движение невозможно. Отвергается возможность не вечного движения, а вечного двигателя. Вечный двигатель — механизм, который может двигаться неопределенно долго, совершая при этом работу. Существование подобного механизма было бы нарушением закона сохранения энергии, так как машина эта способна была бы произвести неограниченное количество работы и общее количество энергии в природе перестало бы быть постоянным. Планета, кружащаяся около Солнца, таким механизмом не является; это не вечный двигатель, потому что он не совершает при движении работы; это вечное движение, существование которого не нарушает законов физики.

Открытая в последние годы возможность существования непрекращающегося электрического тока в так называемых сверхпроводниках (при чрезвычайно низкой температуре) представляется в глазах многих явным нарушением закона сохранения энергии. Хотя явление сверхпроводимости и не относится прямо к рассматриваемой нами задаче (потому что ток не есть сквозное движение электронов), отметим все же, что указанным явлением закон сохранения энергии нисколько не нарушается: ток вечно циркулирует в сверхпроводнике лишь при условии, что этим током не совершается никакая работа. Если же заставить его совершать работу, он прекращается.

Совершенно несбыточен поэтому следующий проект, высказанный в одном из недавно вышедших у нас сочинений по звездоплаванью:

«При будущих космических полетах можно было бы представить себе небольшой электрогенератор, работающий вне корабля при температуре абсолютного нуля (?). Будучи раз пущен в ход, он будет доставлять ток все время без перерывов для целей навигации. Ведь подобным же (?) вечным движением уже обладают в холоде абсолютного пространства (!) Земля, Луна и другие планеты. Почему же в конце концов и человеку не получить такого же вечного двигателя?»

Помимо других ошибочных представлений в этом проекте надо отметить смешение «вечного движения» с «вечным двигателем».

**224.** Физических оснований уподоблять организм животного тепловой машине не существует. Распространенное убеждение, что между организмом животного и тепловым двигателем есть полная аналогия — грубое заблуждение. Оно основано на чисто поверхностном сходстве: тот и другой потребляют топливо (пищу), порождающее теплоту при соединении с кислородом. Отсюда поспешно заключают, что животная теплота является источником механической энергии организма, как теплота парового котла — источник движения машины.

Между тем такой взгляд на происхождение механической энергии человека и животного находится в непримиримом противоречии с физикой, притом с самой бесспорной ее отраслью — термодинамикой. Более внимательное рассмотрение вопроса убедит нас, что принципиального сходства между организмом животного и тепловым двигателем нет: организм не есть тепловая машина.

Покажем, почему недопустимо предположение, что механическая энергия живого организма является результатом превращения теплоты сгорания пищи в механическую работу. Проще говоря, — почему нельзя представлять себе дело так, что в организме сначала из пищи получается теплота, а затем эта теплота преобразуется в работу. Термодинамика установила, что теплота может превращаться в работу только в том случае, когда она переходит от источника высокой температуры (от «нагревателя» — например, топки котла) к источнику более низкой температуры

(к «холодильнику»). При этом отношении количества теплоты, превращенной в механическую работу, к количеству теплоты, заимствованному от нагревателя (коэффициент полезного действия машины), равна отношению разности температур нагревателя и холодильника к температуре нагревателя:

$$k = \frac{T_1 - T_2}{T_1},$$

где  $k$  — коэффициент полезного действия,  $T_1$  — температура горячего тела,  $T_2$  — температура холодного тела ( $T_1$  и  $T_2$  — по шкале Кельвина).

Применим эту формулу к организму человека, который попробуем рассматривать как тепловую машину. Известно, что нормальная температура нашего тела  $\approx 37^\circ\text{C}$ . Это, очевидно, один из тех двух уровней температуры, наличие которых является необходимым условием работы всякой тепловой машины. Значит,  $37^\circ\text{C}$  — либо высший уровень (температура нагревателя), либо низший уровень (температура холодильника). Рассмотрим оба случая, исходя из приведенной выше формулы и зная, что коэффициент полезного действия человеческого тела равен приблизительно 0,3, т. е. 30%.

**Первый случай:**  $37^\circ\text{C}$  ( $= 310\text{ K}$ ) есть температура  $T_1$  «нагревателя». Температуру  $T_2$  «холодильника» определим из уравнения

$$0,3 = \frac{310 - T_2}{310},$$

откуда:  $T_2 = 217\text{ K}$ , или  $-56^\circ\text{C}$ . Это означает ни мало ни много, что в нашем теле должен существовать участок с температурой на  $56^\circ\text{C}$  ниже нуля! (Взяв более высокий коэффициент полезного действия, а именно 50%, как указывают некоторые авторы, придем к еще большему абсурду, — что в нашем теле есть область с температурой  $-118^\circ\text{C}$ .)

Значит, температура  $37^\circ\text{C}$  не может быть высшим значением температуры в «живой тепловой машине». Не является ли эта температура низшим значением? — Посмотрим.

**Второй случай:**  $37^\circ\text{C}$  есть температура «холодильника»:  $T_2 = 273 + 37 = 310\text{ K}$ . Тогда (при  $k = 30\%$ )

$$0,3 = \frac{T_1 - 310}{T_1},$$



откуда:  $T_1 = 443$  К, или  $170^\circ$  С. В теле нашем должен находиться участок, температура которого  $+170^\circ$  С! (При  $k = 50\%$  получим для  $T_1$  значение 620 К, или  $+347^\circ$  С.)

Так как ни один анатом не обнаружил еще в теле человека области, замороженной до  $-56^\circ$  С или нагретой до  $+170^\circ$  С, то приходится отказаться от уподобления нашего организма тепловой машине.

«Мышца не представляет тепловой машины в термодинамическом смысле,—пишет проф. Э. Лехер в своей „Физике для медиков и биологов”.—Потенциальная энергия химических реакций (усвоения пищи) может быть, однако, превращена в работу непосредственно или с помощью электрической энергии. Теплота в мышце является остатком механической или электрической работы.»

**225.** Напомню, на всякий случай, что метеор до вступления в земную атмосферу представляет собой холодное, не самосветящееся тело и только в атмосфере нашей планеты раскаляется до яркого свечения. Он, конечно, не горит, так как на тех высотах, где происходит его свечение (около 100 и более километров над земной поверхностью), воздух разрежен в миллион раз, да и, вероятно, в этой зоне кислород отсутствует.

Отчего же метеор раскаляется? Обычный ответ: от трения о воздух. Но метеор не трется об окружающую среду — он увлекает прилегающие слои воздуха с собой.

Научно-правдоподобным представляется следующее объяснение: метеор нагревается потому, что потерянная вследствие воздушного сопротивления энергия его движения превращается в теплоту. Это представление противоречит и фактам, и теории. Если бы утраченная кинетическая энергия метеора прямо превращалась в теплоту, т. е. если бы ускорялось беспорядочное движение его молекул, то метеор нагревался бы целиком во всей его массе. Между тем наблюдается нагревание только поверхностного слоя метеора, внутри же он остается холодным, как лед.

Несостоятелен такой взгляд также и теоретически. Замедление движения тела вовсе не обязательно должно сопровождаться его нагреванием: энергия движения может превратиться и в другие виды энергии. Движение тела, брошенного вверх, замедляется, однако тело не нагревается: кинетическая энергия переходит в потенциальную энергию поднятого тела. В случае метеора

часть потерянной им энергии движения переходит в вихревое движение воздуха, прилегающего к метеору. Остальная часть действительно преобразуется в теплоту, но как? Каким образом замедление движения молекул может породить то ускоренное беспорядочное их движение, которое называется теплотой? На этот вопрос приведенное объяснение не дает ответа.

В действительности явление нагревания метеора происходит следующим образом. Нагревается первоначально не сам метеор, а тот воздух, который метеором сжимается впереди при стремительном движении через атмосферу: нагретый воздух передает свою теплоту поверхностному слою метеора. Раскаляется воздух при уплотнении по той же причине, по какой разогревается он в воздушном огниве: вследствие адиабатного сжатия; воздух сжимается быстро летящим метеором так стремительно, что возникающая теплота не успевает распространиться вовне.

Сделаем примерный расчет того, до какой температуры может нагреться воздух, сжимаемый вторгшимся в атмосферу метеором. Физика установила следующую зависимость между участвующими в процессе факторами:

$$T_k - T_i = T_i \left[ \left( \frac{p_k}{p_i} \right)^{(k-1)/k} - 1 \right].$$

Формула эта представляет видоизменение уже знакомой нам (см. ответ к в. 130) формулы для случая адиабатного расширения. Укажем смысл обозначений:  $T_i$  — начальная температура газа (в кельвинах);  $T_k$  — конечная температура газа (в кельвинах);  $p_k/p_i$  — отношение конечного и начального значений давления газа;  $k$  — отношение двух теплоемкостей газа. Для воздуха:  $k = 1,4$  и  $(k-1)/k = 0,29$ .

Выполняя расчет, примем  $T_i$  — температуру воздуха в его высших слоях — равной 200 К. Что касается отношения  $p_k/p_i$ , то будем считать, что воздух уплотняется от 0,000001 до 100 ат, т. е. указанное отношение равно  $10^8$ . Подставляя эти значения в формулу, получим

$$T_k - 200 = 200 (10^8)^{0,29} = 40\,000 \text{ К.}$$

Расчет наш, опирающийся на предположительные данные, не претендует на точность: он оценивает лишь порядок искомой величины.

Итак, мы пришли к заключению, что воздух, уплотняемый метеором, должен нагреться до нескольких десятков тысяч градусов. Оценка, основанная на измерении яркости метеоров, приводит к подобному же результату: от 10 000 до 30 000 градусов. Наблюдая метеор, мы, собственно говоря, видим не его самого — он бывает очень мелок, величиной с орех или горошину, — а раскаленный им воздух, объем которого в несколько тысяч раз больше.

Сказанное относится, по существу, и к нагреванию пуль и артиллерийских снарядов: они также уплотняют воздух впереди себя, нагревают его и нагреваются от него сами. Разница лишь в том, что скорость метеора в 50 раз больше. Что касается различия в плотности воздуха на большой высоте и близ земной поверхности, то надо иметь в виду, что величина нагревания зависит только от отношения конечной и начальной плотностей, а не от абсолютной их величины.

Остается разъяснить одно обстоятельство: почему, собственно, нагревается воздух, когда он подвергается сжатию? Рассмотрим конкретно пример воздуха, уплотняемого движущимся метеором. Молекулы воздуха, наталкивающиеся на камень, который движется им навстречу, отскакивают назад со скоростью, большей, нежели первоначальная. Вспомните, что делает теннисист, чтобы заставить мяч отскочить с возможно большей скоростью: он не пассивно ждет удара о ракетку, а сам ударяет в летящий мяч, стараясь, как говорят игроки, «бросить на мяч весь свой вес». Каждая молекула отскакивает от движущегося навстречу метеорного камня, как мяч от ракетки, — она приобретает часть энергии ударяющего тела. Возрастание же кинетической энергии молекул и есть то, что мы разумеем под словами «повышение температуры».

Понятно, что газ расширяющийся, молекулы которого отскакивают от отступающей преграды со скоростью меньшей, нежели первоначальная, должен понижать свою температуру: он отдает преграде часть энергии теплового движения своих молекул.

**226.** Частота туманов в фабрично-заводских районах, где воздух засорен частицами дыма, находит себе простое объяснение в законах молекулярной физики. Мы уже говорили (в. 150), что давление насыщающего пара близ вогнутой поверхности жидкости

должно быть меньше, чем близ плоской при той же температуре. Подобно этому, давление насыщающего пара близ выпуклой поверхности жидкости должно быть больше, чем близ поверхности плоской. Причина та, что молекулам легче освободиться от жидкости, имеющей выпуклую поверхность, чем покинуть плоскую поверхность жидкости (при одинаковых температурах). Что же должно произойти с очень выпуклой (т. е. имеющей форму крошечного шарика) каплей воды, внесенной в пространство, которое насыщено водяным паром? Она будет испаряться в такой атмосфере, и если капля достаточно мала, то вся превратится в пар, несмотря на то, что пространство было уже прежде насыщено им, теперь оно сделается перенасыщенным.

Легко понять вытекающее отсюда следствие: пар может начать сгущаться в капли только в том случае, если он перенасыщен. В пространстве, нормально насыщенном водяными парами, молекулы его не могут собираться в капельки, потому что эти первые — разумеется, чрезвычайно мелкие — капли должны были бы тотчас же испариться.

Иначе обстоит дело, если воздух, насыщенный паром, содержит частицы пыли или дыма. Как ни малы эти частицы сами по себе, они велики по сравнению с молекулами; оседая на них, молекулы воды сразу же образуют довольно крупные капли. Такие капли значительного радиуса имеют уже не настолько искривленную поверхность, чтобы вода должна была испариться. Отсюда понятно, почему присутствие частиц дыма в воздухе должно способствовать сгущению пара в капельки, т. е. образованию туманов. Число подобных частиц в воздухе промышленных центров огромно. В то время как в воздухе над вершинами Альп их содержится всего несколько сотен на кубический сантиметр, в воздухе Лондона их насчитывается до 140 000, а в Глазго — даже до 470 000.

**227.** Дым, пыль и туман разнятся по состоянию и размерам частиц, взвешенных в воздухе (или в другом газе). Если частицы эти твердые — мы имеем пыль или дым, если жидкие — имеем туман.

Пыль от дыма отличается размерами частиц. Частицы пыли крупнее; их поперечник — около 0,01 и 0,001 см. Частицы же дыма бывают поперечником

0,0000001 см; такой малости достигают, например, частицы табачного дыма, поперечник которых, следовательно, всего в 10 раз крупнее поперечника атома водорода (а объем—в 1000 раз).

Другое отличие дыма от пыли, вытекающее из неодинаковости размеров частиц, состоит в том, что пылинки оседают с возрастающей скоростью, между тем как частицы дыма или оседают с постоянной скоростью (если диаметр их не меньше 0,00001 см) или же вовсе не оседают (если диаметр их меньше 0,00001 см). В последнем случае скорость так называемого броуновского движения этих частиц больше скорости их оседания.

**228.** Скорость теплового движения молекул данного вещества определяется температурой этого вещества и не зависит от того, в каком состоянии оно находится,—в твердом, жидком или газообразном. Поэтому молекулы водяного пара, жидкой воды и льда при одинаковой температуре движутся с одинаковой скоростью (точнее говоря, обладают одинаковой кинетической энергией: молекулы льда не тождественны с молекулами воды и пара).

**229.** Вот ответ, который, вероятно, представляется многим бесспорно правильным:

«Минус  $273^{\circ}\text{C}$  есть температура абсолютного нуля. При такой температуре поступательная скорость молекул равна нулю. Следовательно, при  $-273^{\circ}\text{C}$  водородные молекулы, как и всякие другие, находятся в покое.»

Ответ, однако, неверен,—потому что температура абсолютного нуля не  $-273$ , а  $-273,15^{\circ}\text{C}$ .

Неужели же эти 0,15 градусов могут иметь здесь сколько-нибудь существенное значение? Ведь при таких низких температурах молекулы, наверное, едва движутся, и разница в  $0,15^{\circ}\text{C}$  картины не меняет.

Так может казаться, но расчет не подтверждает этого ожидания. Дело в том, что скорость молекул убывает пропорционально корню квадратному из температуры (по шкале Кельвина), поэтому даже при весьма низких температурах молекулы движутся еще довольно быстро. Сделаем расчеты.

Известно из кинетической теории газов, что при  $0^{\circ}\text{C}$ , т. е. при 273 К, молекулы водорода движутся со



Рис. 135. С какой скоростью движутся молекулы водорода при температурах, близких к абсолютному нулю (в. 229)?

скоростью 1843 м/с. Поэтому их средняя скорость  $x$ , например, при  $-270^\circ \text{C}$  (т. е. при 3,1 К), определится из пропорции

$$\frac{x}{1843} = \frac{\sqrt{3,1}}{\sqrt{273,15}},$$

откуда

$$x \approx 193 \text{ м/с.}$$

Молекулы в столь холодном газе мчатся быстрее пули нагана (рис. 135)!

Даже при температуре всего на четверть градуса выше абсолютного нуля скорость движения молекул водорода еще довольно высока. Из пропорции

$$\frac{y}{1843} = \frac{\sqrt{0,25}}{\sqrt{273,15}}$$

получаем

$$y \approx 56 \text{ м/с,}$$

т. е. более 200 км/ч (скорость аэроплана).

Обратимся теперь непосредственно к поставленному нами вопросу: какова скорость молекул водорода при  $-273^\circ \text{C}$ , т. е. при 0,15 К. Составим пропорцию

$$\frac{z}{1843} = \frac{\sqrt{0,15}}{\sqrt{273,15}},$$

откуда

$$z \approx 35 \text{ м/с.}$$

Это составляет в час около 125 км,— что быстрее самого быстрого курьерского поезда. Таковую скорость никак нельзя считать ничтожной, близкой к состоянию покоя.

**230.** В Лейдене (Голландия) в холодильной лаборатории удалось после многолетних усилий получить температуру в  $-272,9^{\circ}\text{C}$ , т. е. подойти к абсолютному нулю на  $1/4$ .

Поэтому среди широких кругов распространено убеждение, что овладение абсолютным нулем — дело недалекое. Остается продвинуться в области холода всего на четверть градуса, и температура абсолютного нуля будет достигнута. Словом, о получении этой температуры рассуждают примерно так же, как говорили еще недавно о достижении замного полюса: раз осталось меньше четверти градуса, то пугь до цели уже недалек.

Существуют, однако, принципиальные соображения, приводящие к обратному заключению: о полной невозможности когда-либо достичь абсолютного нуля. Таково одно из следствий третьего начала термодинамики, или тепловой теоремы Нернста. Рассмотрение этого положения выходит из рамок элементарной физики. Ограничусь лишь замечанием, что некоторыми авторами третье начало термодинамики прямо называется «принципом недостижимости абсолютного нуля». За подробностями любознательный читатель может обратиться, например, к «Курсу физики» проф. Берлинера (есть русский перевод), где он найдет довольно доступное изложение предмета.

Поучительно сопоставить здесь три отрицательных вывода (три невозможности), вытекающие из трех начал термодинамики:

из первого начала (закона сохранения энергии) — невозможность вечного двигателя первого рода;

из второго начала — невозможность вечного двигателя второго рода;

из третьего начала — невозможность достижения абсолютного нуля.

**231.** Не следует думать, что вакуумом называется всякая высокая степень разрежения газа в сосуде. Газ может быть очень сильно разрежен — и все же физик не назовет такое пространство вакуумом. Признаком вакуума в строгом смысле слова является то, что средняя длина свободного пути молекул больше размеров сосуда.

Поясним это. Молекулы газа в своем тепловом движении миллиарды раз в секунду сталкиваются одна

с другой. В промежуток времени между двумя смежными столкновениями молекула успевает, однако, пройти некоторый путь — путь свободного (без столкновений) пробега. Среднюю длину  $l$  этого пути мы найдем, если среднюю скорость  $v$  молекул, т. е. путь, проходимый в среднем молекулой за одну секунду, разделим на число  $N$  столкновений, претерпеваемых молекулой за одну секунду:

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

Например, в воздухе при  $0^\circ \text{C}$  средняя скорость  $v$  молекул равна  $\sim 50$  м/с, или 500 000 мм/с; число  $N$  столкновений в секунду при нормальном давлении равно 5 000 000 000. Следовательно, средняя длина  $l$  пути молекул воздуха при  $0^\circ \text{C}$  и давлении 760 мм рт. ст. равна

$$l = \frac{v}{N} = \frac{500\,000}{5\,000\,000\,000} = 0,0001 \text{ мм}.$$

(В действительности ход поисков обратный: из опыта определяют  $v$  и  $l$ , а  $N$  находят вычислением. Здесь мы желали установить лишь зависимость между величинами  $l$ ,  $v$  и  $N$ .)

Если давление газа в  $n$  раз меньше нормального, т. е. если газ разрежен в  $n$  раз, то число молекул в кубическом сантиметре его объема в  $n$  раз меньше; во столько же раз меньше, следовательно, будет и число  $N$  столкновений. А так как  $N = v/l$ , то при неизменной скорости  $v$  (она не зависит от давления) длина  $l$  будет во столько же раз больше.

При разрежении в миллион раз и температуре  $0^\circ \text{C}$  средняя длина свободного пути для воздуха равна  $0,0001 \cdot 1\,000\,000 = 100 \text{ мм} = 10 \text{ см}$ .

В колбе электрической лампочки, которая короче 10 см, длина свободного пробега при таком разрежении больше размеров самой лампочки. Это значит, что в среднем молекулы движутся в ней от стенки до стенки, не встречаясь с другими молекулами. В таком состоянии газ обладает рядом свойств, не присущих газам с соударяющимися молекулами. Поэтому подобное состояние газа и выделяется в физике особым наименованием — «вакуум».

В сосуде больших размеров (например, в трубке длиной 1 м) воздух при том же разрежении и той



же температуре не будет уже в состоянии вакуума: молекулы его будут сталкиваться между собою.

**232.** Вопрос о том, какова средняя температура вещества Вселенной, представляет большой интерес: от ответа на него зависит, изучаем ли мы в наших лабораториях материю в типичном ее состоянии или в исключительном. Оказывается, как увидит читатель, что средняя температура всей материи мира порядка нескольких миллионов градусов!

Эта неожиданная оценка утратит свою парадоксальность, когда вспомним, что масса всех планет нашей Солнечной системы составляет в совокупности только  $1/700$  долю (0,0013) массы Солнца и что такого же порядка отношение должно иметь место и для других звезд (если они обладают планетами). Значит, около 0,999 всего вещества мира сосредоточено в Солнце и звездах, средняя температура которых исчисляется десятками миллионов градусов. Наше Солнце — типичная звезда; температура на ее поверхности  $6000^{\circ}\text{C}$ , в недрах же — не менее  $40\,000\,000^{\circ}\text{C}$ . И потому за среднюю температуру вещества во Вселенной мы должны принять оценку в 20 миллионов градусов.

Дело мало изменится, если стать на ту точку зрения (отстаиваемую Эддингтоном), что межзвездное пространство не абсолютно свободно от весомой материи, а занято веществом в состоянии крайнего разрежения — по десятку молекул на  $1\text{ см}^3$  (в 20 миллионов раз меньше, чем в самой «пустой» из пустотных электрических лампочек). При этом допущении общее количество вещества в межзвездных пространствах будет превышать раза в три ту материю, которая сосредоточена в звездах. Так как температура межзвездного вещества примерно  $-200^{\circ}\text{C}$  или даже еще ниже,  $3/4$  всего вещества мира окажется при  $-200^{\circ}\text{C}$  и  $1/4$  — при 20 миллионах градусов. Средняя величина для температуры вещества Вселенной получится тогда около 5 миллионов градусов.

Так или иначе, неизбежен вывод, что температура материи мира в среднем не ниже нескольких миллионов градусов, причем часть ее находится при 20 и более миллионов градусов, другая — при минус  $200^{\circ}\text{C}$  и ниже. На долю тех умеренных температур, которые господствуют в непосредственно окружающей нас природе, приходится исчезающе малая доля вещества.

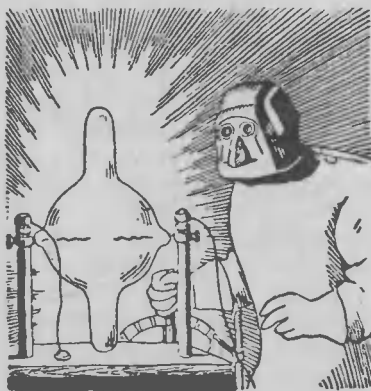


Рис. 136. Опыт получения температуры 20 000 С. Экспериментатор защищен особым костюмом от действия взрывной волны (в. 232).

Итак, типичными для вещества температурами являются крайне низкие, приближающиеся к абсолютному нулю (если оправдается гипотеза Эддингтона), и крайне высокая, исчисляемая десятками миллионов градусов. Наша физика, как видим, есть физика материи в исключительных условиях, а те состояния вещества, которые мы привыкли считать исключительными, являются в сущности типичными. Физика главной мас-

сы мирового вещества нам едва знакома; ее изучение есть задача будущего. Мы имеем очень скудные знания о свойствах вещества при температурах, близких к абсолютному нулю, и вовсе не представляем себе,— что такое вещество при десятках миллионов градусов.

Наивысшая температура, какая наблюдалась на Земле, достигнута была в опытах 1920—1922 гг., произведенных Андерсеном на обсерватории горы Вильсон, и Вендьом в Чикаго. Через тонкую и короткую проволоку, весом всего 0,0005 г, производился мгновенный разряд электрического конденсатора, причем в течение 100 000-й доли секунды проволока получала 30 калорий. Она нагревалась, по вычислениям экспериментаторов, до 20 000 С в одних случаях (рис. 136) и до 27 000 С в других, побивая все рекорды температуры, с которыми физики до тех пор имели дело в своих лабораториях (рис. 137). Свет, испускавшийся проволокой, так нагретой, был ярче солнечного в 200 с лишним раз.

Если сосуд, в котором находилась проволока, был наполнен водою, он разлетался при опытах на мельчайшие пылинки, в которых нельзя было узнать стекла. На расстоянии полуметра от места взрыва лицо и руки экспериментаторов испытывали сильный удар взрывной волны, если не были одеты в особый защитный костюм. Волна взрыва распространялась в 10 раз быстрее звука. Молекулярное движение

20000° С	Добыта в лаборатории
 18000°	Температура поверхности самых горячих звезд
 6000°	Температура поверхности Солнца
 4000°	Температура вольтовой дуги
3000°  1800° 1470°	Плавление вольфрама Плавление платины Плавление никеля
 800°	Утрата магнитных свойств
 525°	Красное каление
 100°	Кипение воды
 0°	Таяние льда
-273° С	Абсолютный нуль

Рис. 137. Вехи на пути к температуре 20000° С. (К ответу на вопрос 232.)

при такой температуре совершается с огромной скоростью: молекулы водорода, например, несутся со скоростью 16 км/с.

Температура в 20—27 тысяч градусов превышает температуру поверхности самых горячих звезд, но далека еще от той, какая господствует в их недрах, где она достигает десятков миллионов градусов. Такой жар превосходит силу самого богатого воображения. Джинс (в книге «Вселенная вокруг нас») пишет по этому поводу следующее:

«Выведенные нами температуры в центре звезд порядка от 30 до 60 миллионов градусов уходят настолько далеко за пределы нашего опыта, что трудно себе представить ясно, что они должны означать. Нагреем мысленно 1-миллиметровый кубик обыкновенного вещества до температуры в 50 миллионов градусов, иными словами,—приблизительно до температуры в центре Солнца. Как ни покажется это невероятным, для одного только пополнения энергии, теряемой излучением с его шести граней, потребуется полная энергия машины в 3000 биллионов (3 000 000 000 000 000) лошадиных сил. Эта булавочная головка будет испускать достаточно тепла, чтобы уничтожить всякого, кто решится приблизиться к ней на полторы тысячи километров.»

В таком совершенно непредставимом для нас состоянии пребывает, быть может, 999 тысячных (и во всяком случае не менее четверти) всего вещества природы. Физике предстоит еще, как видим, необъятное поле исследования, прежде чем она познает законы, управляющие материей.

**233.** Десятимиллионную долю грамма вещества каждый из нас видел бесчисленное множество раз. Вы сами сейчас только что видели ее и остановили на ней внимание.

Дело в том, что точка типографского шрифта или рукописи весит примерно одну десятиmillionную долю грамма. Взвешивание точки выполнено было так: на чрезвычайно чувствительных весах взвесили чистую бумажку, затем поставили на ней чернилами точку и снова взвесили. Разница и представляла, конечно, массу точки. Она оказалась равной

0,00000013 г

— чуть больше десятиmillionной доли грамма.

**234.** Ящик с «авогад-  
ровым числом»  
булавочных головок при  
высоте стенок в 1 км не-  
чего и думать поместить  
в пределах даже самого  
большого города. Для  
него не нашлось бы ме-  
ста даже в целом запад-  
но-европейском госуда-  
рстве. Самое обширное из  
них — Франция — могло  
бы быть целиком по-  
гребено под километро-  
вым слоем такого коли-  
чества булавоочных голо-  
вок (рис. 138).

Так как это кажется  
невероятным, то произ-  
ведем расчет, приводя-  
щий к указанному результату. Объем, занимаемый  
в ящике булавоочной головкой, можно считать равным  
 $1 \text{ мм}^3$ . Выразим величину  $66 \cdot 10^{22} \text{ мм}^3$  в кубических  
километрах:

$$66 \cdot 10^{22} : 10^{18} = 66 \cdot 10^4 = 660\,000 \text{ км}^3.$$

При высоте в 1 км слой такого объема должен иметь  
площадь основания  $660\,000 \text{ км}^2$ ; между тем площадь,  
занимаемая современной Францией,  $550\,000 \text{ км}^2$ .

Площадь Каспийского моря еще меньше  
( $440\,000 \text{ км}^2$ ), а так как глубина его только в отдельных  
местах достигает километра, то авогадровым числом  
булавоочных головок можно было бы с большим  
избытком засыпать это величайшее в мире озеро.

**235.** Этот расчет наглядно показывает, как огромно  
число молекул в незначительном объеме тела.  
Чтобы дать ответ на поставленный вопрос, нужно  
сравнить число молекул спирта в одном литре с числом  
литров воды в Мировом океане. Оба числа подавляют  
наше воображение, и установить, которое из них  
больше, без расчета нельзя. Проведем этот расчет.

Моль этилового спирта включает — как и моль лю-  
бого вещества —  $66 \cdot 10^{22}$  молекул (постоянная Авогадро).  
Масса моля спирта ( $\text{C}_2\text{H}_6\text{O}$ ) равна  $2 \cdot 12 + 6 + 16 = 46 \text{ г}$ .

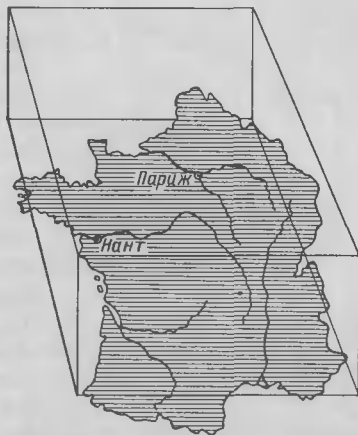


Рис. 138. Ящик с числом Авогадро  
булавоочных головок при высоте  
1 км был бы больше всей Франции  
(в. 234).



Рис. 139. В капле воды не меньше молекул, чем капель в Черном море (в. 235).

Значит, в одном грамме спирта содержится  $66 \cdot 10^{22} : 46 = 14 \times 10^{21}$  молекул. Литр спирта массой 800 г содержит  $14 \times 10^{21} \cdot 800 = 112 \cdot 10^{23} \approx 10^{25}$  молекул.

Сколько же литров воды в Мировом океане? Поверхность, занятая водой, имеет площадь около  $370\,000\,000 \text{ км}^2$ . Если считать, что средняя глубина океана 4 км, то объем всей воды равен  $148 \cdot 10^7 \text{ км}^3$ , или  $148 \cdot 10^{16} \text{ л} \approx 15 \cdot 10^{20} \text{ л}$ . Разделив число молекул в литре

спирта на число литров воды в океане, получим приблизительно 7000. Это значит, что в каком бы месте Мирового океана мы ни зачерпнули воды литровой кружкой, в ней найдется в среднем около 7000 молекул из того литра спирта, который был вылит в океан. В каждом зачерпнутом наперстке мы уловили бы 7 спиртовых молекул.

Поучительно еще и другое сопоставление: капля воды содержит столько же молекул, сколько в Черном море — мелких капель (рис. 139). Читатель может убедиться в правильности сказанного, самостоятельно проделав расчет наподобие приведенного выше.

**236.** Молекулы газа даже при нормальном давлении разделены большими промежутками, чем обычно думают. Среднее расстояние между молекулами водорода при  $0^\circ \text{С}$  и давлении 760 мм рт. ст. равно

$$0,000\,003 \text{ см } (3 \cdot 10^{-6} \text{ см}),$$

диаметр же молекулы водорода равен  $2 \cdot 10^{-8} \text{ см}$ . Разделив первое число на второе, получим 150.

Значит, молекулы в нашем газе разделены расстояниями в полтора раза большими, чем их поперечники.

**237.** Так как масса атома водорода равна  $1,7 \cdot 10^{-24} \text{ г}$ , а масса земного шара  $6 \cdot 10^{27} \text{ г}$ , то средне-геометрическое между ними составит

$$x = \sqrt{1,7 \cdot 10^{-24} \cdot 6 \cdot 10^{27}} \approx 100 \text{ г}.$$

**238.** При увеличении в миллион раз вершина Эйфелевой башни была бы в соседстве с орбитой Луны;

рост человека был бы 1700 км;

мышы достигали бы 100 км в длину;

тело мухи простиралось бы на 7 км;

каждый волос был бы толщиной 100 м;

красные тельца нашей крови имели бы в поперечнике 7 м.

А молекулы — были бы величиной с точку типографского шрифта этой книги!

Отметим, кстати, что самый сильный микроскоп не может показать нам объекта, поперечник которого меньше 0,0001 мм. Между тем кубик, имеющий такое ребро, содержит более миллиона молекул. Значит, в микроскоп мы можем видеть только скопления из миллиона и более молекул.

**239.** Шарик диаметром, представляющим средне-геометрическое между диаметрами электрона и Солнца, неожиданно мал. Вот расчет:

диаметр электрона —  $4 \cdot 10^{-13}$  см;

диаметр Солнца —  $14 \cdot 10^{10}$  см;

$$x = \sqrt{4 \cdot 10^{-13} \cdot 14 \cdot 10^{10}} = \sqrt{0,058} = 0,24 \text{ см} = 2,4 \text{ мм}.$$

Итак, шар, который во столько же раз меньше Солнца, во сколько больше электрона, имеет размеры дробинки.

**240.** То, что не только материя, но и энергия обладают весомой массой, является в настоящее время неоспоримо установленным положением физики. Мы не замечаем, правда, чтобы, например, нагретое тело становилось тяжелее, прибавка тепловой энергии, по-видимому, не увеличивает заметно массы тела. В этом случае прибавка массы ускользает от непосредственного наблюдения, потому что она чрезвычайно мала по сравнению с массой всего тела.

Вообще те массы, с которыми мы имеем дело в обиходе и технике, достаточно велики, чтобы мы ощущали их весомость. Но порции энергии, с которыми сталкивает нас повседневная жизнь, слишком ничтожны для ощутительного проявления их весомости.

Мы представим себе яснее эти соотношения, если обратимся к языку чисел. Паровая машина в 3000

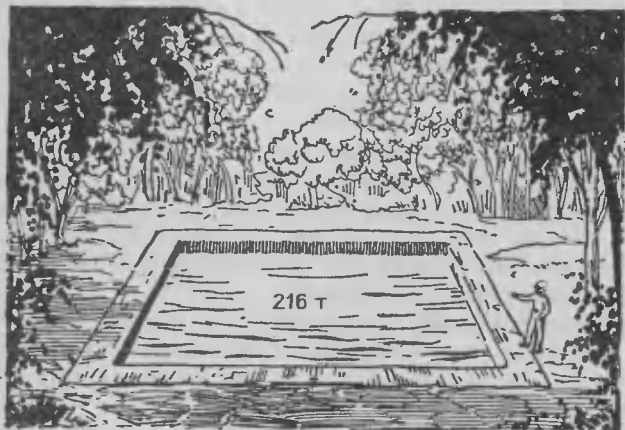


Рис. 140. Энергия, нагревающая 216 т воды от 0 до 100° С, обладает массой в 1 мг (в. 240).

лошадиных сил совершает каждую секунду 2250 тысяч джоулей работы, а в час — около 800 миллионов таких единиц. Это количество работы на нашу мерку огромно, но массы в нем все же очень мало — около 0,1 мг. Чтобы энергия имела массу в 1 г, надо взять ее в количестве 90 миллиардов ( $9 \cdot 10^{13}$ ) джоулей.

Еще пример. Перед нами кубический бассейн (рис. 140) глубиной в 6 м, наполненный водой при 0° С. Вы нагреваете воду в нем до 100° С. На это расходуется

$$6 \cdot 6 \cdot 6 \cdot 1000 \cdot 100 = 21\,600\,000 \text{ ккал.}$$

А так как одна калория отвечает 4270 джоулям, то энергия воды в бассейне возросла на 90 000 000 000 Дж. Это составляет ровно 1/1000-ю долю от 90 миллиардов джоулей и, следовательно, имеет массу, равную 1/1000-й доле грамма — 1 мг. Бассейн стал тяжелее на 1 мг. Конечно, столь ничтожную прибавку к 216 т обнаружить невозможно.

Понятно теперь, почему обычно мы не замечаем весомости энергии в окружающих нас явлениях. В практической жизни, в технике мы можем уверенно придерживаться прежнего взгляда на энергию, как на нечто совершенно невесомое. Физика производственных процессов не претерпевает никаких изменений с установлением весомости энергии.

Иначе обстоит дело с грандиозными явлениями во Вселенной, в которых участвуют огромные количества



энергии. Солнце, например, посылает так много энергии путем излучения, что потеря его массы должна быть уже заметна. Сделаем подсчет. Каждый квадратный метр, поставленный на верхней границе земной атмосферы под прямым углом к солнечным лучам, ежесекундно получает от Солнца  $1/3$  ккал. Это соответствует  $4270 \cdot 1/3 = 1420$  джоулей. Чтобы учесть полное количество энергии, излучаемое Солнцем во все стороны, вообразим, что дневное светило окружено шаровой поверхностью радиусом, равным расстоянию от Земли до Солнца (150 000 000 000 м). Такая поверхность заключает квадратных метров:

$$4 \cdot 3,14 \cdot 150\,000\,000\,000^2 \approx 28 \cdot 10^{22} \text{ м}^2.$$

На каждый квадратный метр падают 1420 Дж энергии, а на указанное количество квадратных метров должно упасть  $1420 \cdot 28 \cdot 10^{22} \approx 4 \cdot 10^{26}$  Дж. Прежде уже было сказано, что каждые 90 миллиардов джоулей энергии обладают массой в 1 г. Излучаемое Солнцем ежесекундно количество энергии имеет, следовательно, массу равную

$$4 \cdot 10^{25} : 9 \cdot 10^{12} = 4,5 \cdot 10^{12} \text{ г.}$$

Около 4,5 миллиардов граммов, или 4,5 миллионов тонн. Вот сколько массы теряет Солнце каждую секунду!

Примерно столько же весит большая египетская пирамида — самое тяжелое сооружение в мире. Пока Вы читали эти строки, не одна сотня таких пирамид унесена была лучами Солнца с огненной его поверхности (рис. 141).

Если Солнце непрерывно теряет столько своей массы — 30 миллионов египетских пирамид в год (рис. 142), — то не угрожает ли это устойчивости нашей планетной системы? Не расстраивает ли это установившегося в ней порядка, не нарушает ли рассчитанного бега планет? Да, такое нарушение, безусловно, должно быть. Но масса Солнца так невообразимо велика, что указанная потеря для него мало ощутительна. Вычислено, что вследствие уменьшения солнечной массы Земля должна медленно удаляться от Солнца; орбита ее с каждым годом расширяется на 1 см. Миллион лет пройдет, прежде чем продолжительность года увеличится вследствие этого на 4 секунды. Как видим, практически изменение ничтожно.

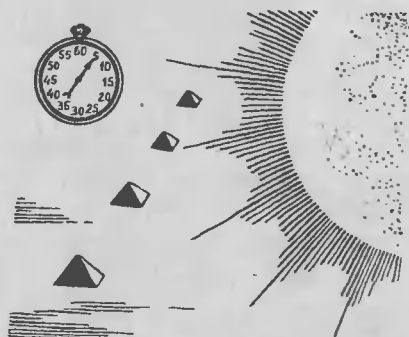


Рис. 141. Сколько массы теряет ежесекундно Солнце путем излучения (в. 240)?

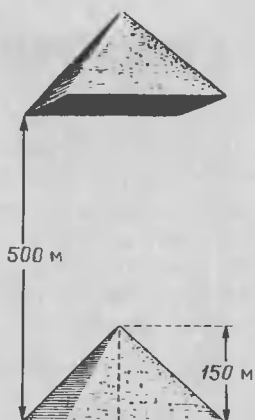


Рис. 142. Энергия, способная поднять пирамиду Хеопса на высоту 500 м, обладает массой в 2,4 г (в. 240).

В отдаленные эпохи существования Земли, когда Солнце было горячее и посылало со своими лучами больше энергии, потеря солнечной массы была значительнее, а соответственно этому были заметнее и вытекающие отсюда последствия. Если вспомним, что Земля родилась около 2000 миллионов лет назад, то придем к заключению, что в связи с потерей солнечной массы орбита нашей планеты в ту отдаленную эпоху была теснее, а продолжительность года — соответственно, короче. При допущении, что интенсивность солнечного излучения в раннюю эпоху существования Земли была в 1000 раз больше, мы получаем для продолжительности года в те времена величину, на 40 суток меньшую, нежели теперь: год длился 325 суток.

Таковы некоторые из следствий весомости энергии. Незаметные в обыденной обстановке, они становятся ощутительными в масштабе процессов космических.

**241.** С тех пор, как в науке утвердился так называемый принцип относительности Эйнштейна, поколебались основные законы старой механики, которые казались незыблемо установленными навсегда. В кругу не-специалистов, слышавших кое-что об этом революционном научном перевороте, возникло мнение,

что основы старой механики, механики Галилея и Ньютона, на которую опираются техника и промышленность, окончательно уже устарели и должны быть сданы в архив науки.

То, что положения старой механики продолжают еще в наши дни фигурировать в школьных учебниках, что ими проникнута по-прежнему вся техническая литература, вызывает у мало осведомленных людей серьезное недоумение. В прессе приходится встречать даже выражение возмущения «закоренелой отсталостью» наших технических авторов, которые продолжают опираться в своих расчетах на «метафизический закон независимости действия сил», установленный Галилеем, на закон неизменности массы, провозглашенный Ньютоном, и т. п.

Чтобы установить, насколько подобные нарекания обоснованы, рассмотрим один из основных законов старой механики: закон сложения скоростей. Согласно этому закону правило сложения скоростей  $v$  и  $v_1$ , направленных в одну сторону, математически выражается так:

$$u = v + v_1.$$

Теория относительности отвергла этот простой закон и заменила его другим, более сложным, согласно которому скорость  $u$  всегда меньше  $v$ . Старый закон оказался неверен. Но насколько неверен? Можем ли мы практически пострадать оттого, что продолжаем применять старое правило? Вникнем в новую формулу сложения таких скоростей. Вот она:

$$u = \frac{v + v_1}{1 + \frac{vv_1}{c^2}}.$$

Здесь буквы  $u$ ,  $v$  и  $v_1$  имеют прежнее значение, а буквой  $c$  обозначена скорость света. Новая формула отличается от старой только присутствием члена  $vv_1/c^2$ , который при небольших скоростях  $v$  и  $v_1$  очень мал, так как скорость света  $c$  чрезвычайно велика. Это станет яснее из конкретного примера.

Сделаем расчет для наибольших скоростей, с какими имеет дело современная техника. Самая быстроходная машина — паровая турбина. При 30 000 оборотах в минуту и 15 см диаметра вращающегося колеса мы

имеем линейную скорость 225 м/с. Большей скорости достигают артиллерийские снаряды—около 1 км/с. Возьмем  $v=v_1=1$  км/с и подставим в обе формулы—старую и новую;  $c$ —скорость света, равна 300 000 км/с.

Старая формула  $u=v+v_1$  дает для  $u$  величину 2 км/с. Новая формула даст

$$u = \frac{2}{1 + \frac{1}{90\,000\,000\,000}}$$

Вычислив это выражение, мы получим в результате

$$u = 1,999\,999\,999\,977 \text{ км/с.}$$

Разница, безусловно, есть, но буквально на тысячную долю поперечника мельчайшего атома!

Вспомним, что самые точные измерения длины не идут дальше 7-й цифры результата, а в технике обычно довольствуются 4—5 цифрами; у нас же отступление от истинного результата сказывается только на 12-й цифре, потому что оно равно 0,000 000 000 003.

Результат почти не изменится, если, заглянув в будущее, позаимствуем оттуда еще большую скорость, а именно скорость полета ракетного корабля для межпланетных путешествий, которая превышает скорость пушечного снаряда в десятки раз.

Итак, «старый» закон сложения скоростей не сделался «метафизическим» для практической техники: он по-прежнему властвует над всеми производственными движениями. И только для скоростей, в тысячу раз больших, нежели скорость межпланетной ракеты, т. е. для скоростей в десятки тысяч километров в секунду, начинает сказываться неточность старого правила сложения скоростей. С такими огромными скоростями техника не имеет дела—это область теоретической и отчасти лабораторной физики, которая и работает в таких случаях с новой формулой.

Обратимся теперь к закону постоянства массы. Старая механика, механика Ньютона, основана на том, что масса присуща данному телу независимо оттого, движется оно или покоится. Новая механика, механика Эйнштейна, утверждает противное: масса тела не остается постоянной; у тела движущегося она больше, нежели у неподвижного. Раз так, то не будут ли ошибочны все обычные технические расчеты?

Установим на примере летящего снаряда, может ли ожидаемая разница быть практически замечена. Посмотрим, насколько летящий снаряд массивнее неподвижного. Теория относительности утверждает, что прибавка массы движущегося тела, масса которого в покое была равна  $m$ , составляет

$$m \left( \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} - 1 \right).$$

Здесь  $v$  — скорость тела,  $c$  — скорость света.

Если Вы дадите себе труд проделать вычисление, приняв  $v = 1$  км/с, то узнаете, что прибавка массы составляет для летящего снаряда долю, равную 0,000 000 000 005 массы неподвижного снаряда.

Как видим, масса возросла на величину, абсолютно неуловимую самым точным взвешиванием<sup>\*)</sup>. Точнейшие весы, какими располагает наука, определяют массу с точностью до 0,00000001 ее величины. От них, следовательно, укрылась бы разница даже в тысячу раз большая, нежели та, какою пренебрегает старая механика. В каюте будущего межпланетного корабля, летящего со скоростью десятка километров в секунду, все аппараты во время полета увеличатся в массе на 0,0000000005 долю ее величины в состоянии покоя. Эта доля больше, но и она лежит за пределами достижимой точности измерения.

О законе постоянства массы мы должны, следовательно, повторить то же, что сказано было о законе сложения скоростей: практически он остается вполне верным, и инженеры могут спокойно продолжать им пользоваться, не боясь впасть в ощутимую ошибку. Другое дело — физики, производящие вычисления или опыты над быстро движущимися электронами (скорость которых может достигать 95% скорости света и даже больше); в таких случаях приходится вести расчеты уже по законам новой механики.

А как обстоит дело с законом постоянства массы в области химии, с великим принципом Лавуазье?

---

<sup>\*)</sup> Конечно, взвесить движущееся тело с помощью весов невозможно. Определение массы в подобных случаях приходится выполнять косвенными приемами. Но приемы эти не могут дать результата более точного, чем непосредственное взвешивание покоящегося тела.

Строго говоря, и он должен теперь быть признан неточным. Согласно Лавуазье, 2 г водорода и 16 г кислорода, соединяясь химически, должны дать ровно 18 г воды. По Эйнштейну же должно получиться не ровно 18, а меньше — именно

17,9999999978 г.

На бумаге есть некоторая разница, но обнаружить ее нельзя никакими весами.

Итак, мы вправе утверждать без всяких оговорок, что положения механики Эйнштейна не меняют ничего в современной технике. Промышленность может по-прежнему уверенно опираться на законы ньютоновской механики.

**242.** Убеждение, будто литр и кубический дециметр одно и то же, ошибочно. Они весьма близки по величине, однако не тождественны. Узаконенный литр современной системы мер производится не от кубического дециметра, а от килограмма, и представляет собой объем килограмма чистой воды при температуре ее наибольшей плотности. Объем этот больше кубического дециметра на  $27 \text{ мм}^3$ .

Итак, литр несколько больше кубического дециметра.

**243.** Не сделав расчета, трудно дать правдоподобный ответ на этот вопрос. Расчет несложен: при диаметре паутинной нити  $0,0005 \text{ см}$  и плотности  $1 \text{ г/см}^3$  один километр нити должен весить

$$\frac{3,14 \cdot 0,0005^2}{4} \cdot 100000 \approx 0,02 \text{ г},$$

а нить длиной в  $400\,000 \text{ км}$  (округленное расстояние от Земли до Луны)

$$0,02 \text{ г} \cdot 400\,000 = 8 \text{ кг}.$$

Такой груз можно удержать в руках.

**244.** Ответ на оба вопроса задачи одинаков: пароходы вернутся к бутылкам одновременно. Решая задачу, можно прежде всего принять во внимание, что река несет на себе бутылки и пароходы с одной и той же скоростью и что, следовательно,

течение не изменяет их относительного расположения. Можно принять поэтому, что скорость течения равна нулю. А при таком условии, т. е. в стоячей воде, каждый пароход подойдет к бутылке спустя столько же времени (после поворота), сколько прошло с тех пор, как он ее покинул, т. е. через четверть часа.

**245.** Ошибочно полагать, что платформа не сдвинется совсем, так как вес человеческого тела при приседании не меняется. Та сила, которая при приседании увлекает туловище вниз, тянет ноги вверх: давление их на платформу уменьшается, и она подается вверх.

**246.** Противоречие объясняется тем, что падение с нераскрытым парашютом было ошибочно принято за свободное, не замедляемое сопротивлением воздуха. Между тем оно существенно отличается от падения в несопротивляющейся среде.

Попробуем установить, хотя бы приближенно, подлинную картину падения при затяжном прыжке. Будем пользоваться для расчетов следующей найденной из опыта приближенной формулой для величины  $f$  сопротивления воздуха при рассматриваемых условиях:

$$f = 0,3v^2H,$$

где  $v$  — скорость падения в м/с. Сопротивление, как видим, пропорционально квадрату скорости, а так как парашютист падает с возрастающей скоростью, наступает момент, когда сила сопротивления делается равной весу тела. С этого момента скорость падения расти больше не будет — падение из ускоренного становится равномерным.

Для парашютиста это наступает тогда, когда его вес (вместе с парашютом) делается равным  $0,3v^2$ . Принимая вес снаряженного парашютиста равным 900 Н, получаем

$$0,3v^2 = 900,$$

откуда  $v = 55$  м/с.

Итак, парашютист падает ускоренно лишь до тех пор, пока не достигнет скорости 55 м/с. Это наибольшая скорость, с какой он опускается, в дальнейшем скорость уже не возрастает. Определим (опять приближенно), сколько секунд понадобилось парашютисту для достижения этой максимальной скорости. Примем

во внимание, что в самом начале падения, пока скорость мала, сопротивление воздуха ничтожно, и тело падает, как свободное, т. е. с ускорением  $9,8 \text{ м/с}^2$ . К концу же интервала ускоренного движения, когда устанавливается равномерное падение, ускорение равно нулю. Для нашего приближенного расчета можно допустить, что ускорение в среднем равнялось

$$\frac{9,8+0}{2}=4,9 \text{ м/с}^2.$$

Если принять таким образом, что секундная скорость возрастала на  $4,9 \text{ м/с}^2$ , то величины  $55 \text{ м/с}$  она достигает по истечении

$$55:4,9=11 \text{ с.}$$

Путь  $S$ , проходимый телом за  $11 \text{ с}$  такого ускоренного движения, равен

$$S=\frac{at^2}{2}=\frac{4,9 \cdot 11^2}{2} \approx 300 \text{ м.}$$

Теперь выясняется подлинная картина падения Евдокимова. Первые  $11 \text{ с}$  он падал с постепенно уменьшающимся ускорением, пока приблизительно на трехсотом метре пути не достиг скорости  $55 \text{ м/с}$ . Остальной путь затяжного прыжка Евдокимов проходил в равномерном движении со скоростью  $55 \text{ м/с}$ . Равномерное движение согласно нашему приближенному расчету длилось

$$\frac{7900-300}{55} \approx 138 \text{ с,}$$

а весь затяжной прыжок

$$11+138=149 \text{ с,}$$

что мало отличается от истинной продолжительности ( $142 \text{ с}$ ).

Сделанный нами элементарный расчет надо рассматривать лишь как первое приближение к действительности, так как он основан на ряде упрощающих допущений.

Приведем для сравнения данные, полученные опытным путем: при весе снаряжения парашютиста  $8,2 \text{ Н}$  максимальная скорость устанавливается на двенадцатой секунде, когда парашютист опускается на  $425-460 \text{ м}$  (Забелин М. Прыжок с парашютом, 1933).



**247.** Прежде всего отметим, что первоначальный запас потенциальной энергии обоих шаров одинаков, так как массы их равны, и оба шара опускаются с одинаковой высоты. Далее необходимо иметь в виду, что для шара, движущегося между досками, радиус круга качения меньше, чем для шара, скатывающегося по плоскости ( $r_2 < r_1$ ).

Для шара, скатывающегося по плоскости, имеем, как в задаче 44:

$$ph = \frac{mv_1^2}{2} + \frac{K\omega_1^2}{2}.$$

Для шара, движущегося между досками,

$$ph = \frac{mv_2^2}{2} + \frac{K\omega_2^2}{2}.$$

Подставляя

$$\omega_1 = \frac{v_1}{r_1}, \quad \omega_2 = \frac{v_2}{r_2},$$

получаем

$$\frac{mv_1^2}{2} + \frac{Kv_1^2}{2r_1^2} = \frac{mv_2^2}{2} + \frac{Kv_2^2}{2r_2^2}.$$

После преобразования

$$v_1^2 \left( \frac{m}{2} + \frac{K}{2r_1^2} \right) = v_2^2 \left( \frac{m}{2} + \frac{K}{2r_2^2} \right)$$

находим

$$\frac{v_1^2}{v_2^2} = \frac{\frac{m}{2} + \frac{K}{2r_2^2}}{\frac{m}{2} + \frac{K}{2r_1^2}}.$$

Так как ранее мы установили, что  $r_2 < r_1$ , то числитель правой дроби больше знаменателя, и, следовательно,  $v_1 > v_2$ : шар движется по плоскости быстрее, чем между досками, и достигнет конца наклонного пути раньше.

**248.** 1) При сверхускоренном падении точки крепления концов цепи будут двигаться вниз быстрее, чем звенья самой цепи, которые будут стремиться падать с ускорением  $g < g_1$ . Средние звенья будут отставать от концевых, и цепь выгнется вверх под действием избытка ускорения  $g_1 - g$ , направленного

вверх. Другими словами, цепь словно будет *падать вверх* с ускорением  $g_1 - g$ .

2) По той же причине маятник перекинется вверх и будет совершать колебания около отвесного положения с периодом

$$t = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g_1 - g}},$$

где  $l$  — приведенная длина маятника.

3) Так как флакон будет падать вниз быстрее своего содержимого, вода окажется вне флакона, над ним. Короче сказать, вода выльется из флакона *вверх*.

**249.** Нельзя говорить о переносе зародышей сол-  
нечными лучами на Землю с Марса или  
с Нептуна, потому что давление световых волн направ-  
лено от Солнца, а не к Солнцу, как утверждает  
учебник. В книге Аррениуса мы и не находим подобных  
утверждений. Он пишет:

«Нарисуем картину того, что должно было бы  
произойти, если бы микроорганизм, отделившись от  
Земли, был отброшен давлением солнечных лучей  
в пространство... Орбиту Марса такое тельце пройдет  
уже через 20 дней, орбиту Юпитера через 80 дней,  
орбиту Нептуна через 14 месяцев».

Числа те же, но относятся они к явлению, проте-  
кающему в обратном направлении.

**250.** За 1 с эскалатор перемещает свои ступени  
вверх на  $1/80$  полной высоты подъема. Пас-  
сажир по неподвижному эскалатору взбирается за  
1 с на  $1/240$  полной высоты подъема. Следовательно,  
на движущемся вверх эскалаторе пассажир будет под-  
ниматься ежесекундно на

$$\frac{1}{80} + \frac{1}{240} = \frac{1}{60}$$

полной высоты подъема. Следовательно, продолжи-  
тельность подъема составит

$$1 : \frac{1}{60} = 60 \text{ с.}$$

Пассажир поднимается за 1 мин.

По подсчетам Г. И. Мишкевича, за 43 года своей творческой деятельности Яков Исидорович Перельман написал более тысячи статей для различных газет и журналов, 105 книг и брошюр, в том числе 47 научно-популярных, 40 научно-занимательных и 18 учебников и учебных пособий. Ниже для удобства читателей мы приводим некоторые из этих изданий, а также публикации о жизни и творчестве Я. И. Перельмана, перечень книг, упоминаемых им на страницах книги-викторины «Знаете ли Вы физику?», и указываем некоторые другие избранные издания, которые, возможно, привлекут внимание любителей физических задач.

### КНИЖНЫЕ И ЖУРНАЛЬНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ О Я. И. ПЕРЕЛЬМАНЕ

*Глушко В. П.* Рождение мечты и первые шаги (автобиографический очерк).— В кн.: «Путь в ракетной технике. Избранные труды (1924—1946)».— М.: Машиностроение, 1977.— С. 459—494.

*Депман И. Я.* История арифметики.— М.: Гос. изд-во учебно-педагогической л-ры Мин-ва просвещения РСФСР, 1959.— Гл. VII: Арифметические забавы и занимательные задачи в учебниках арифметики.

*Ланина И. Я.* Педагогическое наследие Я. И. Перельмана (К 100-летию со дня рождения).— В журн.: «Физика в школе».— 1982.— № 6.— С. 46—48.

*Мишкевич Г. И.* Бациллоноситель острейшего перельманита (о Я. И. Перельмане).— В альманахе «Хочу все знать».— Л.: Детская литература, 1968.— С. 300—311.

*Мишкевич Г. И.* Встреча в «Астории».— В журн.: «Уральский следопыт».— 1962.— № 7.— С. 36—39.

*Мишкевич Г. И.* Доктор занимательных наук. Жизнь и творчество Якова Исидоровича Перельмана.— М.: Знание, 1986.

*Мишкевич Г. И.* Дом занимательной науки.— В издании: «Педагогическая энциклопедия».— М.: Сов. энциклопедия (в печати).

Мишкевич Г. И. Дом занимательной науки.— В журн. «Наука и жизнь».— 1968.— № 3.— С. 71—77.

Мишкевич Г. И. Дом чудес на Фонтанке (О Доме занимательной науки).— В альманахе: «Хочу все знать».— Л.: Детгиз, 1983.— С. 134—141.

Мишкевич Г. И. Перельман Яков Исидорович (1922—1942).— В издании: «Педагогическая энциклопедия».— М.: Сов. энциклопедия. (В печати.)

Мишкевич Г. И. Пропагандист космических проблем. (О Якове Исидоровиче Перельмане).— В журн. «Наука и жизнь».— 1983.— № 5.— С. 57—61.

Мишкевич Г. И. Три часа у Герберта Уэллса.— В сб.: «Вторжение в Персей».— Л., 1972.

Мишкевич Г. И. На меридиане знаний (К 100-летию со дня рождения Я. И. Перельмана).— В газете: «Вечерний Ленинград» за 22 ноября 1982 г.

Мишкевич Г. И. Чародей с Плуталовой улицы.— В журн. «Квант».— 1971.— № 3.— С. 58—61.

Мишкевич Г. И. (Цилин). Чудесный дом (о Доме занимательной науки).— В журн.: «Юный пролетарий».— 1935.— № 24.— С. 40—43.

Мишкевич Г. И. Это было в ДЗН...— В журн. «Наука и жизнь».— 1973.— № 7.— С. 43—45.

Разгон Л. Э. Мастер «занимательной науки».— В кн.: «Живой голос науки. Литературные портреты».— М.: Детская литература, 1984.— С. 213—248.

Френкель В. Я. Рыцарь научно-популярной книги.— В журн.: «Квант».— 1982.— № 11.— С. 18—21.

## КНИГИ Я. И. ПЕРЕЛЬМАНА

Азбука метрической системы. Общепонятное изложение для деревни.— Л.: Научное книгоизд-во, 1925.— 20 с.

Алгебра на клетчатой бумаге.— Л.: Изд. Дома занимательной науки, 1940.— 16 с.

Арифметические ребусы.— Л.: Изд. Дома занимательной науки, 1939.— 20 с.

Арифметические фокусы.— Л.: Изд. Дома занимательной науки, 1940.— 16 с.

В мировые дали. О межпланетных перелетах.— М.: Изд-во Осовиахима СССР, 1930.— 28 с. (Б-ка журнала «Авиация и химия», № 2.)

Веселые задачи. 101 головоломка для юных математиков.— Пг.: Тип. товарищества А. С. Сытина, 1916.— 158 с.

(Совместно с Прянишниковым В. И.) Вечера занимательной науки. Вопросы, задачи, опыты, наблюдения из области астрономии, метеорологии, физики, математики.—Л.: Изд. Леноблono, 1936.

Вечные двигатели. Почему они невозможны.—Л.: Изд. Дома занимательной науки. 1939.—21 с.

Газетный лист. Электрические опыты. Рассказ для детей среднего возраста.—М.—Л.: Радуга, 1925.—50 с.

Геометрические головоломки со спичками.—Л.: Изд. Дома занимательной науки, 1939.—20 с.

Геометрия и начатки тригонометрии. Краткий учебник и собрание задач для самообучения.—Л.: Изд. Северо-Западного областного промбюро ВСНХ, 1926.—159 с.

Далекie миры. Физическое описание планет.—Изд. 2-е, просм. и исправл.—Пг.: Изд-во П. П. Сойкина, 1919.—48 с.

Дважды два—пять! Математические софизмы.—Л.: Изд. Дома занимательной науки, 1939.—16 с.

Для юных математиков. Первая сотня головоломок (веселые задачи).—Изд. 3-е.—Л.: Начатки знаний, 1925.—126 с.

Для юных математиков. Вторая сотня головоломок.—Л.: Начатки знаний, 1924.—109 с.

Для юных физиков. Опыты и развлечения.—Пг.: Начатки знаний, 1924.—94 с.

Живая геометрия. Теория и задачи.—Харьков—Киев: Униздат, 1930.

Живая математика. Математические рассказы и головоломки.—Л.—М.: Гостехтеоретиздат, 1934.—208 с.

Загадки и диковинки в мире чисел.—Пг.: Наука и школа, 1923.—132 с.

Задумай число. Математический отгадчик.—Л.: Изд. Дома занимательной науки, 1941.—16 с.

Занимательная алгебра.—Изд. 13-е, стереот./Под ред. и с доп. В. Г. Болтянского.—М.: Наука, 1978.—200 с.

Занимательная арифметика. Загадки и диковинки в мире чисел.—Изд. 9-е/С доп. А. З. Рывкина.—М.: Физматгиз, 1959.—191 с.

Занимательная астрономия.—Изд. 11-е/Под ред. П. Г. Куликовского.—М.: Наука, 1966.

Занимательная геометрия.—Изд. 11-е, стереот./Под ред. и с доп. Б. А. Кордемского.—М.: Физматгиз, 1959.—303 с.

Занимательная геометрия на вольном воздухе и дома.—Изд. 4-е, вновь просмотр.—Л.: Время, 1933.—240 с.

Занимательная математика. Математические рассказы и очерки Курда Лассвица, Уэллса, Жюль Верна и др.—Л.: Время, 1927.—128 с.

Занимательная механика.—Изд. 5-е, исправл./Под ред. И. Я. Штаермана.—М.—Л.: Гостехиздат, 1948.—172 с.

Занимательные задачи.—Изд. 4-е, доп.—Л.: Молодая гвардия, Ленинградское отд-е, 1935.—156 с.

Занимательные задачи и опыты.—М.: Детгиз, 1959.—527 с. (Школьная б-ка.)

Занимательная физика. Парадоксы, головоломки, задачи, опыты, замысловатые вопросы и рассказы из области физики.—Изд. 14-е/Под ред. А. Б. Млодзеевского.—М.—Л.: Гостехиздат, 1947.—Кн. 1.—267 с.; Кн. 2.—287 с.

Знаете ли Вы физику? Физическая викторина для юношества.—Л.—М.: Гостехиздат, 1934.—316 с.

К звездам на ракете.—Харьков: Украинский рабочий, 1934.

Как решать задачи по физике.—М.—Л.: ГТТИ, 1931.

Квадратура круга.—Л.: Изд. Дома занимательной науки, 1941.

Лабиринты.—Изд. 2-е.—М.—Л.: ГИЗ, 1931.

Магические квадраты.—Л.: Изд. Дома занимательной науки, 1940.

Магнит и мотор. Конструкция В. А. и В. В. Багеньских и П. В. Леонтьева.—Л.: Политехническое воспитание, 1933.—30 с.

Математика на вольном воздухе.—Л.: Политехническая школа, 1931.

Математика на каждом шагу. Книга для внеклассного чтения школ ФЗС.—М.—Л.: Учпедгиз, 1931.

Между делом. Опыты и развлечения для детей старшего возраста.—М.—Л.: Радуга, 1925.—90 с.

Межпланетные путешествия. Полеты в мировое пространство и достижение небесных светил.—Пг.: Изд-во П. П. Сойкина, 1915.—104 с.

Метрическая система. Обиходный справочник. Таблицы перевода мер и общие сведения.—Изд. 2-е, перераб. и доп.—Пг.: Научное книгоиздательство, 1924.—88 с.

Мир планет. Астрономический очерк.—Изд. 3-е, перераб. и доп.—Л.: Академическое изд-во, 1924.—72 с.

Найдите ошибку. Геометрические софизмы.—Л.: Изд. Дома занимательной науки, 1940.—16 с.

Наука на досуге.—Л.: Молодая гвардия, 1935.

(Совместно с Глязером С. В., Прянишниковым В. И., Рюминым В. В.) Наука на досуге. Сборник занимательных задач, головоломок, фокусов, игр из области физики, математики, географии, астрономии, метеорологии.—Л., 1936.

Научные задачи и развлечения. Головоломки, опыты, занятия.—М.—Л.: Молодая гвардия, 1927.—24 с.

Не верь глазам своим! — Л.: Прибой, 1926. — 20 с. (Серия «Досуг пионера».)

Новые и старые меры. Метрические меры в обиходной жизни и простейшие приемы переводов их в русские меры. — Изд. 5-е. — М. — Л.: ГИЗ, 1925. — 48 с. Учебное пособие для школ I и II ступени.

Новый задачник к краткому курсу геометрии. — М. — Пг.: ГИЗ, 1922. — 132 с.

Новый задачник по геометрии (концентрический). Для 5-го, 6-го и 7-го гг. обучения. — Изд. 8-е, вновь просмотр. и доп. — М. — Л.: ГИЗ, 1930. — 216 с.

Обманы зрения. — Л.: Изд. Дома занимательной науки, 1939. — 4 с.

Одним росчерком. Вычерчивание фигур одной непрерывной линией. — Л.: Изд. Дома занимательной науки, 1940.

Полет на Луну. Современные проекты межпланетных полетов. — Л.: Сеятель, 1925. — 43 с.

Политехническая математика. Методическое руководство к набору учебных пособий для школ ФЗС. — Л.: Кооперативное промысловое товарищество «Новая школа», 1931.

Практические занятия по геометрии. Образцы, темы и материалы для упражнения. Пособие для учащихся и учащихся. — М. — Пг.: ГИЗ, 1923. — 174 с.

Пропаганда метрической системы. Методический справочник для лекторов и преподавателей. — Изд. 2-е. — Л.: Научное книгоиздательство, 1925. — 76 с.

Путешествия на планеты. Полеты в мировое пространство и достижение небесных светил. — Изд. 3-е. — Пг.: Изд-во А. Ф. Маркса, 1919. — 79 с.

Радуга. — М.: Детский мир, 1961. — 17 с.

Развлечения со спичками. — Л.: Прибой, 1926. — 60 с. (Серия «Досуг пионеров».)

Ракетой на Луну. — Изд. 4-е, доп. — М.: Детгиз, 1935. — 77 с.

Руководство по метрической системе мер и сборник упражнений. — Л.: ГИЗ, 1925. — 52 с.

Сильны ли Вы в арифметике? — Л.: Изд. Дома занимательной науки, 1941. — 20 с.

Солнечные затмения. — Л.: Изд. Дома занимательной науки, 1941. — 36 с.

Таблицы и правила для вычислений. — Л.: Изд. Северо-Западного областного промбюро ВСНХ, 1931. — 65 с.

Тень тяготения и ее свойства. — Пг.: Изд. автора, 1915. — 15 с.

Техническая физика. Твердые тела, жидкости, газы. Пособие для самообучения и собрание практических

упражнений.—Л.: Изд. Северо-Западного областного промбюро ВСНХ, 1927.—167 с.

Фигурки-головоломки из 7 кусочков.—Л.—М.: Радуга, 1927.—87 с.

Физика на каждом шагу.—М.: Молодая гвардия, 1983.—187 с.

Физическая хрестоматия. Пособие по физике и книга для чтения.—Изд. 2-е, доп. (Вып. 1—4.)—Л.: ГИЗ, 1924.—25.

Вып. 1: Механика твердых, жидких и газообразных тел.—1924.—168 с.

Вып. 2: Теплота.—1924.—168 с.

Вып. 3: Звук и волнообразное движение.—1925.—106 с.

Вып. 4: Свет и оптические приборы.—1925.—174 с.

Фокусы и развлечения.—М.—Л.: Детиздат, 1937.—170 с.

Хрестоматия-задачник по начальной математике. Человек—Природа—Техника.—Изд. 2-е.—Л.: ГИЗ, 1925.—191 с.

Циолковский, его жизнь, изобретения и научные труды. По поводу 75-летия со дня рождения.—Л.—М.: ГТТИ, 1932.—62 с.

Циолковский. Жизнь и технические идеи.—М.—Л.: ОНТИ, Главная редакция научно-популярной и юношеской литературы, 1937.—168 с.

Числа-великаны.—М.—Л.: Радуга, 1925.—64 с. («Б-ка для юношества».)

(Совместно с Нечаевым А. П.) Чудеса без чудес. Маленькая физика в применении к забавам.—Изд. 3-е.—М.—Пг., 1923.

Чудо нашего века.—М.—Л.: Радуга, 1925.—66 с.

Юный землемер.—Л.: Прибой, 1926.—36 с. (Серия «Знание—пионеру».)

Юный физик в пионерском лагере.—Л.: Изд. Дома занимательной науки, 1941.—24 с.

Ящик загадок и фокусов.—М.—Л.: ГИЗ, 1929.—132 с.

#### ИЗДАНИЯ, УПОМИНАЕМЫЕ В КНИГЕ Я. И. ПЕРЕЛЬМАНА «ЗНАЕТЕ ЛИ ВЫ ФИЗИКУ?»

*Аррениус С.* Жизненный путь планет: Пер. с нем./Под ред. В. А. Костицына.—М.—Пг.: ГНТИ, 1923.—112 с. (Серия «Современные проблемы естествознания».)

*Берлинер А.* Курс физики. В элементарном изложении: Пер. с нем./Под ред. и с предисловием П. Н. Беликова и Г. С. Ландсберга.—М.—Л.: ГИЗ, 1932.—Ч. 1: Механика и теплота.—451 с.; Ч. 2: Электричество. Оптика.—408 с.

*Брегг У.* О природе вещей. [6 лекций о последних открытиях в области физики 1923—24 гг.]: Пер. с англ.



П. С. Тартаковского и Б. Н. Финкельштейна.— Изд. 2-е.— М.—Л.: ГТТИ, 1932.—152 с.

Великанов М. А. Гидрология суши.— Изд. 3-е, доп. и перераб.— М.—Л.: НТИ, 1937.—251 с.

Гано А. Полный курс физики с кратким обзором метеорологических явлений: Пер. с франц. Ф. Павленкова и В. Черкасова.— Изд. 7-е, значит. доп.— В 2-х частях.— Спб.: Тип. тов-ва «Общественная польза» и Ю. Н. Эрлиха, 1988.— Ч. 1:—456 с. Ч. 2:—506 с.

Гримзель Э. Курс физики. Для студентов, преподавателей и для самообразования: Пер. с нем./Под ред. проф. А. Бачинского с 7-го нем. изд., перераб. Р. Томашеком.— М.—Л.: ГТТИ, 1933.

Т. 1, вып. 1: Физическая механика.—411 с.

Т. 1, вып. 2: Учение о теплоте. Учение о колебаниях и волнах. Акустика.—301 с.

Гэмфриз В. Дж. Народные приметы и парадоксы погоды: Пер. с англ. М. Н. Жаркова/Под ред. и с доп. С. Н. Жаркова.— М.—Л.: ГИЗ, 1925.—79 с.

Даннеман Ф. История естествознания. Естественные науки в их развитии и взаимодействии: Пер. со 2-го нем. изд. Горнфельда/Под ред. М. Л. Левина и О. Ю. Шмидта.— М.: Медгиз.

Т. 1: От зачатков науки до эпохи Возрождения. (Пер. А. Г. Горнфельда.)—1932.—432 с.;

Т. 2: От эпохи Галилея до середины XVIII века. (Пер. П. С. Юшкевича.)—1935.—408 с.;

Т. 3: Расцвет современного естествознания до установления принципа сохранения энергии. (Пер. П. С. Юшкевича.)—1938.—357 с.

Делоне Н. Б. Лекции по практической механике, читанные в Варшавском политехническом институте императора Николая II ординарным профессором Н. Б. Делоне.— Спб.: Изд. К. Л. Риккера, 1901.—177 с.

Забелин М. Г. Прыжок с парашютом.— М.: Молодая гвардия, 1933.—62 с.

Карпентер Э. Современная наука. Критический очерк: Пер. С. А. Т., Предисл. Л. Н. Толстого.— М.: Посредник, 1911.—40 с.

Кэрролл Л. Приключения Алисы в Стране чудес. Сквозь зеркало и что там увидела, или Алиса в Зазеркалье/Изд. подг. Н. М. Демурова.— М.: Наука, 1978.—358 с.

Лакур П., Анпель Я. Историческая физика: Пер. с нем./Под ред. «Вестника опытной физики и элементарной математики».—Одесса: Mathesis, 1908.

Т. 1: Мироздание, до 1630 г.—Свет до Ньютона.—Сила.—Мироздание, после 1630 г.—Природа.—Спектральный анализ.—435 с.

Т. 2: Теплота.—Магнетизм.—Электричество до 1790 г.—Электрический ток.—Погода.—434 с.

*Лехер Э.* Курс физики для медиков и биологов: Пер. с 4-го нем. изд./Под ред. и с предисл. Э. В. Шпольского.—М.—Л.: ГИЗ, 1926.—546 с.

*Лоренц Г. А.* Курс физики: Разрешенный автором пер. с нем./Под ред. Н. П. Кастерина, проф. Императорского Новороссийского университета.—Изд. 2-е, испр. и доп.—В 2-х т.—Одесса, 1912, 1915.

*Максвелл Дж. К.* Теория теплоты: Пер. с англ. М. Рудольфа.—Вып. 1.—Владимир: Тип. П. Ф. Новгородского, 1883.—75 с.

*Малинин А. Ф., Буренин К. П.* Руководство физики и собрание физических задач для гимназий и реальных училищ.—Изд. 12-е.—Вып. 1, 2.—М.: Книжный магазин В. В. Думова, 1904, 1905.

Вып. 1: Движение. Силы. Тяжесть. Гидростатика. Аэростатика. Теплота.

Вып. 2: Звук. Свет. Магнетизм. Электричество.

*Меншуткин Б. Н.* Курс общей (неорганической) химии.—Изд. 3-е, доп.—М.: ГНТИ, 1930.—642 с.

*Ньютон И.* Математические начала натуральной философии: Пер. с лат. и коммент. А. Н. Крылова/Под ред. и с предисл. Л. С. Полака.—М.: Наука, 1989.—687 с.

*Ньютон И.* Оптика, или трактат об отражениях, преломлениях, изгибаниях и цветах света: Пер. с 3-го англ. изд. (1721 г.) и с примеч. С. И. Вавилова.—Изд. 2-е, просмотр. Г. С. Ландсбергом.—М.: ГИТТЛ, 1954.—368 с.

*Оберт Г.* Пути осуществления космических полетов: Сокр. пер. с 3-го нем. изд./Под ред. Б. В. Раушенбаха.—М.: Оборонгиз, 1948.—232 с.

*Перельман Я. И.* Занимательная механика/Под ред. проф. И. Я. Штаермана.—Изд. 5-е, испр.—М.—Л.: ГИТТЛ, 1948.—172 с.

*Перельман Я. И.* Занимательная физика. Парадоксы, головоломки, задачи, опыты, замысловатые вопросы и рассказы из области физики/Под ред. проф. А. Б. Млодзеевского.—Изд. 15-е. М.—Л.: ГИТТЛ, 1949.—Кн. 1.—267 с. Кн. 2.—287 с.

*Перельман Я. И.* Межпланетные путешествия. Начальные основания звездоплавания.—Изд. 6-е, заново перераб. и знач. доп.—Л.: Прибой, 1929.—192 с.

*Перельман Я. И.* Техническая физика. Твердые тела. жидкости, газы. Пособие для обучения и собрание практических упражнений.—Л.: Изд. Северо-Западного областного промбюро ВСНХ, 1927.—167 с.

*Перельман Я. И.* Физика на каждом шагу.—М.: Молодая гвардия, 1933.—187 с.

*Пиотровский М. Ю.* Физика в летних экскурсиях. Пособие для единой трудовой школы и для самообразования.—Пг.: Изд-во «Сеятель» Е. В. Высоцкого, 1922.—144 с.

*Поль Р. В.* Введение в механику и акустику. Пер. с нем. проф. К. А. Леонтьева.—М.—Л.: ОГИЗ, 1932.—264 с.

*Постников А. П.* Начальный учебник физики.—Вып. 1.—М.: Тип. Карцева, 1883.—204 с.

*Реклю Э.* Земля. Описание жизни земного шара: Пер. с франц. / Под ред. и с доп. Н. К. Лебедева.—Т. 1—12.—М.: тип. тов-ва И. Д. Сытина, 1914.

Т. 1: Земля в мировом пространстве.

Т. 2: Поверхность Земли. Равнины и горы.

Т. 3: Круговорот воды на Земле. Снега и ледники.

Т. 4: Круговорот воды на Земле. Источники, реки и озера.

Т. 5: Подземные силы. Вулканы.

Т. 6: Землетрясения. Медленные колебания земной поверхности.

Т. 7: Океаны и моря.

Т. 8: Атмосфера и воздушные явления.

Т. 9: Климаты Земли.

Т. 10: Жизнь на Земле.

Т. 11: Земля и человек.

Т. 12: Труд и культура человека.

*Толстой Л. Н.* Первая русская книга для чтения.—Изд. 16-е.—М.: Изд. И. Д. Сытина, 1912.—44 с.

*Уэллс Г. Дж.* Первые люди на Луне: Пер. и обработка Я. И. Перельмана, с доп., его же «Проект Уэллса при свете науки».—Пг.: 4-я Гос. тип., 1919.—174 с.

*Хаустен Р. А.* Свет и цвета: Пер. с англ.—Изд. 2-е, испр. и доп. проф. Н. Т. Федоровым.—М.—Л.: ГТТИ, 1933.—148 с.

*Шокальский Ю. М.* Океанография.—Изд. 2-е.—Л.: Гидрометеиздат, 1959.—537 с.

*Цингер А. В.* Задачи и вопросы по физике.—Изд. 4-е.—М.—Пг.: Госиздат, 1923.—274 с.

*Эдсер Э.* Общая физика. Основные свойства материи / Под ред. засл. проф. СПб.: ун-та И. И. Боргмана.—СПб.: Естественный испытатель, 1913.—615 с.

Эйхенвальд А. А. Теоретическая физика.—Изд. 2-е.—М.—Л.: ГТТИ, 1933.

Ч. 1: Теория поля.—1932.—221 с.

Ч. 2: Общая механика.—1932.—325 с.

Ч. 3: Механика твердого тела.—1934.—218 с.

### ДЛЯ ЛЮБИТЕЛЕЙ РЕШАТЬ ЗАДАЧИ ПО ФИЗИКЕ

Задачи по физике.—Изд. 2-е, перераб.—Под ред. О. Я. Савченко.—М.: Наука, 1988.

Понимаете ли Вы физику?—М.: Знание, 1967.

Слободецкий И. Ш., Асламазов Л. Г. Задачи по физике.—М.: Наука, 1980. («Библиотечка «Квант». Вып. 5.)

Уокер Дж. Физический фейерверк. Вопросы и ответы по физике./Пер. с англ.—Изд. 2-е.—М.: Мир, 1989.

# СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие редакторов выпуска .....	3
Предисловие автора .....	7

## I. МЕХАНИКА

Вопросы      Ответы

1. Мельчайшая мера длины .....	9	20
2. Наибольшая мера длины .....	9	21
3. Легкие металлы. Металлы легче воды .....	9	21
4. Вещество наибольшей плотности .....	9	22
5. На необитаемом острове .....	9	23
6. Модель Эйфелевой башни .....	9	24
7. Тысяча атмосфер под пальцем .....	9	25
8. Сто тысяч атмосфер силою насекомого .....	10	25
9. Гребец на реке .....	10	27
10. Флаги азостата .....	10	27
11. Круги на воде .....	10	28
12. Закон инерции и живые существа .....	10	28
13. Движение и внутренние силы .....	10	29
14. Трение как сила .....	10	29
15. Трение и движение животных .....	10	30
16. Без трения .....	10	30
17. Натяжение веревки .....	11	31
18. Магдебургские полушария .....	11	32
19. Безмен .....	11	32
20. Движение лодки .....	11	33
21. На воздушном шаре .....	12	33
22. Муха в банке .....	12	34
23. Маятник Максвелла .....	12	35
24. Плотничный уровень в вагоне .....	13	35
25. Отклонение пламени свечи .....	13	37
26. Согнутый стержень .....	13	37
27. Два безмена .....	14	38
28. Рычаг .....	14	38
29. На платформе .....	15	39
30. Провисающая веревка .....	15	39
31. Увязший автомобиль .....	15	40
32. Трение и смазка .....	15	40
33. По воздуху и по льду .....	15	40
34. Фальшивые кости .....	16	41
35. Падение тела .....	16	42
36. Куда бросить бутылку? .....	16	42
37. Из вагона .....	16	43
38. Три снаряда .....	16	43
39. Путь брошенного тела .....	16	43

40. Наибольшая скорость артиллерийского снаряда	16	44
41. Прыжки в воду	16	45
42. На краю стола	16	45
43. На наклонной плоскости	16	46
44. Два шара	17	46
45. Два цилиндра	17	49
46. Песочные часы на весах	17	51
47. Механика в карикатуре	18	52
48. Грузы на блоке	18	53
49. Центр тяжести конуса	18	54
50. В падающей кабине	18	54
51. Чаинки в воде	18	55
52. На качелях	18	56
53. Притяжение земных предметов и небесных тел	19	58
54. Направление отвеса	20	60

## II. СВОЙСТВА ЖИДКОСТЕЙ

55. Вода и воздух	62	67
56. Самая легкая жидкость	62	68
57. Задача Архимеда	62	68
58. Сжимаемость воды	63	69
59. Стрельба по воде	63	70
60. Электрическая лампочка под автомобилем	63	70
61. Плавание в ртути	64	71
62. Погружение в сыпучий песок	64	72
63. Шарообразная форма жидкости	64	74
64. Капля воды	64	75
65. Капиллярное поднятие	64	76
66. В наклонной трубке	64	76
67. Движущиеся капли	64	76
68. Пластика на дне сосуда с жидкостью	65	78
69. Отсутствие поверхностного натяжения	65	78
70. Поверхностное давление	65	78
71. Водопроводный кран	65	79
72. Скорость вытекания	65	81
73. Задачи о ванне	65	82
74. Водяные вихри	66	91
75. В половодье и в межень	66	94
76. Волны прибоя	66	94
77. Задача Колладона	67	95

## III. ГАЗЫ

78. Третья составная часть воздуха	96	102
79. Самый тяжелый газ	96	103
80. Давят ли на нас 20 т?	96	103
81. Сила выдоха и дуновения	96	104
82. Давление пороховых газов	97	104
83. Мера атмосферного давления	97	105
84. Вода в опрокинутом стакане	97	105
85. Ураган и пар	97	107
86. Тяга заводской трубы	97	107
87. Где больше кислорода?	98	108
88. Пузырьки в воде	98	109

	Вопросы	Ответы
89. Облака .....	98	109
90. Пуля и мяч .....	98	110
91. Почему газ можно взвесить? .....	98	111
92. По примеру слона .....	98	114
93. Давление в гондоле стратостата .....	98	115
94. Ввод веревки в гондолу стратостата .....	99	116
95. Барометр, подвешенный к весам .....	99	117
96. Сифон в воздухе .....	99	118
97. Сифон в пустоте .....	99	119
98. Сифон для газов .....	100	122
99. Подъем воды насосом .....	100	123
100. Истечение газа .....	100	123
101. Проект дарового двигателя .....	101	124
102. Тушение пожара кипятком .....	101	124
103. Задача о резервуаре с газом .....	101	124
104. Воздушный пузырек на дне океана .....	101	125
105. Сегнерово колесо в пустоте .....	102	125
106. Вес сухого и влажного воздуха .....	102	126
107. Максимальное разрежение .....	102	127
108. Что мы называем «пустотой» .....	102	127
109. Почему существует атмосфера? .....	102	128
110. Газ, не заполняющий резервуара .....	102	129

#### IV. ТЕПЛОВЫЕ ЯВЛЕНИЯ

111. Происхождение шкалы Реомюра .....	130	135
112. Происхождение шкалы Фаренгейта .....	130	135
113. Длина делений на шкале термометра .....	130	136
114. Термометр для температур до 750 °C .....	130	137
115. Градусы термометра .....	130	137
116. Тепловое расширение железобетона .....	131	138
117. Наибольшее тепловое расширение .....	131	138
118. Наименьшее тепловое расширение .....	131	138
119. Аномалия теплового расширения .....	131	139
120. Дырочка в железном листе .....	131	139
121. Сила теплового расширения .....	131	140
122. Нагревание плотничьего уровня .....	131	142
123. Течения в воздухе .....	131	142
124. Теплопроводность дерева и снега .....	132	143
125. Медная и чугунная посуда .....	132	143
126. Замазывание рам на зиму .....	132	144
127. В натопленной комнате .....	132	144
128. Вода на дне реки .....	132	144
129. Замерзание рек .....	132	145
130. Температура атмосферы .....	132	146
131. Скорость нагревания .....	132	149
132. Температура пламени свечи .....	132	150
133. Гвозди и пламя .....	132	150
134. Что такое калория? .....	132	150
135. Нагревание воды в трех состояниях .....	132	151
136. Нагревание 1 см <sup>3</sup> меди .....	132	151
137. Тела наибольшей теплоемкости .....	132	151
138. Теплоемкость пищи .....	133	151
139. Самый легкоплавкий металл .....	133	151
140. Самый тугоплавкий металл .....	133	152

	Вопросы	Ответы
141. Нагревание стали .....	133	152
142. Бутылка воды во льду .....	133	152
143. Лед в воде .....	133	153
144. Замерзание воды в трубах .....	133	154
145. Скользкость льда .....	133	154
146. Понижение точки таяния льда .....	133	154
147. «Сухой лед» .....	134	155
148. Цвет водяного пара .....	134	156
149. Кипение воды .....	134	156
150. Нагревание паром .....	134	158
151. Кипящий чайник на ладони .....	134	158
152. Жарение и варка .....	134	159
153. Горячее яйцо в руке .....	134	159
154. Ветер и термометр .....	134	160
155. Принцип холодной стены .....	134	163
156. Калорийность дров .....	135	164
157. Калорийность пороха и керосина .....	135	165
158. Мощность горячей спички .....	135	166
159. Выведение пятен утюгом .....	135	166
160. Растворимость поваренной соли .....	135	166

#### V. ЗВУК И СВЕТ

161. Эхо .....	167	173
162. Звук грома .....	167	174
163. Звук и ветер .....	167	175
164. Давление звука .....	167	177
165. Почему дверь заглушает звук? .....	167	177
166. Звуковая линза .....	167	177
167. Преломление звука .....	167	178
168. Шум в раковине .....	167	179
169. Камертон и резонатор .....	167	179
170. Куда деваются волны звука? .....	168	179
171. Видимость лучей света .....	168	179
172. Восход Солнца .....	168	181
173. Тень проволоки .....	168	181
174. Тень облака .....	168	182
175. Чтение при лунном свете .....	169	182
176. Черный бархат и белый снег .....	169	183
177. Звезда и свеча .....	169	184
178. Цвет лунной поверхности .....	169	184
179. Почему снег белый? .....	169	184
180. Блеск начищенного сапога .....	169	185
181. Число цветов в спектре и радуге .....	169	186
182. Радуга .....	169	188
183. Сквозь цветные стекла .....	169	188
184. Изменение цвета золота .....	170	189
185. Дневное и вечернее освещение .....	170	189
186. Цвет неба .....	170	190
187. Искусственное затмение Солнца .....	170	191
188. Красный сигнал .....	171	192
189. Преломление и плотность .....	171	193
190. Две линзы .....	171	194
191. Светила близ горизонта .....	172	194
192. Луна из проколотого картона .....	172	196



	Вопросы	Ответы
193. Солнечная постоянная .....	172	197
194. Чернее всего .....	172	197
195. Температура Солнца .....	173	199
196. Температура мирового пространства .....	173	200

#### VI. РАЗНЫЕ ВОПРОСЫ

197. Магнитный сплав .....	205	213
198. Деление магнита .....	205	214
199. Железо на весах .....	205	214
200. Электрическое и магнитное притяжение и отталкивание .....	205	215
201. Емкость человеческого тела .....	206	216
202. Сопротивление нитей накала .....	206	216
203. Электропроводность стекла .....	206	216
204. Вред от частого включения электрических лампочек .....	206	216
205. Яркость электрических лампочек .....	206	216
206. Нить накала .....	206	217
207. Длина молнии .....	206	217
208. Смертельный трюк .....	206	217
209. Длина отрезка .....	206	218
210. Почему вода долбит камень? .....	206	218
211. Назначение «Дубинушки» .....	207	219
212. Два города .....	207	219
213. Бутылка на дне океана .....	207	220
214. Плитки «Иогансона» .....	207	221
215. Свеча в закрытой банке .....	207	222
216. Хронология термометрических шкал .....	208	223
217. Изобретатели термометров .....	208	224
218. Масса земного шара .....	208	224
219. Движение солнечной системы .....	208	225
220. К полету на Луну .....	209	225
221. Человек в среде без тяжести .....	209	226
222. Третий закон Кеплера .....	209	227
223. Вечное движение .....	210	228
224. Человеческий организм и тепловая машина .....	210	229
225. Свечение метеоров .....	210	231
226. Туманы в фабричных районах .....	210	233
227. Дым, пыль и туман .....	210	234
228. Скорость молекул воды .....	210	235
229. Тепловое движение при $-273^{\circ}\text{C}$ .....	210	235
230. Абсолютный нуль .....	210	237
231. Вакуум .....	210	237
232. Средняя температура всего вещества .....	210	239
233. Десятимиллионная доля грамма .....	211	242
234. Число Авогадро .....	211	243
235. Литр спирта в океане .....	211	243
236. Расстояние между молекулами .....	211	244
237. Масса атома водорода и масса Земли .....	211	244
238. Величина молекулы .....	211	245
239. Электрон и Солнце .....	211	245
240. Весомость энергии .....	212	245
241. Школьная механика и теория относительности ....	212	248
242. Литр и кубический дециметр .....	212	252

	Вопросы	Ответы
243. Вес паутинной нити .....	212	252
244. Бутылки и пароходы .....	212	252
245. Приседание на весах .....	212	253
246. Затыжной прыжок .....	212	253
247. Два шара .....	212	255
248. Сверхускоренное падение .....	213	255
249. Распространение жизни в мировом пространстве .....	213	256
250. На эскалаторе .....	213	256
Вместо послесловия .....	257	
Книжные и журнальные публикации о Я. И. Перельмане .....	257	
Книги Я. И. Перельмана .....	258	
Издания, упоминаемые в книге Я. И. Перельмана «Знаете ли Вы физику?» .....	262	
Для любителей решать задачи по физике .....	266	

Научно-популярное издание

ПЕРЕЛЬМАН Яков Исидорович

ЗНАЕТЕ ЛИ ВЫ ФИЗИКУ?

---

БИБЛИОТЕЧКА «КВАНТ», ВЫПУСК 82

Заведующий редакцией *Н. А. Носова*

Редактор *Г. М. Карасева*

Художественные редакторы *Г. М. Коровина, Л. Н. Романенкова*

Технический редактор *И. Ш. Аксельрод*. Корректор *Т. С. Вайсберг*

ИБ 41074

Сдано в набор 16.03.92. Подписано к печати 24.09.92. Формат 84 × 108/32. Бумага тип. №2. Гарнитура таймс. Печать офсетная. Усл. печ. л. 14,28. Усл. кр.-отт. 14,7. Уч.-изд. л. 12,8. Тираж 51 945 экз. Заказ № 433. С — 093.

Ордена Трудового Красного Знамени издательство «Наука»

Главная редакция физико-математической литературы  
117071 Москва В-71. Ленинский проспект, 15

Ордена Октябрьской Революции и ордена Трудового Красного Знамени МПО «Первая Образцовая типография» Министерства печати и информации Российской Федерации. 113054 Москва М-54, Валовая, 28.

### Единицы работы, энергии и количества теплоты

$$1 \text{ Вт} \cdot \text{ч} = 3,6 \cdot 10^3 \text{ Дж}$$

$$1 \text{ калория (кал)} = 4,19 \text{ Дж}$$

$$1 \text{ килограмм-сила} - \text{метр (кгс} \cdot \text{м)} = 9,81 \text{ Дж}$$

$$1 \text{ литр на атмосферу (л} \cdot \text{атм)} = 1,01 \cdot 10^2 \text{ Дж}$$

$$1 \text{ лошадиная сила} - \text{час (л} \cdot \text{с} \cdot \text{ч)} = 2,65 \cdot 10^6 \text{ Дж}$$

$$1 \text{ эрг} = 10^{-7} \text{ Дж}$$

### Единицы мощности

$$1 \text{ килограмм-сила} - \text{метр в секунду (кгс} \cdot \text{м/с)} = 9,81 \text{ Вт}$$

$$1 \text{ килокалория / час} = 1,16 \text{ Вт}$$

$$1 \text{ лошадиная сила (л.с.)} = 736 \text{ Вт}$$

$$1 \text{ эрг / с} = 10^{-7} \text{ Вт}$$

### Единицы давления

$$1 \text{ атмосфера техническая (ат)} = 1 \text{ кгс/см}^2 = 9,81 \cdot 10^4 \text{ Па}$$

$$1 \text{ атмосфера физическая (атм)} = 1,01 \cdot 10^5 \text{ Па}$$

$$1 \text{ бар} = 10^5 \text{ Па}$$

$$1 \text{ дин/см}^2 = 0,1 \text{ Па}$$

$$1 \text{ кгс/м}^2 = 9,81 \text{ Па}$$

$$1 \text{ кгс/мм}^2 = 9,81 \cdot 10^6 \text{ Па}$$

$$1 \text{ мм ртутного столба} = 133 \text{ Па}$$

$$1 \text{ мм водяного столба} = 9,81 \text{ Па}$$

$$1 \text{ тонна-сила / м}^2 = 9,81 \cdot 10^3 \text{ Па}$$

### Единицы плоского угла

$$1 \text{ градус (1}^\circ) = 1,75 \cdot 10^{-2} \text{ рад}$$

$$1 \text{ угловая минута (1'} = 2,91 \cdot 10^{-4} \text{ рад}$$

$$1 \text{ угловая секунда (1''} = 4,85 \cdot 10^{-6} \text{ рад}$$

$$1 \text{ оборот (об)} (\text{полный угол}) = 2 \pi \text{ рад}$$

### Единицы частоты вращения

$$1 \text{ оборот в секунду (об/с)} = 1 \text{ с}^{-1}$$

$$1 \text{ оборот в минуту (об/мин)} = 1/60 \text{ с}^{-1}$$

